www.mikrocontroller.net

AVR-GCC-Tutorial

Inhaltsverzeichnis

[Verbergen]

- 1 Vorwort
- 2 Benötigte Werkzeuge
- 3 Was tun, wenn's nicht "klappt"?
- 4 Erzeugen von Maschinencode
- 5 Einführungsbeispiel
- 6 Exkurs: Makefiles
  - 6.1 Controllertyp setzen
  - 6.2 Quellcode-Dateien eintragen
  - 6.3 Programmiergerät einstellen
  - 6.4 Anwendung
  - 6.5 Sonstige Einstellungen
    - 6.5.1 Optimierungsgrad
    - 6.5.2 Debug-Format
    - 6.5.3 Assembler-Dateien
    - 6.5.4 Taktfrequenz
  - 6.6 Eingabedateien zur Simulation in AVR-Studio
- 7 Ganzzahlige (Integer) Datentypen
- 8 Bitfelder
- 9 Grundsätzlicher Programmaufbau eines µC-Programms
  - 9.1 Sequentieller Programmablauf
  - 9.2 Interruptgesteuerter Programmablauf
- 10 Allgemeiner Zugriff auf Register
  - 10.1 I/O-Register
    - 10.1.1 Lesen eines I/O-Registers
      - 10.1.1.1 Lesen eines Bits
    - 10.1.2 Schreiben eines I/O-Registers
      - 10.1.2.1 Schreiben von Bits
    - 10.1.3 Warten auf einen bestimmten Zustand
- 11 Zugriff auf Ports
  - 11.1 Datenrichtung bestimmen
  - 11.2 Vordefinierte Bitnummern für I/O-Register
  - 11.3 Digitale Signale
  - 11.4 Ausgänge
  - 11.5 Eingänge (Wie kommen Signale in den µC)
    - 11.5.1 Signalkopplung
    - 11.5.2 Tasten und Schalter
      - 11.5.2.1 Pull-Up Widerstände aktivieren
      - 11.5.2.2 (Tasten-)Entprellung
  - 11.6 Analog
  - 11.7 16-Bit Portregister (ADC, ICR1, OCR1, TCNT1, UBRR)
  - 11.8 IO-Register als Parameter und Variablen
- 12 Der UART
  - 12.1 Allgemeines zum UART
  - 12.2 Die Hardware
  - 12.3 UART initialisieren
  - 12.4 Senden mit dem UART
    - 12.4.1 Senden einzelner Zeichen

- 12.4.2 Schreiben einer Zeichenkette (String)
- 12.4.3 Schreiben von Variableninhalten
- 12.5 Zeichen Empfangen
- 12.6 Software-UART
- 12.7 Handshaking
  - 12.7.1 Hardwarehandshake (RTS/CTS)
  - 12.7.2 Softwarehandshake (XON/XOFF)
- 13 Analoge Ein- und Ausgabe
  - 13.1 ADC (Analog Digital Converter)
    - 13.1.1 Der interne ADC im AVR
      - 13.1.1.1 Die Register des ADC
      - 13.1.1.2 Aktivieren des ADC
    - 13.1.2 Analog-Digital-Wandlung ohne internen ADC
      - 13.1.2.1 Messen eines Widerstandes
      - 13.1.2.2 ADC über Komparator
  - 13.2 DAC (Digital Analog Converter)
    - 13.2.1 DAC über mehrere digitale Ausgänge
    - 13.2.2 PWM (Pulsweitenmodulation)
- 14 LCD Ansteuerung
  - 14.1 Das LCD und sein Controller
  - 14.2 Anschluss an den Controller
  - 14.3 Programmierung
- 15 Die Timer/Counter des AVR
  - 15.1 Der Vorteiler (Prescaler)
  - 15.2 8-Bit Timer/Counter
  - 15.3 16-Bit Timer/Counter
    - 15.3.1 Die PWM-Betriebsart
    - 15.3.2 Vergleichswert-Überprüfung
    - 15.3.3 Einfangen eines Eingangssignals (Input Capturing)
  - 15.4 Gemeinsame Register
- 16 Warteschleifen (delay.h)
- 17 Sleep-Modes
- 18 Der Watchdog
  - 18.1 Wie funktioniert nun der Watchdog?
  - 18.2 Watchdog-Anwendungshinweise
- 19 Programmieren mit Interrupts
  - 19.1 Anforderungen an Interrupt-Routinen
  - 19.2 Interrupt-Quellen
  - 19.3 Register
  - 19.4 Allgemeines über die Interrupt-Abarbeitung
  - 19.5 Interrupts mit dem AVR GCC Compiler (WinAVR)
    - 19.5.1 ISR
    - 19.5.2 Unterbrechbare Interruptroutinen
  - 19.6 Datenaustausch mit Interrupt-Routinen
  - 19.7 Interrupt-Routinen und Registerzugriffe
  - 19.8 Was macht das Hauptprogramm?
- 20 Speicherzugriffe
  - 20.1 RAM
  - 20.2 Programmspeicher (Flash)
    - 20.2.1 Byte lesen
    - 20.2.2 Wort lesen
    - 20.2.3 Floats und Structs lesen
    - 20.2.4 Vereinfachung für Zeichenketten (Strings) im Flash
    - 20.2.5 Flash in der Anwendung schreiben
    - 20.2.6 Warum so kompliziert?
  - 20.3 EEPROM
    - 20.3.1 Bytes lesen/schreiben
    - 20.3.2 Wort lesen/schreiben
    - 20.3.3 Block lesen/schreiben

- 20.3.4 EEPROM-Speicherabbild in .eep-Datei
- 20.3.5 EEPROM-Variable auf feste Adressen legen
- 20.3.6 Bekannte Probleme bei den EEPROM-Funktionen

- 21 Die Nutzung von printf
- 22 Assembler und Inline-Assembler
  - 22.1 Inline-Assembler
  - 22.2 Assembler-Dateien
  - 22.3 Globale Variablen für Datenaustausch
    - 22.3.1 Globale Variablen im Assemblerfile anlegen
    - 22.3.2 Variablen größer als 1 Byte
- 23 Anhang
  - 23.1 Besonderheiten bei der Anpassung bestehenden Quellcodes
    - 23.1.1 Veraltete Funktionen zur Deklaration von Interrupt-Routinen
    - 23.1.2 Veraltete Funktionen zum Portzugriff
    - 23.1.3 Veraltete Funktionen zum Zugriff auf Bits in Registern
    - 23.1.4 Selbstdefinierte (nicht-standardisierte) ganzzahlige Datentypen
  - 23.2 Zusätzliche Funktionen im Makefile
    - 23.2.1 Bibliotheken (Libraries/.a-Dateien) hinzufügen
    - 23.2.2 Fuse-Bits
  - 23.3 Externe Referenzspannung des internen Analog-Digital-Wandlers
- 24 TODO

Vorwort

Dieses Tutorial soll den Einstieg in die Programmierung von Atmel AVR-Mikrocontrollern in der Programmiersprache C mit dem freien (GPL, "kostenlosen") C-Compiler AVR-GCC erleichtern.

Vorausgesetzt werden Grundkenntnisse zum Programmieren in C. Diese Kenntnisse kann man sich online erarbeiten z. B. mit dem OpenBook C von A bis Z. Nicht erforderlich sind Vorkenntnisse in der Programmierung von Mikrocontrollern, weder in Assembler noch in einer anderen Sprache.

Die Erläuterungen und Beispiele beziehen sich auf die Versionen 3.4.5 des avr-gcc C-Compilers und 1.4.3 der avr-libc Standardbibliothek, so wie sie in der Entwicklungsumgebung WinAVR 20060125 enthalten sind. Die Unterschiede zu älteren Versionen werden im Haupttext und Anhang zwar erläutert; Anfängern sei jedoch empfohlen, die aktuellen Versionen zu nutzen.

In diesem Text wird häufig auf die Standardbibliothek avr-libc verwiesen, für die es eine avr-libc Online-Dokumentation gibt. Bei WinAVR gehört die Dokumentation zum Lieferumfang und wird mitinstalliert.

Dieses Tutorial ist in PDF-Form erhältlich bei:
http://www.siwawi.arubi.uni-kl.de/avr_projects/AVR-GCC-Tutorial_-_www_mikrocontroller_net.pdf

Das ursprüngliche Tutorial stammt von Christian Schifferle, viele neue Abschnitte und aktuelle Anpassungen von Martin Thomas. Viele der im Originaldokument verwendeten Funktionen sind in der aktuellen Versionen des avr-gcc C-Compilers und der Laufzeitbibliothek avr-libc nicht mehr enthalten oder sollen nicht mehr genutzt werden. Dieses Tutorial wurde an die neuen Funktionen/Methoden angepasst.

Benötigte Werkzeuge

Um eigene Programme für AVRs mittels avr-gcc/avr-libc zu erstellen und zu testen, wird folgende Hard- und Software benötigt:

- Platine oder Versuchsaufbau für die Aufnahme eines AVR Controllers, der vom avr-gcc Compiler unterstützt wird (alle ATmegas und die meisten AT90, siehe Dokumentation der avr-libc für unterstützte Typen). Dieses Testboard kann durchaus auch selbst gelötet oder auf einem Steckbrett aufgebaut werden. Einige Registerbeschreibungen dieses Tutorials beziehen sich auf den inzwischen veralteten AT90S2313. Der weitaus größte Teil des Textes ist aber für alle Controller der AVR-Familie gültig. Brauchbare Testplattform sind auch

das STK500 und der AVR Butterfly von Atmel. mehr..
- Der avr-gcc Compiler und die avr-libc. Kostenlos erhältlich für nahezu alle Plattformen und Betriebssysteme. Für MS-Windows im Paket WinAVR; für Unix/Linux siehe auch Hinweise im Artikel AVR-GCC.
- Programmiersoftware und -hardware z.B. PonyProg (siehe auch: Pony-Prog Tutorial) oder AVRDUDE mit STK200-Dongle oder die von Atmel verfügbare Hard- und Software (STK500, Atmel AVRISP, AVR-Studio).
- Nicht unbedingt erforderlich, aber zur Simulation und zum Debuggen unter MS-Windows recht nützlich: AVR-Studio (siehe Abschnitt Exkurs: Makefiles).

Was tun, wenn's nicht "klappt"?

- Herausfinden, ob es tatsächlich ein avr(-gcc) spezifisches Problem ist oder die C-Kenntnisse einer Auffrischung bedürfen. Allgemeine C-Fragen kann man eventuell "beim freundlichen Programmierer zwei Büro-, Zimmer- oder Haustüren weiter" loswerden. Ansonsten: C-Buch (gibt's auch "gratis" online) lesen.
- AVR Checkliste
- Die **Dokumentation der avr-libc** lesen, vor allem (aber nicht nur) den Abschnitt Related Pages/**Frequently Asked Questions** = Oft gestellte Fragen (und Antworten dazu). Z.Zt leider nur in englischer Sprache verfügbar.
- Den Artikel AVR-GCC in diesem Wiki lesen.
- Das GCC-Forum auf www.mikrocontroller.net nach vergleichbaren Problemen absuchen.
- Das avr-gcc-Forum bei avrfreaks nach vergleichbaren Problemen absuchen.
- Das Archiv der avr-gcc Mailing-Liste nach vergleichbaren Problemen absuchen.
- Nach Beispielcode suchen. Vor allem im *Projects*-Bereich von AVRFREAKS (anmelden).
- Google oder yahoo befragen schadet nie.
- Bei Problemen mit der Ansteuerung interner AVR-Funktionen mit C-Code: das Datenblatt des Controllers lesen (ganz und am Besten zweimal). Datenblätter sind von den Atmel Webseiten als pdf-Dateien verfügbar. Das komplette Datenblatt (complete) und nicht die Kurzfassung (summary) verwenden.
- Die Beispieleprogramme im AVR-Tutorial sind zwar in AVR-Assembler verfasst, Erläuterungen und Vorgehensweise ist aber auch auf C-Programme übertragbar.
- einen Beitrag in eines der Foren oder eine Mail an die Mailing-Liste schreiben. Dabei möglichst viel Information geben: Controller, Compilerversion, genutzte Bibliotheken, Ausschnitte aus dem Quellcode oder besser ein Testprojekt mit allen notwendigen Dateien um das Problem nachzuvollziehen sowie genaue Fehlermeldungen bzw. Beschreibung des Fehlverhaltens. Bei Ansteuerung externer Geräte die Beschaltung beschreiben oder skizzieren (z.B. mit Andys ASCII Circuit). Siehe dazu auch: **"Wie man Fragen stellt"**.

Erzeugen von Maschinencode

Aus dem C-Quellcode erzeugt der avr-gcc Compiler (zusammen mit Hilfsprogrammen wie z.B. Präprozessor, Assembler und Linker) Maschinencode für den AVR-Controller. Üblicherweise liegt dieser Code dann im Intel Hex-Format vor ("Hex-Datei"). Die Programmiersoftware (z.B. AVRDUDE, PonyProg oder AVRStudio/STK500-plugin) liest diese Datei ein und überträgt die enthaltene Information (den Maschinencode) in den Speicher des Controllers. Im Prinzip sind also "nur" der avr-gcc-Compiler (und wenige Hilfsprogramme) mit den "richtigen" Optionen aufzurufen um aus C-Code eine "Hex-Datei" zu erzeugen. Grundsätzlich stehen dazu zwei verschiedene Ansätze zur Verfügung:

- Die Verwendung einer Integrierten Entwicklungsumgebung (IDE), bei der alle Einstellungen z.B. in Dialogboxen durchgeführt werden können. Unter Anderen kann AVRStudio ab Version 4.12 (kostenlos bei atmel.com) zusammen mit WinAVR als integrierte Entwicklungsumgebung für den Compiler avr-gcc genutzt werden (dazu müssen AVRStudio und WinAVR auf dem Rechner installiert sein). Weitere IDEs für den avr-gcc (ohne Anspruch auf Vollständigkeit): AtmanAvr C (relativ günstig), KamAVR (kostenlos) VMLab (ab Version 3.12 ebenfalls kostenlos). Integrierte Entwicklungsumgebungen unterscheiden sich stark in Ihrer Bedienung und stehen auch nicht für alle Plattformen zur Verfügung, auf denen der Compiler ausführbar ist (z.B. AVRStudio nur für MS-Windows). Zur Anwendung des avr-gcc Compilers mit IDEs sei hier auf deren Dokumentation verwiesen.

- Die Nutzung des Programms make mit passenden Makefiles. In den folgenden Abschnitten wird die Generierung von Maschinencode für einen AVR ("hex-Datei") aus C-Quellcode ("c-Dateien") anhand der universellen und plattformunabhängigen Vorgehensweise mittels make und Makefiles näher erläutert. Viele der darin beschriebenen Optionen findet man auch im Konfigurationsdialog des avr-gcc-Plugins von AVRStudio (AVRStudio generiert ein makefile in einem Unterverzeichnis des Projektverzeichnisses).

Beim Wechsel vom makefile-Ansatz nach WinAVR-Vorlage zu AVRStudio ist darauf zu achten, dass AVRStudio (Stand: AVRStudio Version 4.13) bei einem neuen Projekt die Optimierungsoption (vgl. Abschnitt Exkurs: Makefiles, typisch: -Os) nicht einstellt und die mathematische Bibliothek der avr-libc (libm.a, Linker-Option -lm) nicht einbindet. Beides ist Standard bei Verwendung von makefiles nach WinAVR-Vorlage und sollte daher auch im Konfigurationsdialog des avr-gcc-Plugins von AVRStudio "manuell" eingestellt werden, um auch mit AVRStudio kompakten Code zu erzeugen.

Einführungsbeispiel

Zum Einstieg ein kleines Beispiel, an dem die Nutzung des Compilers und der Hilfsprogramme (der sogenannten *Toolchain*) demonstriert wird. Detaillierte Erläuterungen folgen in den weiteren Abschnitten dieses Tutorials.

Das Programm soll auf einem AVR Mikrocontroller einige Ausgänge ein- und andere ausschalten. Das Beispiel ist für einen ATmega16 programmiert (Datenblatt), kann aber sinngemäß für andere Controller der AVR-Familie modifiziert werden.

Zunächst der Quellcode der Anwendung, der in einer Text-Datei mit dem Namen *main.c* abgespeichert wird.

```
/* Alle Zeichen zwischen Schrägstrich-Stern
   und Stern-Schrägstrich sind lediglich Kommentare */

// Zeilenkommentare sind ebenfalls möglich
// alle auf die beiden Schrägstriche folgenden
// Zeichen einer Zeile sind Kommentar

#include <avr/io.h>          // (1)

int main (void) {            // (2)

   DDRB  = 0xff;             // (3)
   PORTB = 0x03;             // (4)

   while(1) {                // (5a)
     /* "leere" Schleife*/;   // (5b)
   }                         // (5c)

   /* wird nie erreicht */
   return 0;                 // (6)
}
```

- In der mit (1) markierten Zeile, wird eine sogenannte Header-Datei eingebunden. In io.h sind die Registernamen definiert, die im späteren Verlauf genutzt werden.
- Bei (2) beginnt das eigentliche Programm. Jedes C-Programm beginnt mit den Anweisungen in der Funktion main.
- Die Anschlüsse eines AVR ("Beinchen") werden zu Blöcken zusammengefasst, einen solchen Block bezeichnet man als Port. Beim ATmega16 hat jeder Port 8 Anschlüsse, bei kleineren AVRs können einem Port auch weniger als 8 Anschlüsse zugeordnet sein. Da per Definition (Datenblatt) alle gesetzten Bits in einem Richtungsregister den entsprechenden Anschluss auf Ausgang schalten, werden mit DDRB=0xff alle Anschlüsse des Ports B zu Ausgängen.
- (4) stellt die Werte der Ausgänge ein. Die den ersten beiden Bits des Ports zugeordnete Anschluss (PB0 und PB1) werden 1, alle anderen Anschlüsse des Ports B (PB2-PB7) zu 0. Aktivierte Ausgänge (logisch 1 oder "high") liegen auf Betriebsspannung (VCC, meist 5 Volt), nicht-aktivierte Ausgänge führen 0 Volt (GND, Bezugspotential).
- (5) ist die so genannte Hauptschleife (main-loop). Dies ist eine Programmschleife, welche kontinuierlich wiederkehrende Befehle enthält. In diesem Beispiel ist sie leer. Der Controller durchläuft die Schleife immer wieder, ohne das etwas passiert (außer das Strom verbraucht wird). Eine solche Schleife ist notwendig, da es auf dem Controller kein Betriebssystem gibt, das nach Beendigung des Programmes die Kontrolle übernehmen könnte. Wäre die Schleife nicht vorhanden, würde der Zustand des Controllers nach dem Programmende undefiniert.

- (6) wäre das Programmende. Die Zeile ist nur aus Gründen der C- Kompatibilität enthalten: int main(void) besagt, dass die Funktion einen Wert zurückgibt. Die Anweisung wird aber nicht erreicht, da das Programm die Hauptschleife nie verlässt.

Um diesen Quellcode in ein auf den Controller lauffähiges Programm zu übersetzen, wird hier ein Makefile genutzt. Das verwendete Makefile findet sich auf der Seite Beispiel Makefile und basiert auf der Vorlage, die in WinAVR mitgeliefert wird und wurde bereits angepasst (Controllertyp ATmega16). Man kann das Makefile bearbeiten und an andere Controller anpassen oder sich mit dem Programm MFile menügesteuert ein Makefile "zusammenklicken". Das Makefile speichert man unter dem Namen Makefile (ohne Endung) im selben Verzeichnis in dem auch die Datei main.c mit dem Programmcode abgelegt ist. Detailliertere Erklärungen zur Funktion von Makefiles finden sich im folgenden Abschnitt Exkurs: Makefiles.

```
D:\tmp\gcc_tut\quickstart>dir

 Verzeichnis von D:\tmp\gcc_tut\quickstart

28.11.2006  22:53    <DIR>          .
28.11.2006  22:53    <DIR>          ..
28.11.2006  20:06               118 main.c
28.11.2006  20:03            16.810 Makefile
               2 Datei(en)         16.928 Bytes
```

Nun gibt man *make all* ein. Falls das mit WinAVR installierte Programmers Notepad genutzt wird, gibt es dazu einen Menüpunkt im Tools Menü. Sind alle Einstellungen korrekt, entsteht eine Datei main.hex, in der der Code für den AVR enthalten ist.

```
D:\tmp\gcc_tut\quickstart>make all

-------- begin --------
avr-gcc (GCC) 3.4.6
Copyright (C) 2006 Free Software Foundation, Inc.
This is free software; see the source for copying conditions.  There is NO
warranty; not even for MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.


Compiling C: main.c
avr-gcc -c -mmcu=atmega16 -I. -gdwarf-2 -DF_CPU=1000000UL -Os -funsigned-char -f
unsigned-bitfields -fpack-struct -fshort-enums -Wall -Wstrict-prototypes -Wundef
 -Wa,-adhlns=obj/main.lst  -std=gnu99 -Wundef -MD -MP -MF .dep/main.o.d main.c -
o obj/main.o

Linking: main.elf
avr-gcc -mmcu=atmega16 -I. -gdwarf-2 -DF_CPU=1000000UL -Os -funsigned-char -funs
igned-bitfields -fpack-struct -fshort-enums -Wall -Wstrict-prototypes -Wundef -W
a,-adhlns=obj/main.o  -std=gnu99 -Wundef -MD -MP -MF .dep/main.elf.d obj/main.o
--output main.elf -Wl,-Map=main.map,--cref    -lm

Creating load file for Flash: main.hex
avr-objcopy -O ihex -R .eeprom main.elf main.hex

[...]
```

Der Inhalt der hex-Datei kann nun zum Controller übertragen werden. Dies kann z.B. über In-System-Programming (ISP) erfolgen, das im AVR-Tutorial: Equipment beschrieben ist. Makefiles nach der WinAVR/MFile-Vorlage sind für die Nutzung des Programms AVRDUDE vorbereitet. Wenn man den Typ und Anschluss des Programmiergerätes richtig eingestellt hat, kann mit *make program* die Übertragung mittels AVRDUDE gestartet werden. Jede andere Software, die hex-Dateien lesen und zu einem AVR übertragen kann (z.B. Ponyprog, yapp, AVRStudio), kann natürlich ebenfalls genutzt werden.

Startet man nun den Controller (Reset-Taster oder Stromzufuhr aus/an), werden vom Programm die Anschlüsse PB0 und PB1 auf 1 gesetzt. Man kann mit einem Messgerät nun an diesem Anschluss die Betriebsspannung messen oder eine LED leuchten lassen (Anode an den Pin, Vorwiderstand nicht vergessen). An den Anschlüssen PB2-PB7 misst man 0 Volt. Eine mit der Anode an einen dieser Anschlüsse verbundene LED leuchtet nicht.

Exkurs: Makefiles

Wenn man bisher gewohnt ist, mit integrierten Entwicklungsumgebung à la Visual-C Programme zu erstellen, wirkt das makefile-Konzept auf den ersten Blick etwas kryptisch. Nach kurzer Einarbeitung ist diese Vorgehensweise jedoch

sehr praktisch. Diese Dateien (üblicher Name: 'Makefile' ohne Dateiendung) dienen der Ablaufsteuerung des Programms make, das auf allen Unix/Linux-Systemen installiert sein sollte, und in einer Fassung fuer MS-Windows auch in WinAVR (Unterverzeichnis utils/bin) enthalten ist.

Im Unterverzeichnis *sample* einer WinAVR-Installation findet man eine sehr brauchbare Vorlage, die sich einfach an das eigene Projekt anpassen lässt (lokale Kopie Stand Sept. 2004). Wahlweise kann man auch mfile von Jörg Wunsch nutzen. mfile erzeugt ein makefile nach Einstellungen in einer grafischen Nutzeroberfläche, wird bei WinAVR mitinstalliert, ist aber als TCL/TK-Programm auf nahezu allen Plattformen lauffähig.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf das WinAVR Beispiel-Makefile.

Ist im Makefile alles richtig eingestellt genügt es, sich drei Parameter zu merken, die über die shell bzw. die Windows-Kommandozeile (cmd.exe/command.com) als Parameter an "make" übergeben werden. Das Programm make sucht sich "automatisch" das Makefile im aktuellen Arbeitsverzeichnis und führt die darin definierten Operationen für den entsprechenden Aufrufparameter durch.

make all	Erstellt aus den im Makefile angegebenen Quellcodes eine *hex*-Datei (und ggf. auch *eep*-Datei).
make program	Überträgt die hex-Datei (und wahlweise auch die eep-Datei für den EEPROM) zum AVR.
make clean	löscht alle temporären Dateien, also auch die hex-Datei

Diese Aufrufe können in die allermeisten Editoren in "Tool-Menüs" eingebunden werden. Dies erspart den Kontakt mit der Kommandozeile. (Bei WinAVR sind die Aufrufe bereits im Tools-Menü des mitgelieferten Editors Programmers-Notepad eingefügt.)

Üblicherweise sind folgende Daten im Makefile anzupassen:

- Controllertyp
- Quellcode-Dateien (c-Dateien)
- Typ und Anschluss des Programmiergeräts

seltener sind folgende Einstellungen durchzuführen:

- Grad der Optimierung
- Methode zur Erzeugung der Debug-Symbole (Debug-Format)
- Assembler-Quellcode-Dateien (S-Dateien)

Die in den folgenden Unterabschnitten gezeigten Makefile-Ausschnitte sind für ein Programm, das auf einem ATmega8 ausgeführt werden soll. Der Quellcode besteht aus den c-Dateien superprog.c (darin main()), uart.c, lcd.c und 1wire.c. Im Quellcodeverzeichnis befinden sich diese Dateien: superprog.c, uart.h, uart.c, lcd.h, lcd.c, 1wire.h, 1wire.c und das makefile (die angepasste Kopie des WinAVR-Beispiels).

Der Controller wird mittels AVRDUDE über ein STK200-Programmierdongle an der Schnittstelle lpt1 (bzw. /dev/lp0) programmiert. Im Quellcode sind auch Daten für die *section .eeprom* definiert (siehe Abschnitt Speicherzugriffe), diese sollen beim Programmieren gleich mit ins EEPROM geschrieben werden.

Controllertyp setzen

Dazu wird die "make-Variable" MCU entsprechend dem Namen des verwendeten Controllers gesetzt. Ein Liste der von avr-gcc und der avr-libc unterstützten Typen findet sich in der Dokumentation der avr-libc.

```
# Kommentare in Makefiles beginnen mit einem Doppelkreuz
...

# ATmega8 at work
MCU = atmega8
# oder MCU = atmega16
# oder MCU = at90s8535
# oder ...
...
```

Quellcode-Dateien eintragen

Den Namen der Quellcodedatei welche die Funktion main enthält, wird hinter TARGET eingetragen. Dies jedoch ohne die Endung *.c*.

```
...
TARGET = superprog
...
```

Besteht das Projekt wie im Beispiel aus mehr als einer Quellcodedatei, sind die weiteren c-Dateien (nicht die Header-Dateien, vgl. Include-Files (C)) durch Leerzeichen getrennt bei SRC einzutragen. Die bei TARGET definierte Datei ist schon in der SRC-Liste enthalten. Diesen Eintrag nicht löschen!

```
...
SRC = $(TARGET).c uart.c lcd.c 1wire.c
...
```

Alternativ kann man die Liste der Quellcodedateien auch mit dem Operator += erweitern.

```
SRC = $(TARGET).c uart.c 1wire.c
# lcd-Code fuer Controller xyz123 (auskommentiert)
# SRC += lcd_xyz.c
# lcd-Code fuer "Standard-Controller" (genutzt)
SRC += lcd.c
```

Programmiergerät einstellen

Die Vorlagen sind auf die Programmiersoftware AVRDUDE angepasst, jedoch lässt sich auch andere Programmiersoftware einbinden, sofern diese über Kommandozeile gesteuert werden kann (z.B. stk500.exe, uisp, sp12).

```
...
# Einstellung fuer STK500 an com1 (auskommentiert)
# AVRDUDE_PROGRAMMER = stk500
# com1 = serial port. Use lpt1 to connect to parallel port.
# AVRDUDE_PORT = com1    # programmer connected to serial device

# Einstellung fuer STK200-Dongle an lpt1
AVRDUDE_PROGRAMMER = stk200
AVRDUDE_PORT = lpt1
...
```

Sollen Flash(=.hex) und EEPROM(=.eep) zusammen auf den Controller programmiert werden, ist das Kommentarzeichen vor AVRDUDE_WRITE_EEPROM zu löschen.

```
...
# auskommentiert: EERPOM-Inhalt wird nicht mitgeschrieben
#AVRDUDE_WRITE_EEPROM = -U eeprom:w:$(TARGET).eep

# nicht auskommentiert: EERPOM-Inhalt wird mitgeschrieben
AVRDUDE_WRITE_EEPROM = -U eeprom:w:$(TARGET).eep
...
```

Anwendung

Das erstellte Makefile und der Code müssen im gleichen Ordner sein, auch sollte der Dateiname nicht verändert werden.

Die Eingabe von *make all* im Arbeitsverzeichnis mit dem Makefile und den Quellcodedateien erzeugt (unter anderem) die Dateien superprog.hex und superprog.eep. Abhängigkeiten zwischen den einzelnen c-Dateien werden dabei automatisch berücksichtigt. Die *superprog.hex* und *superprog.eep* werden mit *make program* zum Controller übertragen. Mit *make clean* werden alle temporären Dateien gelöscht (="aufgeräumt").

Sonstige Einstellungen

Optimierungsgrad

Der gcc-Compiler kennt verschiedene Stufen der Optimierung. Nur zu Testzwecken sollte die Optimierung ganz

deaktiviert werden (*OPT = 0*). Die weiteren möglichen Optionen weisen den Compiler an, möglichst kompakten oder möglichst schnellen Code zu erzeugen. In den weitaus meisten Fällen ist *OPT = s* die optimale (sic) Einstellung, damit wird kompakter und oft auch der "schnellste" Maschinencode erzeugt. Beim Update auf eine neue Compilerversion ist zu beachten, dass diese möglicherweise intern andere Optimierungsalgorithmen verwenden und sich dadurch die Größe des Machinencodes etwas ändert, ohne dass man im Quellcode etwas geändert hat.

Als Orientierungswerte die Größe des Maschinencodes bei verschiedenen Optionen für einen nicht näher spezifizierten relativ kleinen Testcode bei Verwendung einer nicht näher spezifizierten Compilerversion.

- -O0 : 12'217 Byte
- -O1 : 9'128 Byte
- -O2 : 1'670 Byte
- -O3 : 3'004 Byte
- -Os : 1'695 Byte

Im diesem Testfall führt die Option -O2 mit zum kompaktesten Code, dies allerdings hier nur mit 25 Bytes "Vorsprung". Es kann durchaus sein, dass nur wenige Programmerweiterungen dazu führen, dass Compilieren mit -Os wieder in kompakteren Code resultiert.

siehe dazu auch:

- avr-libc manual Abschnitt Using the gnu-tools/Compiler-Optionen
- avr-libc Manual FAQ Nr. 16 (Stand avr-libc Version 1.4.5)

Debug-Format

Unterstützt werden die Formate stabs und dwarf-2. Das Format wird hinter *DEBUG =* eingestellt. Siehe dazu Abschnitt *Eingabedateien zur Simulation*.

Assembler-Dateien

Die im Projekt genutzten Assembler-Dateien werden hinter ASRC durch Leerzeichen getrennt aufgelistet. Assembler-Dateien haben immer die Endung .S (großes S). Ist zum Beispiel der Assembler-Quellcode eines Software-UARTs in einer Datei softuart.S enthalten lautet die Zeile: *ASRC = softuart.S*

Taktfrequenz

Neuere Versionen der WinAVR/Mfile Vorlage für Makefiles beinhalten die Definition einer Variablen F_CPU (WinAVR 2/2005). Darin wird die Taktfrequenz des Controllers in Hertz eingetragen. Die Definition steht dann im gesamten Projekt ebenfalls unter der Bezeichnung F_CPU zur Verfügung (z.B. um daraus UART-, SPI- oder ADC-Frequenzeinstellungen abzuleiten).

Die Angabe hat rein "informativen" Charakter, die tatsächliche Taktrate wird über den externen Takt (z.B. Quarz) bzw. die Einstellung des internen R/C-Oszillators bestimmt. Die Nutzung von F_CPU hat also nur Sinn, wenn die Angabe mit dem tatsächlichen Takt übereinstimmt.

Innerhalb neuerer Versionen der avr-libc (ab Version 1.2) wird die Definition der Taktfrequenz (F_CPU) zur Berechnung der Wartefunktionen in delay.h genutzt. Diese funktionieren nur dann korrekt, wenn F_CPU mit der tatsächlichen Taktfrequenz übereinstimmt. F_CPU muss dazu jedoch nicht unbedingt im makefile definiert werden. Es reicht aus, wird aber bei mehrfacher Anwendung unübersichtlich, vor *#include <utils/delay.h>* (veraltet: *#include <avr/delay.h>*) ein *#define F_CPU [hier Takt in Hz]UL* einzufügen. Bei Nutzung von delay.h ist darauf zu achten, dass die Optimierung des Compilers nicht ausgeschaltet ist, sonst wird sehr viel Code erzeugt und die Wartezeit stimmt nicht mit der gewünschten Zeitspanne überein. Vgl. dazu den entsprechenden Abschnitt der Dokumentation.

Eingabedateien zur Simulation in AVR-Studio

Mit älteren AVR-Studio-Versionen kann man nur auf Grundlage sogenannter *coff*-Dateien simulieren. Neuere Versionen von AVR-Studio (ab 4.10.356) unterstützen zudem das modernere aber noch experimentelle dwarf-2-Format, das ab WinAVR 20040722 (avr-gcc 3.4.1/Binutils inkl. Atmel add-ons) "direkt" vom Compiler erzeugt wird.

Vorgehensweise bei dwarf-2

- im Makefile bei DEBUG:

  ```
  DEBUG=dwarf-2
  ```

- *make all* (evtl. vorher *make clean*)
- die erzeugte *elf*-Datei (im Beispiel oben *superprog.elf*) in AVR-Studio laden
- AVR-Simulator und zu simulierenden Controller wählen, "Finish"
- weiteres siehe AVR-Studio Online-Hilfe

Vorgehensweise bei extcoff
(sollte nur noch in Ausnahmefällen genutzt werden)

- im Makefile bei DEBUG:

  ```
  DEBUG=stabs
  ```

- *make extcoff* (evtl. vorher *make clean*)
- die erzeugte *cof*-Datei (im Beispiel oben *superprog.cof*) in AVR-Studio laden
- AVR-Simulator und zu simulierenden Controller wählen, "Finish"
- weiteres siehe AVR-Studio Online-Hilfe

Beim Simulieren scheinen oft "Variablen zu fehlen". Ursache dafür ist, dass der Compiler die "Variablen" direkt Registern zuweist. Dies kann vermieden werden, indem die Optimierung abgeschaltet wird (im makefile). Man simuliert dann jedoch ein vom optimierten Code stark abweichendes Programm. Das Abschalten der Optimierung wird nicht empfohlen.

Statt des Software-Simulators kann das AVR-Studio auch genutzt werden, um mit dem ATMEL JTAGICE, ein Nachbau davon (BootICE, Evertool o.ä.) oder dem ATMEL JTAGICE MKII "im System" zu debuggen. Dazu sind keine speziellen Einstellungen im makefile erforderlich. Debugging bzw. "In-System-Emulation" mit dem JTAGICE und JTAGICE MKII sind in der AVR-Studio Online-Hilfe beschrieben.

Die Verwendung von Makefiles bietet noch viele weiter Möglichkeiten, einige davon werden im Anhang Zusätzliche Funktionen im Makfile erläutert.

Ganzzahlige (Integer) Datentypen

Bei der Programmierung von Mikrokontrollern ist die Definition einiger ganzzahliger Datentypen sinnvoll, an denen eindeutig die Bit-Länge abgelesen werden kann.

Standardisierte Datentypen werden in der Header-Datei stdint.h definiert. Zur Nutzung der standardisierten Typen bindet man die "Definitionsdatei" wie folgt ein:

```
// ab avr-libc Version 1.2.0 möglich und empfohlen:
#include <stdint.h>

// veraltet: #include <inttypes.h>
```

Einige der dort definierten Typen (avr-libc Version 1.0.4):

```
typedef signed char         int8_t;
typedef unsigned char       uint8_t;

typedef short               int16_t;
typedef unsigned short      uint16_t;

typedef long                int32_t;
typedef unsigned long       uint32_t;

typedef long long           int64_t;
typedef unsigned long long uint64_t;
```

- int8_t steht für einen 8-Bit Integer mit einem Wertebereich -128 bis +127.
- uint8_t steht für einen 8-Bit Integer ohne Vorzeichen (unsigned int) mit einem Wertebereich von 0 bis 255

- int16_t steht für einen 16-Bit Integer mit einem Wertebereich -32768 bis +32767.
- uint16_t steht für einen 16-Bit Integer ohne Vorzeichen (unsigned int) mit einem Wertebereich von 0 bis 65535.

Die Typen ohne vorangestelltes *u* werden vorzeichenbehaftete Zahlen abgespeichert. Typen mit vorgestelltem *u* dienen der Ablage von postiven Zahlen (inkl. 0).

- siehe auch: Dokumentation der avr-libc Abschnitt Modules/(Standard) Integer Types

Bitfelder

Beim Programmieren von Mikrocontrollern muss auf jedes Byte oder sogar auf jedes Bit geachtet werden. Oft müssen wir in einer Variablen lediglich den Zustand 0 oder 1 speichern. Wenn wir nun zur Speicherung eines einzelnen Wertes den kleinsten bekannten Datentypen, nämlich **unsigned char**, nehmen, dann verschwenden wir 7 Bits, da ein **unsigned char** ja 8 Bit breit ist.

Hier bietet uns die Programmiersprache C ein mächtiges Werkzeug an, mit dessen Hilfe wir 8 Bits in eine einzelne Bytevariable zusammen fassen und (fast) wie 8 einzelne Variablen ansprechen können.
Die Rede ist von sogenannten Bitfeldern. Diese werden als Strukturelemente definiert. Sehen wir uns dazu doch am besten gleich ein Beispiel an:

```
struct {
   unsigned bStatus_1:1; // 1 Bit für bStatus_1
   unsigned bStatus_2:1; // 1 Bit für bStatus_2
   unsigned bNochNBit:1; // Und hier noch mal ein Bit
   unsigned b2Bits:2;    // Dieses Feld ist 2 Bits breit
   // All das hat in einer einzigen Byte-Variable Platz.
   // die 3 verbleibenden Bits bleiben ungenutzt
} x;
```

Der Zugriff auf ein solches Feld erfolgt nun wie beim Strukturzugriff bekannt über den Punkt- oder den Dereferenzierungs-Operator:

```
x.bStatus_1 = 1;
x.bStatus_2 = 0;
x.b2Bits = 3;
```

Bitfelder sparen Platz im RAM, zu Lasten von Platz im Flash, verschlechtern aber unter Umständen die Les- und Wartbarkeit des Codes. Anfängern wird geraten, ein "ganzes" Byte (uint8_t) zu nutzen auch wenn nur ein Bitwert gespeichert werden soll.

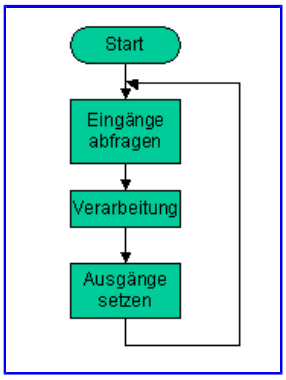
Wenn man nur eine paar wenige Variablen vom Typ bool verwenden möchte, kann man auch die Headerdatei <stdbool.h> einbinden und sich dann wie gewohnt einen Booltyp anlegen. Variablen dieses Typs brauchen dennoch 1 Byte Speicher, ermöglichen aber eine genaue Unterscheidung zwischen Zahlenvariable und boolscher Variable.

Grundsätzlicher Programmaufbau eines µC-Programms

Wir unterscheiden zwischen 2 verschiedenen Methoden, um ein Mikrocontroller-Programm zu schreiben, und zwar völlig unabhängig davon, in welcher Programmiersprache das Programm geschrieben wird.

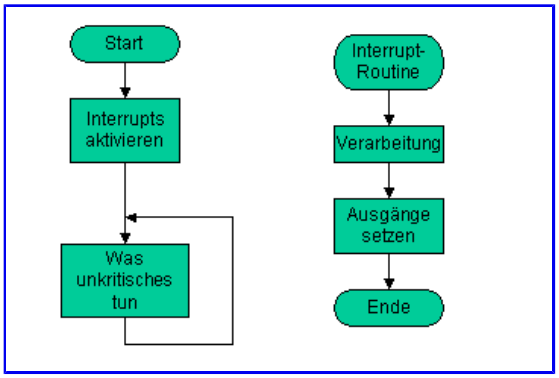
Sequentieller Programmablauf

Bei dieser Programmiertechnik wird eine Endlosschleife programmiert, welche im Wesentlichen immer den gleichen Aufbau hat:



Interruptgesteuerter Programmablauf

Bei dieser Methode werden beim Programmstart zuerst die gewünschten Interruptquellen aktiviert und dann in eine Endlosschleife gegangen, in welcher Dinge erledigt werden können, welche nicht zeitkritisch sind.
Wenn ein Interrupt ausgelöst wird so wird automatisch die zugeordnete Interruptfunktion ausgeführt.



Allgemeiner Zugriff auf Register

Die AVR-Controller verfügen über eine Vielzahl von Registern. Die meisten davon sind sogenannte Schreib-/Leseregister. Das heißt, das Programm kann die Inhalte der Register sowohl auslesen als auch beschreiben.

Einige Register haben spezielle Funktionen, andere wiederum können für allgemeine Zwecke (Speichern von Datenwerten) verwendet werden.

Einzelne Register sind bei allen AVRs vorhanden, andere wiederum nur bei bestimmten Typen. So sind beispielsweise die Register, welche für den Zugriff auf den UART notwendig sind selbstverständlich nur bei denjenigen Modellen vorhanden, welche über einen integrierten Hardware UART bzw. USART verfügen.

Die Namen der Register sind in den Headerdateien zu den entsprechenden AVR-Typen definiert. Dazu muss man den Namen der controllerspezifischen Headerdatei nicht kennen. Es reicht aus, die allgemeine Headerdatei *avr/io.h* einzubinden:

```
#include <avr/io.h>
```

Ist im Makefile der MCU-Typ z.B. mit dem Inhalt atmega8 definiert (und wird somit per -mmcu=atmega8 an den Compiler übergeben), wird beim Einlesen der io.h-Datei implizit ("automatisch") auch die iom8.h-Datei mit den Register-Definitionen für den ATmega8 eingelesen.

Intern wird diese "Automatik" wie folgt realisiert: Der Controllertyp wird dem Compiler als Parameter übergeben (vgl. *avr-gcc -c -mmcu=atmega16 [...]* im Einführungsbeispiel). Wird ein Makefile nach der WinAVR/mfile-Vorlage verwendet, setzt man die Variable *MCU*, der Inhalt dieser Variable wird dann an passender Stelle für die Compilerparameter verwendet. Der Compiler definiert intern eine dem mmcu-Parameter zugeordnete "Variable" (genauer: ein Makro) mit dem Namen des Controllers, vorangestelltem *__AVR_* und angehängten Unterstrichen (z.B. wird bei *-mmcu=atmega16* das Makro *__AVR_ATmega16__* definiert). Beim Einbinden der Header-Datei *avr/io.h*,

wird geprüft, ob das jeweilige Makro definiert ist und die zum Controller passende Definitionsdatei eingelesen. Zur Veranschaulichung einige Ausschnitte aus einem Makefile:

```
[...]
# MCU Type ("name") setzen:
MCU = atmega16
[...]

[...]
## Verwendung des Inhalts von MCU (hier atmega16) fuer die
## Compiler- und Assembler-Parameter
ALL_CFLAGS = -mmcu=$(MCU) -I. $(CFLAGS) $(GENDEPFLAGS)
ALL_CPPFLAGS = -mmcu=$(MCU) -I. -x c++ $(CPPFLAGS) $(GENDEPFLAGS)
ALL_ASFLAGS = -mmcu=$(MCU) -I. -x assembler-with-cpp $(ASFLAGS)
[...]

[...]
## Aufruf des Compilers:
## mit den Parametern ($(ALL_CFLAGS) ist -mmcu=$(MCU)[...] = -mmcu=atmega16[...]
$(OBJDIR)/%.o : %.c
        @echo
        @echo $(MSG_COMPILING) $<
        $(CC) -c $(ALL_CFLAGS) $< -o $@
[...]
```

Da --mmcu=atmega16 übergeben wurde, wird __AVR_ATmega16__ definiert und kann in avr/io.h zur Fallunterscheidung genutzt werden:

```
// avr/io.h
// (bei WinAVR-Standardinstallation in C:\WinAVR\avr\include\avr)
[...]
#if defined (__AVR_AT94K__)
#  include <avr/ioat94k.h>
// [...]
#elif defined (__AVR_ATmega16__)
// da __AVR_ATmega16__ definiert ist, wird avr/iom16.h eingebunden:
#  include <avr/iom16.h>
// [...]
#else
#  if !defined(__COMPILING_AVR_LIBC__)
#    warning "device type not defined"
#  endif
#endif
```

I/O-Register

Die I/O-Register haben einen besonderen Stellenwert bei den AVR Controllern. Sie dienen dem Zugriff auf die Ports und die Schnittstellen des Controllers.

Wir unterscheiden zwischen 8-Bit und 16-Bit Registern. Vorerst behandeln wir mal die 8-Bit Register.

Jeder AVR implementiert eine unterschiedliche Menge an GPIO-Registern (GPIO - General Purpose Input/Output). Die folgenden Beispiele gehen von einem AVR aus, der sowohl Port A als auch Port B besitzt. Sie müssen für andere AVRs (zum Beispiel ATmega8/48/88/168) entsprechend angepasst werden.

Lesen eines I/O-Registers

Zum Lesen kann man auf I/O-Register einfach wie auf eine Variable zugreifen. In Quellcodes, die für ältere Versionen des avr-gcc/der avr-libc entwickelt wurden, erfolgt der Lesezugriff über die Funktion inp(). Aktuelle Versionen des Compilers unterstützen den Zugriff nun direkt und inp() ist nicht mehr erforderlich.

Beispiel:

```
#include <avr/io.h>
#include <stdint.h>

uint8_t foo;
```

```
//...

int main(void)
{
    /* kopiert den Status der Eingabepins an PortB
       in die Variable foo: */
    foo = PINB;
    //...
}
```

Lesen eines Bits

Die AVR-Bibliothek (avr-libc) stellt auch Funktionen zur Abfrage eines einzelnen Bits eines Registers zur Verfügung:

bit_is_set (<Register>,<Bitnummer>)
: Die Funktion *bit_is_set* prüft, ob ein Bit gesetzt ist. Wenn das Bit gesetzt ist, wird ein Wert ungleich 0 zurückgegeben. Genau genommen ist es die Wertigkeit des abgefragten Bits, also 1 für Bit0, 2 für Bit1, 4 für Bit2 etc.

bit_is_clear (<Register>,<Bitnummer>)
: Die Funktion *bit_is_clear* prüft, ob ein Bit gelöscht ist. Wenn das Bit gelöscht ist, also auf 0 ist, wird ein Wert ungleich 0 zurückgegeben.

Die Funktionen bit_is_clear bzw. bit_is_set sind *nicht erforderlich*, man kann auch "einfache" C-Syntax verwenden, die universell verwendbar ist. *bit_is_set* entspricht dabei z.B. (Registername & (1 << Bitnummer)). Das Ergebnis ist <>0 ("wahr") wenn das Bit gesetzt und 0 ("falsch") wenn es nicht gesetzt ist. Die Negierung des Ausdrucks, also **!**(Registername & (1 << Bitnummer)), entspricht *bit_is_clear* und gibt einen Wert <>0 ("wahr") zurück, falls das Bit nicht gesetzt ist,

- siehe auch Bitmanipulation

Schreiben eines I/O-Registers

Zum Schreiben kann man I/O-Register einfach wie eine Variable setzen. In Quellcodes, die für ältere Versionen des avr-gcc/der avr-libc entwickelt wurden, erfolgt der Schreibzugriff über die Funktion outp(). Aktuelle Versionen des Compilers unterstützen den Zugriff nun direkt und outp() ist nicht mehr erforderlich.

Beispiel:

```
#include <avr/io.h>

...

int main(void)
{
    /* Setzt das Richtungsregister des Ports A auf 0xff
       (alle Pins als Ausgang): */
    DDRA = 0xff;

    /* Setzt PortA auf 0x03, Bit 0 und 1 "high", restliche "low": */
    PORTA = 0x03;
    ...
}
```

Schreiben von Bits

Einzelne Bits setzt man "Standard-C-konform" mittels logischer (Bit-) Operationen.

mit dem Ausdruck:

```
 x |= (1 << Bitnummer);  // wird ein Bit in x gesetzt
 x &= ~(1 << Bitnummer); // wird ein Bit in x geloescht
```

Das niederwertigste Bit (für 1) eines Bytes hat die Bitnummer 0, das "höchstwertige" (für 128) die Nummer 7.

Beispiel:

```
#include <avr/io.h>
...
#define MEINBIT 2
...
PORTA |= (1 << MEINBIT);    /* setzt Bit 2 an PortA auf 1 */
PORTA &= ~(1 << MEINBIT);   /* loescht Bit 2 an PortA */
```

Mit dieser Methode lassen sich auch mehrere Bits eines Registers gleichzeitig setzen und löschen.

Beispiel:

```
#include <avr/io.h>
...
DDRA &= ~( (1<<PA0) | (1<<PA3) );    /* PA0 und PA3 als Eingaenge */
PORTA |= (1<<PA0) | (1<<PA3);   /* Interne Pull-Up fuer beide einschalten */
```

In Quellcodes, die für ältere Version den des avr-gcc/der avr-libc entwickelt wurden, werden einzelne Bits mittels der Funktionen sbi und cbi gesetzt bzw. gelöscht. Beide Funktionen sind nicht mehr erforderlich.

Siehe auch:

- Bitmanipulation
- Dokumentation der avr-libc Abschnitt Modules/Special Function Registers

Warten auf einen bestimmten Zustand

Es gibt in der Bibliothek sogar Funktionen, die warten, bis ein bestimmter Zustand auf einem Bit erreicht ist. Es ist allerdings normalerweise eine eher unschöne Programmiertechnik, da in diesen Funktionen "blockierend gewartet" wird. D.h., der Programmablauf bleibt an dieser Stelle stehen, bis das maskierte Ereignis erfolgt ist. Setzt man den Watchdog ein, muss man darauf achten, dass dieser auch noch getriggert wird (zurücksetzen des Watchdogtimers).

Die Funktion **loop_until_bit_is_set** wartet in einer Schleife, bis das definierte Bit gesetzt ist. Wenn das Bit beim Aufruf der Funktion bereits gesetzt ist, wird die Funktion sofort wieder verlassen. Das niederwertigste Bit hat die Bitnummer 0.

```
#include <avr/io.h>
...

/* Warten bis Bit Nr. 2 (das dritte Bit) in Register PINA gesetzt (1) ist */

#define WARTEPIN PINA
#define WARTEBIT PA2

// mit der avr-libc Funktion:
loop_until_bit_is_set(WARTEPIN, WARTEBIT);

// dito in "C-Standard":
// Durchlaufe die (leere) Schleife solange das WARTEBIT in Register WARTEPIN
// _nicht_ ungleich 0 (also 0) ist.
while ( !(WARTEPIN & (1 << WARTEBIT)) ) ;
...
```

Die Funktion **loop_until_bit_is_clear** wartet in einer Schleife, bis das definierte Bit gelöscht ist. Wenn das Bit beim Aufruf der Funktion bereits gelöscht ist, wird die Funktion sofort wieder verlassen. Das niederwertigste Bit hat die Bitnummer 0.

```
#include <avr/io.h>
...

/* Warten bis Bit Nr. 4 (das fuenfte Bit) in Register PINB geloescht (0) ist */
#define WARTEPIN PINB
#define WARTEBIT PB4

// avr-libc-Funktion:
loop_until_bit_is_clear(WARTEPIN, WARTEBIT);
```

```
// dito in "C-Standard":
// Durchlaufe die (leere) Schleife solange das WARTEBIT in Register WARTEPIN
// gesetzt (1) ist
while ( WARTEPIN & (1<<WARTEBIT) ) ;
...
```

Universeller und auch auf andere Plattformen besser übertragbar ist die Verwendung von C-Standardoperationen.

siehe auch:

- Dokumentation der avr-libc Abschnitt Modules/Special Function Registers
- Bitmanipulation

Zugriff auf Ports

Alle Ports der AVR-Controller werden über Register gesteuert. Dazu sind jedem Port 3 Register zugeordnet:

DDRx	Datenrichtungsregister für Port**x**. **x** entspricht **A**, **B**, **C**, **D** usw. (abhängig von der Anzahl der Ports des verwendeten AVR). Bit im Register gesetzt (1) für Ausgang, Bit gelöscht (0) für Eingang.
PINx	Eingangsadresse für Port**x**. Zustand des Ports. Die Bits in PINx entsprechen dem Zustand der als Eingang definierten Portpins. Bit 1 wenn Pin "high", Bit 0 wenn Portpin low.
PORTx	Datenregister für Port**x**. Dieses Register wird verwendet, um die Ausgänge eines Ports anzusteuern. Bei Pins, die mittels DDRx auf Eingang geschaltet wurden, können über PORTx die internen Pull-Up Widerstände aktiviert oder deaktiviert werden (1 = aktiv).

Datenrichtung bestimmen

Zuerst muss die Datenrichtung der verwendeten Pins bestimmt werden. Um dies zu erreichen, wird das Datenrichtungsregister des entsprechenden Ports beschrieben.

Für jeden Pin, der als Ausgang verwendet werden soll, muss dabei das entsprechende Bit auf dem Port gesetzt werden. Soll der Pin als Eingang verwendet werden, muss das entsprechende Bit gelöscht sein.

Beispiel: Angenommen am Port B sollen die Pins 0 bis 4 als Ausgänge definiert werden, die noch verbleibenden Pins 5 bis 7 sollen als Eingänge fungieren. Dazu ist es daher notwendig, im für das Port B zuständigen Datenrichtungsregister DDRB folgende Bitkonfiguration einzutragen

```
+---+---+---+---+---+---+---+---+
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
+---+---+---+---+---+---+---+---+
  7   6   5   4   3   2   1   0
```

In C liest sich das dann so:

```
// in io.h wird u.a. DDRB definiert:
#include <avr/io.h>

...

// Setzen der Bits 0,1,2,3 und 4
// Binär 00011111 = Hexadezimal 1F
```

```
DDRB = 0x1F;    /* direkte Zuweisung - unübersichtlich */

/* mehr Tipparbeit aber übersichtlicher: */
DDRB = (1 << DDB0) | (1 << DDB1) | (1 << DDB2) | (1 << DDB3) | (1 << DDB4);

/* Einige Compiler erlauben die Eingabe von Konstanten im
   Binärformat, z.B. gcc in WinAVR, NICHT aber aus
   GNU-gcc-Quellen selbst erstellte Compiler. Diese Schreib-
   weise also nicht nutzen, wenn Code mit anderen
   ausgetauscht werden soll. */
DDRB = 0b00011111;    /* direkte Zuweisung
                         - übersichtlicher
                         - nicht standardkonform
                         - selten portabel
                         - nur bei modifiziertem GCC */

...
```

Die Pins 5 bis 7 werden (da 0) als Eingänge geschaltet.

Weitere Beispiele:

```
// Alle Pins des Ports B als Ausgang definieren:
DDRB = 0xff;
// Pin0 wieder auf Eingang und andere im ursprünglichen Zustand belassen:
DDRB &= ~( 1 << DDB0 );
// Pin 3 und 4 auf Eingang und andere im ursprünglichen Zustand belassen:
DDRB &= ~( ( 1 << DDB3 ) | ( 1<<DDB4) );
// Pin 0 und 3 wieder auf Ausgang und andere im ursprünglichen Zustand belassen:
DDRB |= ( 1 << DDB0) | ( 1 << DDB3 );
// Alle Pins auf Eingang:
DDRB = 0x00;
```

Vordefinierte Bitnummern für I/O-Register

Die Bitnummern (z.B. PCx, PINCx und DDCx für den Port C) sind in den io*.h-Dateien der avr-libc definiert und dienen lediglich der besseren Lesbarkeit. Man muss diese Definitionen nicht verwenden oder kann auch einfach "immer" PAx, PBx, PCx usw. nutzen, auch wenn der Zugriff auf Bits in DDRx- oder PINx-Registern erfolgt. Für den Compiler sind die Ausdrücke (1<<PC7), (1<<DDC7) und (1<<PINC7) identisch zu (1<<7) (genauer: der Präprozessor ersetzt die Ausdrücke (1<<PC7),... zu (1<<7)). Ein Ausschnitt der Definitionen für Port C eines ATmega32 aus der iom32.h-Datei zur Verdeutlichung (analog für die weiteren Ports):

```
...
/* PORTC */
#define PC7     7
#define PC6     6
#define PC5     5
#define PC4     4
#define PC3     3
#define PC2     2
#define PC1     1
#define PC0     0

/* DDRC */
#define DDC7    7
#define DDC6    6
#define DDC5    5
#define DDC4    4
#define DDC3    3
#define DDC2    2
#define DDC1    1
#define DDC0    0

/* PINC */
#define PINC7   7
#define PINC6   6
#define PINC5   5
#define PINC4   4
#define PINC3   3
#define PINC2   2
#define PINC1   1
#define PINC0   0
```

Digitale Signale

Am einfachsten ist es, digitale Signale mit dem Mikrocontroller zu erfassen bzw. auszugeben.

Ausgänge

Will man als Ausgang definierte Pins (entsprechende DDRx-Bits = 1) auf Logisch 1 setzen, setzt man die entsprechenden Bits im Portregister.

Mit dem Befehl

```
#include <avr/io.h>
...
    PORTB = 0x04; /* besser PORTB=(1<<PB2) */
```

wird also der Ausgang an Pin PB2 gesetzt (Beachte, dass die Bits immer *von 0 an* gezählt werden, das niederwertigste Bit ist also Bitnummer 0 und nicht etwa Bitnummer 1).

Man beachte, dass bei der Zuweisung mittels **=** immer alle Pins gleichzeitig angegeben werden. Man sollte also, wenn nur bestimmte Ausgänge geschaltet werden sollen, zuerst den aktuellen Wert des Ports einlesen und das Bit des gewünschten Ports in diesen Wert einfließen lassen. Will man also nur den dritten Pin (Bit Nr. 2) an Port B auf "high" setzen und den Status der anderen Ausgänge unverändert lassen, nutze man diese Form:

```
#include <avr/io.h>
...
    PORTB = PORTB | 0x04; /* besser: PORTB = PORTB | ( 1<<PB2 ) */
    /* vereinfacht durch Nutzung des |= Operators : */
    PORTB |= (1<<PB2);

    /* auch mehrere "gleichzeitig": */
    PORTB |= (1<<PB4) | (1<<PB5); /* Pins PB4 und PB5 "high" */
```

"Ausschalten", also Ausgänge auf "low" setzen, erfolgt analog:

```
#include <avr/io.h>
...
    PORTB &= ~(1<<PB2); /* löscht Bit 2 in PORTB und setzt damit Pin PB2 auf low */
    PORTB &= ~( (1<<PB4) | (1<<PB5) ); /* Pin PB4 und Pin PB5 "low" */
```

In Quellcodes, die für ältere Version den des avr-gcc/der avr-libc entwickelt wurden, werden einzelne Bits mittels der Funktionen sbi und cbi gesetzt bzw. gelöscht. Beide Funktionen sind in aktuellen Versionen der avr-libc nicht mehr enthalten und auch nicht mehr erforderlich.

Falls der Anfangszustand von Ausgängen kritisch ist, muss die Reihenfolge beachtet werden, mit der die Datenrichtung (DDRx) eingestellt und der Ausgabewert (PORTx) gesetzt wird.

Für Ausgangspins, die mit Anfangswert "high" initialisiert werden sollen:

- *zuerst die Bits im PORTx-Register setzen und*
- *anschließend die Datenrichtung auf Ausgang stellen.*

Daraus ergibt sich die Abfolge für einen Eingangspin:

- *setze PORTx: interner Pull-Up aktiv*
- *setze DDRx: Ausgang "high".*

Bei der Reihenfolge erst DDRx und dann PORTx, kann es zu einem kurzen "low-Puls" kommen, der auch externe Pull-Up-Widerstände "überstimmt". Die (ungünstige) Abfolge: Eingang -> setze DDRx: Ausgang (auf "low", da PORTx nach Reset 0) -> setze PORTx: Ausgang auf high. Vergleiche dazu auch das Datenblatt Abschnitt Configuring the Pin.

Eingänge (Wie kommen Signale in den µC)

Die digitalen Eingangssignale können auf verschiedene Arten zu unserer Logik gelangen.

Signalkopplung

Am einfachsten ist es, wenn die Signale direkt aus einer anderen digitalen Schaltung übernommen werden können. Hat der Ausgang der entsprechenden Schaltung TTL-Pegel dann können wir sogar direkt den Ausgang der Schaltung mit einem Eingangspin von unserem Controller verbinden.

Hat der Ausgang der anderen Schaltung keinen TTL-Pegel so müssen wir den Pegel über entsprechende Hardware (z.B. Optokoppler, Spannungsteiler, "Levelshifter" aka Pegelwandler) anpassen.

Die Masse der beiden Schaltungen muss selbstverständlich miteinander verbunden werden. Der Software selber ist es natürlich letztendlich egal, wie das Signal eingespeist wird. Wir können ja ohnehin lediglich prüfen, ob an einem Pin unseres Controllers eine logische 1 (Spannung größer ca. 0,7*Vcc) oder eine logische 0 (Spannung kleiner ca. 0,2*Vcc) anliegt. Detaillierte Informationen darüber, ab welcher Spannung ein Eingang als 0 ("low") bzw. 1 ("high") erkannt wird, liefert die Tabelle DC Characteristics im Datenblatt des genutzten Controllers.

Die Abfrage der Zustände der Portpins erfolgt direkt über den Registernamen.

Dabei ist wichtig, zur Abfrage der Eingänge **nicht** etwa Portregister **PORTx** zu verwenden, **sondern** Eingangsregister **PINx**. Die Abfrage der Pinzustände über PORTx statt PINx ist ein häufiger Fehler beim AVR-"Erstkontakt". (Ansonsten liest man nicht den Zustand der Eingänge, sondern den Status der internen Pull-Up-Widerstände.)

Will man also die aktuellen Signalzustände von Port D abfragen und in eine Variable namens bPortD abspeichern, schreibt man folgende Befehlszeilen:

```
#include <avr/io.h>
#include <stdint.h>
...
uint8_t bPortD;
...
bPortD = PIND;
...
```

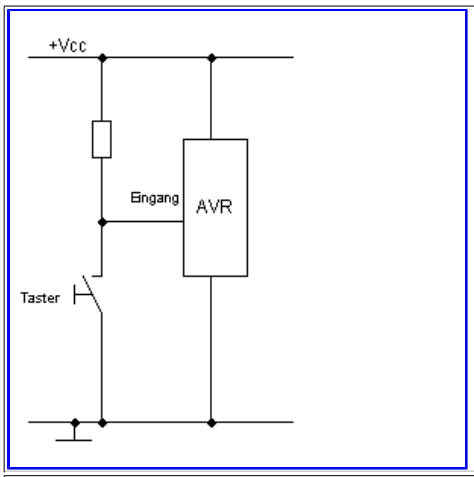
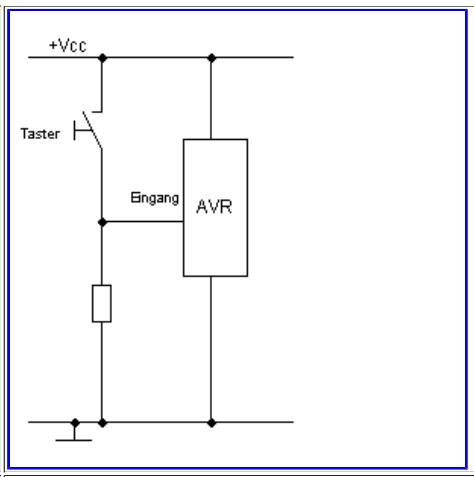
Mit den C-Bitoperationen kann man den Status der Bits abfragen.

```
#include <avr/io.h>
...
/* Fuehre Aktion aus, wenn Bit Nr. 1 (das "zweite" Bit) in PINC gesetzt (1) ist */
if ( PINC & (1<<PINC1) ) {
  /* Aktion */
}

/* Fuehre Aktion aus, wenn Bit Nr. 2 (das "dritte" Bit) in PINB geloescht (0) ist */
if ( !(PINB & (1<<PINB2)) ) {
  /* Aktion */
}
...
```

Tasten und Schalter

Der Anschluss mechanischer Kontakte an den Mikrocontroller gestaltet sich ebenfalls ganz einfach, wobei wir zwei unterschiedliche Methoden unterscheiden müssen (*Active Low* und *Active High*):

Active Low	**Active High**

	
Bei dieser Methode wird der Kontakt zwischen den Eingangspin des Controllers und Masse geschaltet. Damit bei offenem Schalter der Controller kein undefiniertes Signal bekommt wird zwischen die Versorgungsspannung und den Eingangspin ein sogenannter Pull-Up Widerstand geschaltet. Dieser dient dazu, den Pegel bei geöffnetem Schalter auf logisch 1 zu ziehen. Der Widerstandswert des Pull-Up Widerstands ist an sich nicht kritisch. Wird er allerdings zu hoch gewählt, ist die Wirkung eventuell nicht gegeben. Als üblicher Wert haben sich 10 kOhm eingebürgert. Die AVRs haben sogar an den meisten Pins softwaremäßig zuschaltbare interne Pull-Up Widerstände, welche wir natürlich auch verwenden können.	Hier wird der Kontakt zwischen die Versorgungsspannung und den Eingangspin geschaltet. Damit bei offener Schalterstellung kein undefiniertes Signal am Controller ansteht, wird zwischen den Eingangspin und die Masse ein Pull-Down Widerstand geschaltet. Dieser dient dazu, den Pegel bei geöffneter Schalterstellung auf logisch 0 zu halten.

Pull-Up Widerstände aktivieren

Die internen Pull-Up Widerstände von Vcc zu den einzelnen Portpins werden über das Register **PORTx** aktiviert bzw. deaktiviert, wenn ein Pin als **Eingang** geschaltet ist.

Wird der Wert des entsprechenden Portpins auf 1 gesetzt, so ist der Pull-Up Widerstand aktiviert. Bei einem Wert von 0 ist der Pull-Up Widerstand nicht aktiv. Man sollte jeweils entweder den internen oder einen externen Pull-Up Widerstand verwenden, aber nicht beide zusammen.

Im Beispiel werden alle Pins des Ports D als Eingänge geschaltet und alle Pull-Up Widerstände aktiviert. Weiterhin wird Pin PC7 als Eingang geschaltet und dessen interner Pull-Up Widerstand aktiviert, ohne die Einstellungen für die anderen Portpins (PC0-PC6) zu verändern.

```
#include <avr/io.h>
...
DDRD  = 0x00; /* alle Pins von Port D als Eingang */
PORTD = 0xff; /* interne Pull-Ups an allen Port-Pins aktivieren */
...
DDRC  &= ~(1<<DDC7);  /* Pin PC7 als Eingang */
PORTC |= (1<<PC7);    /* internen Pull-Up an PC7 aktivieren */
```

(Tasten-)Entprellung

Nun haben alle mechanischen Kontakte, sei es von Schaltern, Tastern oder auch von Relais, die unangenehme Eigenschaft zu prellen. Dies bedeutet, dass beim Schließen des Kontaktes derselbe nicht direkt Kontakt herstellt, sondern mehrfach ein- und ausschaltet bis zum endgültigen Herstellen des Kontaktes.

Soll nun mit einem schnellen Mikrocontroller gezählt werden, wie oft ein solcher Kontakt geschaltet wird, dann haben wir ein Problem, weil das Prellen als mehrfache Impulse gezählt wird. Diesem Phänomen muss beim Schreiben des Programms unbedingt Rechnung getragen werden.

```
#include <avr/io.h>
#include <inttypes.h>
#ifndef F_CPU
#define F_CPU 3686400UL     /* Quarz mit 3.6864 Mhz  */
#endif
#include <avr/delay.h>      /* definiert _delay_ms() ab avr-libc Version 1.2.0 */
#include <util/delay.h>     /* in der aktuellen Version in util/ */


/* Einfache Funktion zum Entprellen eines Tasters */
inline uint8_t debounce(volatile uint8_t *port, uint8_t pin)
{
    if ( ! (*port & (1 << pin)) )
    {
        /* Pin wurde auf Masse gezogen, 100ms warten   */
        _delay_ms(50);  // max. 262.1 ms / F_CPU in MHz
        _delay_ms(50);
        if ( *port & (1 << pin) )
        {
            /* Anwender Zeit zum Loslassen des Tasters geben */
            _delay_ms(50);
            _delay_ms(50);
            return 1;
        }
    }
    return 0;
}

int main(void)
{
    DDRB &= ~( 1 << PB0 );                  /* PIN PB0 auf Eingang (Taster)            */
    PORTB |= ( 1 << PB0 );                  /* Pullup-Widerstand aktivieren            */
    ...
    if (debounce(&PINB, PB0))              /* Falls Taster an PIN PB0 gedrueckt..    */
        PORTD = PIND ^ ( 1 << PD7 );  /* ..LED an Port PD7 an-
                                     bzw. ausschalten */
    ...
}
```

Bei diesem Beispiel ist zu beachten, dass der AVR im Falle eines Tastendrucks 200ms wartet, also brach liegt. Zeitkritische Anwendungen sollten ein anderes Verfahren wählen.

Zum Thema Entprellen siehe auch:

- Artikel Entprellung

Analog

Die Verarbeitung von analogen Eingangswerten und die Ausgabe von Analogwerten wird in Kapitel Analoge Ein- und Ausgabe behandelt.

16-Bit Portregister (ADC, ICR1, OCR1, TCNT1, UBRR)

Einige der Portregister in den AVR-Controllern sind 16 Bit breit. Im Datenblatt sind diese Register üblicherweise mit dem Suffix "L" (LSB) und "H" (MSB) versehen. Die avr-libc definiert zusätzlich die meisten dieser Variablen die Bezeichnung ohne "L" oder "H". Auf diese kann direkt zugewiesen bzw. zugegriffen werden. Die Konvertierung von 16-bit Wort nach 2*8-bit Byte erfolgt intern.

```
#include <avr/io.h>
#include <stdint.h>
...
uint16_t foo;

foo=ADC; /* setzt die Wort-Variable foo auf den Wert der letzten AD-Wandlung */
```

Falls benötigt, kann eine 16-Bit Variable auch recht einfach manuell in ihre zwei 8-Bit Bestandteile zerlegt werden.

Folgendes Beispiel demonstriert dies anhand des pseudo- 16-Bit Registers UBRR.

```
#include <avr/io.h>
#include <stdint.h>
#ifndef F_CPU
#define F_CPU 3686400
#endif
#define UART_BAUD_RATE 9600

typedef union {
        uint16_t i16;
        struct {
                uint8_t i8l;
                uint8_t i8h;
        };
} convert16to8;

...
convert16to8 baud;
baud.i16 = F_CPU / (UART_BAUD_RATE * 16L) -1;
UBRRH = baud.i8h;
UBRRL = baud.i8l;
...

/*alternativ:*/
#include <inttypes.h>

uint16_t wFoo16;
uint8_t bFooLow, bFooHigh;

...

wFoo16   = 0xAA55;                 /* zu "zerlegende" 16Bit-Integer */
bFooHigh = (uint8_t)(wFoo16 >> 8); /* MS-Byte */
bFooLow  = (uint8_t)(wFoo16);      /* LS-Byte */
...
```

Bei einigen AVR-Typen (z.B. ATmega8) teilen sich UBRRH und UCSRC die gleiche Memory-Adresse. Damit der AVR trotzdem zwischen den beiden Registern unterscheiden kann, bestimmt das Bit7 (URSEL) welches Register tatsächlich beschrieben werden soll. *1000 0011* (0x83) adressiert demnach UCSRC und übergibt den Wert *3* und *0000 0011* (0x3) adressiert UBRRH und übergibt ebenfalls den Wert *3*.

Bei einigen 16-bit Registern (insbesondere die der 16-bit Timer) erfolgen Schreibzugriffe über das sogenannte *temporary Register*. Die Reihenfolge der Zugriffe bestimmt, wann der Wert tatsächlich ins Register geschrieben wird. Typisch wird erst das High-Byte beschrieben (xxxH) und intern im temporary Register zwischengespeichert. Nachdem das Low-Byte (xxxL) geschrieben wurde, setzt der Controller mit diesem und dem im temporary Register zwischengespeicherten Wert für das High-Byte das 16-bit Register. Dabei ist zu beachten, dass intern nur ein temporary Register verfügbar ist, welches in Interruptroutinen mglw. mit einem anderen Wert überschrieben wird, wenn dort ebenfalls 16-bit Register beschrieben werden. avr-gcc/avr-libc berücksichtigen die korrekte Reihenfolge automatisch, wenn die Register mit ihrem "16-bit Label" (ohne H bzw. L) angesprochen werden, dabei ist der Schutz des temporary Registers vor Überschreiben durch Interruptroutinen dennoch zu beachten (im Zweifel beim Schreibzugriff die Interrupts kurzzeitig global deaktivieren).

Im Umgang mit 16-Bit Registern siehe auch:

- Dokumentation der avr-libc Abschnitt Related Pages/Frequently Asked Questions/Nr. 8
- Datenblatt Abschnitt *Accessing 16-bit Registers*

IO-Register als Parameter und Variablen

Um Register als Parameter für eigene Funktionen übergeben zu können, muss man sie als einen volatile uint8_t Pointer übergeben. Zum Beispiel:

```
uint8_t key_pressed(const volatile uint8_t *inputreg, uint8_t inputbit)
{
  static uint8_t last_state = 0;

  if ( last_state == ( *inputreg & (1<<inputbit) ) ) {
     return 0; /* keine Änderung */
  }
```

```
  /* Wenn doch, warten bis etwaiges Prellen vorbei ist: */
  _delay_ms(20);

  /* Zustand für nächsten Aufruf merken: */
  last_state = ( *inputreg & (1<<inputbit) );

  /* und den entprellten Tastendruck zurückgeben: */
  return ( *inputreg & (1<<inputbit) );
}

/* Beispiel für einen Funktionsaufruf: */

#include <avr/io.h>

uint8_t i;

//...
    i = key_pressed( &PINB, PB1 );
//...
```

Ein Aufruf der Funktion mit call by value würde Folgendes bewirken: Beim Funktionseintritt wird nur eine Kopie des momentanen Portzustandes angefertigt, die sich unabhängig vom tatsächlichen Zustand das Ports nicht mehr ändert, womit die Funktion wirkungslos wäre. Die Übergabe eines Zeigers wäre die Lösung, wenn der Compiler nicht optimieren würde. Denn dadurch wird im Programm nicht von der Hardware gelesen, sondern wieder nur von einem Abbild im Speicher. Das Ergebnis wäre das gleiche wie oben. Mit dem Schlüsselwort volatile sagt man nun dem Compiler, dass die entsprechende Variable entweder durch andere Softwareroutinen (Interrupts) oder durch die Hardware verändert werden kann.

Im Übrigen können mit volatile gekennzeichnete Variablen auch als const deklariert werden, um sicherzustellen, dass sie nur noch von der Hardware änderbar sind.

Der UART

Allgemeines zum UART

Über den UART kann ein AVR leicht mit einer RS-232-Schnittstelle eines PC oder sonstiger Geräte mit "serieller Schnittstelle" verbunden werden.

Mögliche Anwendungen des UART:

- Debug-Schnittstelle: z.B. zur Anzeige von Zwischenergebnissen ("printf-debugging" - hier besser "UART-debugging") auf einem PC. Auf dem Rechner reicht dazu eine Terminal-Software (MS-Windows: Hyperterm oder besser Bray-Terminal, HTerm; Unix/Linux z.B. minicom). Ein direkter Anschluss ist aufgrund unterschiedlicher Pegel nicht möglich, jedoch sind entsprechende Schnittstellen-ICs wie z.B. ein MAX232 günstig und leicht zu integrieren. Rechner ohne serielle Schnittstelle können über fertige USB-seriell-Adapter angeschlossen werden.
- "Mensch-Maschine Schnittstelle": z.B. Konfiguration und Statusabfrage über eine "Kommandozeile" oder Menüs
- Übertragen von gespeicherten Werten: z.B. bei einem Datenlogger
- Anschluss von Geräten mit serieller Schnittstelle (z.B. (Funk-)Modems, Mobiltelefone, Drucker, Sensoren, "intelligente" LC-Displays, GPS-Empfänger).
- "Feldbusse" auf RS485/RS422-Basis mittels entsprechenden Bustreiberbausteinen (z.B. MAX485)
- DMX, Midi etc.
- LIN-Bus (**L**ocal **I**nterconnect **N**etwork): Preiswerte Sensoren/Aktoren in der Automobiltechnik und darüber hinaus

Einige AVR-Controller haben ein bis zwei vollduplexfähigen UART (**U**niversal **A**synchronous **R**eceiver and **T**ransmitter) schon eingebaut ("Hardware-UART"). Übrigens: Vollduplex heißt nichts anderes, als dass der Baustein gleichzeitig senden und empfangen kann.

Neuere AVRs (ATmega, ATtiny) verfügen über einen oder zwei U**S**ART(s), dieser unterscheidet sich vom UART hauptsächlich durch interne FIFO-Puffer für Ein- und Ausgabe und erweiterte Konfigurationsmöglichkeiten. Die Puffergröße ist allerdings nur 1 Byte.

Der UART wird über vier separate Register angesprochen. USARTs der ATMEGAs verfügen über mehrere zusätzliche Konfigurationsregister. Das Datenblatt gibt darüber Auskunft. Die Folgende Tabelle gibt nur die Register für die (veralteten) UARTs wieder.

UCR

UART **C**ontrol **R**egister.

In diesem Register stellen wir ein, wie wir den UART verwenden möchten.
Das Register ist wie folgt aufgebaut:

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	**RXCIE**	**TXCIE**	**UDRIE**	**RXEN**	**TXEN**	**CHR9**	**RXB8**	**TXB8**
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R	W
Initialwert	0	0	0	0	0	0	1	0

RXCIE (**RX C**omplete **I**nterrupt **E**nable)

Wenn dieses Bit gesetzt ist, wird ein UART RX Complete Interrupt ausgelöst, wenn ein Zeichen vom UART empfangen wurde. Das Global Enable Interrupt Flag muss selbstverständlich auch gesetzt sein.

TXCIE (**TX C**omplete **I**nterrupt **E**nable)

Wenn dieses Bit gesetzt ist, wird ein UART TX Complete Interrupt ausgelöst, wenn ein Zeichen vom UART gesendet wurde. Das Global Enable Interrupt Flag muss selbstverständlich auch gesetzt sein.

UDRIE (**U**ART **D**ata **R**egister **E**mpty **I**nterrupt **E**nable)

Wenn dieses Bit gesetzt ist, wird ein UART Datenregister Leer Interrupt ausgelöst, wenn der UART wieder bereit ist um ein neues zu sendendes Zeichen zu übernehmen. Das Global Enable Interrupt Flag muss selbstverständlich auch gesetzt sein.

RXEN (**R**eceiver **E**nable)

Nur wenn dieses Bit gesetzt ist, arbeitet der Empfänger des UART überhaupt. Wenn das Bit nicht gesetzt ist, kann der entsprechende Pin des AVR als normaler I/O-Pin verwendet werden.

TXEN (**T**ransmitter **E**nable)

Nur wenn dieses Bit gesetzt ist, arbeitet der Sender des UART überhaupt. Wenn das Bit nicht gesetzt ist, kann der entsprechende Pin des AVR als normaler I/O-Pin verwendet werden.

CHR9 (9 Bit Characters)

Wenn dieses Bit gesetzt ist, können 9 Bit lange Zeichen übertragen und empfangen werden. Das 9. Bit kann bei Bedarf als zusätzliches Stopbit oder als Paritätsbit verwendet werden. Man spricht dann von einem 11-Bit Zeichenrahmen:
1 Startbit + 8 Datenbits + 1 Stopbit + 1 Paritätsbit = 11 Bits

RXB8 (Receive Data Bit 8)

Wenn das vorher erwähnte CHR9-Bit gesetzt ist, dann enthält dieses Bit das 9. Datenbit eines empfangenen Zeichens.

TXB8 (Transmit Data Bit 8)

Wenn das vorher erwähnte CHR9-Bit gesetzt ist, dann muss in dieses Bit das 9. Bit des zu sendenden Zeichens eingeschrieben werden bevor das eigentliche Datenbyte in das Datenregister geschrieben wird.

USR

UART **S**tatus **R**egister.

Hier teilt uns der UART mit, was er gerade so macht.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	**RXC**	**TXC**	**UDRE**	**FE**	**OR**	**-**	**-**	**-**
R/W	R	R/W	R	R	R	R	R	R
Initialwert	0	0	1	0	0	0	0	0

RXC (UART Receive Complete)

Dieses Bit wird vom AVR gesetzt, wenn ein empfangenes Zeichen vom Empfangs-Schieberegister in das Empfangs-Datenregister transferiert wurde.
Das Zeichen muss nun schnellstmöglich aus dem Datenregister ausgelesen werden. Falls dies nicht erfolgt bevor ein weiteres Zeichen komplett empfangen wurde wird eine Überlauf-Fehlersituation eintreffen. Mit dem Auslesen des Datenregisters wird das Bit automatisch gelöscht.

TXC (UART Transmit Complete)

Dieses Bit wird vom AVR gesetzt, wenn das im Sende-Schieberegister befindliche Zeichen vollständig ausgegeben wurde und kein weiteres Zeichen im Sendedatenregister ansteht. Dies bedeutet also, wenn die Kommunikation vollumfänglich abgeschlossen ist.
Dieses Bit ist wichtig bei Halbduplex-Verbindungen, wenn das Programm nach dem Senden von Daten auf Empfang schalten muss. Im Vollduplexbetrieb brauchen wir dieses Bit nicht zu beachten.
Das Bit wird nur dann automatisch gelöscht, wenn der entsprechende Interrupthandler aufgerufen wird, ansonsten müssen wir das Bit selber löschen.

UDRE (**U**ART **D**ata **R**egister **E**mpty)

Dieses Bit zeigt an, ob der Sendepuffer bereit ist, um ein zu sendendes Zeichen aufzunehmen. Das Bit wird vom AVR gesetzt (1), wenn der Sendepuffer leer ist. Es wird gelöscht (0), wenn ein Zeichen im Sendedatenregister vorhanden ist und noch nicht in das Sendeschieberegister übernommen wurde.
Atmel empfiehlt aus Kompatibilitätsgründen mit kommenden µC, UDRE auf 0 zu setzen, wenn das UCSRA Register beschrieben wird.
Das Bit wird automatisch gelöscht, wenn ein Zeichen in das Sendedatenregister geschrieben wird.

FE (**F**raming **E**rror)

Dieses Bit wird vom AVR gesetzt, wenn der UART einen Zeichenrahmenfehler detektiert, d.h. wenn das Stopbit eines empfangenen Zeichens 0 ist.
Das Bit wird automatisch gelöscht, wenn das Stopbit des empfangenen Zeichens 1 ist.

OR (**O**ver**R**un)

Dieses Bit wird vom AVR gesetzt, wenn unser Programm das im Empfangsdatenregister bereit liegende Zeichen nicht abholt bevor das nachfolgende Zeichen komplett empfangen wurde.
Das nachfolgende Zeichen wird verworfen.
Das Bit wird automatisch gelöscht, wenn das empfangene Zeichen in das Empfangsdatenregister transferiert werden konnte.

UDR

UART **D**ata **R**egister.

Hier werden Daten zwischen UART und CPU übertragen. Da der UART im Vollduplexbetrieb gleichzeitig empfangen und senden kann, handelt es sich hier physikalisch um 2 Register, die aber über die gleiche I/O-Adresse angesprochen werden. Je nachdem, ob ein Lese- oder ein Schreibzugriff auf den UART erfolgt wird automatisch das richtige UDR angesprochen.

UBRR

UART **B**aud **R**ate **R**egister.

In diesem Register müssen wir dem UART mitteilen, wie schnell wir gerne kommunizieren möchten. Der Wert, der in dieses Register geschrieben werden muss, errechnet sich nach folgender Formel:

$$\mathrm{UBRR} = \frac{\text{Taktfrequenz}}{\text{Baudrate} \cdot 16} - 1$$

	Es sind Baudraten bis zu 115200 Baud und höher möglich.

Die Hardware

Der UART basiert auf normalem TTL-Pegel mit 0V (LOW) und 5V (HIGH). Die Schnittstellenspezifikation für RS-232 definiert jedoch -3V ... -12V (LOW) und +3 ... +12V (HIGH). Zudem muss der Signalaustausch zwischen AVR und Partnergerät invertiert werden. Für die Anpassung der Pegel und das Invertieren der Signale gibt es fertige Schnittstellenbausteine. Der bekannteste davon ist wohl der MAX232.

Streikt die Kommunikation per UART, so ist oft eine fehlerhafte Einstellung der Baudrate die Ursache. Die Konfiguration auf eine bestimmte Baudrate ist abhängig von der Taktfrequenz des Controllers. Gerade bei neu aufgebauten Schaltungen (bzw. neu gekauften Controllern) sollte man sich daher noch einmal vergewissern, dass der Controller auch tatsächlich mit der vermuteten Taktrate arbeitet und nicht z.B. den bei einigen Modellen werksseitig eingestellten internen Oszillator statt eines externen Quarzes nutzt. Die Werte der verschiedenen fuse-bits im Fehlerfall also beispielsweise mit *AVRDUDE* kontrollieren und falls nötig anpassen. Grundsätzlich empfiehlt sich auch immer ein Blick in die AVR_Checkliste.

UART initialisieren

Wir wollen nun Daten mit dem UART auf die serielle Schnittstelle ausgeben. Dazu müssen wir den UART zuerst mal initialisieren. Dazu setzen wir je nach gewünschter Funktionsweise die benötigten Bits im **U**ART **C**ontrol **R**egister.

Da wir vorerst nur senden möchten und noch keine Interrupts auswerten wollen, gestaltet sich die Initialisierung wirklich sehr einfach, da wir lediglich das **Transmitter Enable** Bit setzen müssen:

```
UCR |= (1<<TXEN);
```

Neuere AVRs mit USART haben mehrere Konfigurationsregister und erfordern eine etwas andere Konfiguration. Für einen ATmega16 z.B.:

```
UCSRB |= (1<<TXEN);                 // UART TX einschalten
UCSRC |= (1<<URSEL)|(3<<UCSZ0);     // Asynchron 8N1
```

Nun ist noch das Baudratenregister **UBRR** einzustellen. Bei neueren AVRs besteht es aus zwei Registern **UBRRL** und **UBRRH**. Der Wert dafür ergibt sich aus der angegebenen Formel durch Einsetzen der Taktfrequenz und der gewünschten Übertragungsrate. Das Berechnen der Formel wird dem Präprozessor überlassen.

```
/* UART-Init beim AT90S2313 */

#ifndef F_CPU
/* In neueren Version der WinAVR/Mfile Makefile-Vorlage kann
   F_CPU im Makefile definiert werden, eine nochmalige Definition
   hier wuerde zu einer Compilerwarnung fuehren. Daher "Schutz" durch
   #ifndef/#endif

   Dieser "Schutz" kann zu Debugsessions führen, wenn AVRStudio
   verwendet wird und dort eine andere, nicht zur Hardware passende
   Taktrate eingestellt ist: Dann wird die folgende Definition
   nicht verwendet, sondern stattdessen der Defaultwert (8 MHz?)
   von AVRStudio */

  #define F_CPU 4000000L    // Systemtakt in Hz, das L am Ende ist wichtig, NICHT UL verwenden!
#endif

#define BAUD 9600L          // Baudrate, das L am Ende ist wichtig, NICHT UL verwenden!

// Berechnungen
#define UBRR_VAL ((F_CPU+BAUD*8)/(BAUD*16)-1)   // clever runden
#define BAUD_REAL (F_CPU/(16*(UBRR_VAL+1)))     // Reale Baudrate
#define BAUD_ERROR ((BAUD_REAL*1000)/BAUD-1000) // Fehler in Promille

#if ((BAUD_ERROR>10) || (BAUD_ERROR<-10))
  #error Systematischer Fehler der Baudrate grösser 1% und damit zu hoch!
#endif
```

```
int main(void)
{
    UCR |= (1<<TXEN);
    UBRR = UBRR_VAL;
    //...
}
```

Wieder für den Mega16 mit zwei Registern für die Baudrateneinstellung eine etwas andere Programmierung. Wichtig ist, dass UBRRH **vor** UBRRL geschrieben wird.

```
  /* USART-Init beim ATmega16 */

int main(void)
{
    UCSRB |= (1<<TXEN);                // UART TX einschalten
    UCSRC |= (1<<URSEL)|(3<<UCSZ0);    // Asynchron 8N1

    UBRRH = UBRR_VAL >> 8;
    UBRRL = UBRR_VAL & 0xFF;
}
```

Für einige AVR (z.B. ATmega169, ATmega48/88/168, AT90CAN jedoch nicht für z.B. ATmega16/32, ATmega128, ATtiny2313) wird durch die Registerdefinitionen der avr-libc (io*.h) auch für Controller mit zwei UBRR-Registern (UBRRL/UBRRH) ein UBRR bzw. UBRR0 als "16-bit-Register" definiert und man kann auch Werte direkt per UBRR = UBRR_VAL zuweisen. Intern werden dann zwei Zuweisungen für UBRRH und UBRRL generiert. Dies ist nicht bei allen Controllern möglich, da die beiden Register nicht bei allen aufeinanderfolgende Addressen aufweisen. Die getrennte Zuweisung an UBRRH und UBRRL wie im Beispiel gezeigt ist universeller und portabler und daher vorzuziehen.

Die Makros sind sehr praktisch, da sie sowohl automatisch den Wert für UBRR als auch den Fehler in der generierten Baudrate berechnen und im Falle einer Überschreitung (+/-1%) einen Fehler und somit Abbruch im Compilerablauf generieren. Damit können viele Probleme mit "UART sendet komische Zeichen" vermieden werden. Ausserdem kann man mühelos die Einstellung an eine neue Taktfrequenz bzw. Baudrate anpassen, ohne selber rechnen oder in Tabellen nachschlagen zu müssen.

Senden mit dem UART

Senden einzelner Zeichen

Um nun ein Zeichen auf die Schnittstelle auszugeben, müssen wir dasselbe lediglich in das **U**ART **D**ata **R**egister schreiben. Vorher ist zu prüfen, ob das UART-Modul bereit ist, das zu sendende Zeichen entgegenzunehmen. Die Bezeichnungen des/der Statusregisters mit dem Bit UDRE ist abhängig vom Controllertypen (vgl. Datenblatt).

```
    // bei AVR mit einem UART ("classic AVR" z.B. AT90S8515)
    while (!(USR & (1<<UDRE)))  /* warten bis Senden moeglich                  */
    {
    }

    UDR = 'x';                  /* schreibt das Zeichen x auf die Schnittstelle */

    /** ODER **/

    // bei neueren AVRs steht der Status in UCSRA/UCSR0A/UCSR1A, hier z.B. fuer ATmega16:
    while (!(UCSRA & (1<<UDRE)))  /* warten bis Senden moeglich                   */
    {
    }

    UDR = 'x';                    /* schreibt das Zeichen x auf die Schnittstelle */
```

Schreiben einer Zeichenkette (String)

Die Aufgabe "String senden" wird durch zwei Funktionen abgearbeitet. Die universelle/controllerunabhängige Funktion uart_puts übergibt jeweils ein Zeichen der Zeichenkette an eine Funktion uart_putc, die abhängig von der vorhandenen Hardware implementiert werden muss. In der Funktion zum Senden eines Zeichens ist darauf zu achten, dass vor dem Senden geprüft wird, ob der UART bereit ist den "Sendeauftrag" entgegenzunehmen.

```
// putc fuer AVR mit einem UART (z.B. AT90S8515)
int uart_putc(unsigned char c)
{
    while(!(USR & (1 << UDRE)))  /* warte, bis UDR bereit */
    {
    }

    UDR = c;                     /* sende Zeichen */
    return 0;
}

/** ODER **/

// bei neueren AVRs andere Bezeichnung fuer die Statusregister, hier ATmega16:
int uart_putc(unsigned char c)
{
    while (!(UCSRA & (1<<UDRE)))  /* warten bis Senden moeglich */
    {
    }

    UDR = c;                      /* sende Zeichen */
    return 0;
}


/* puts ist unabhaengig vom Controllertyp */
void uart_puts (char *s)
{
    while (*s)
    {   /* so lange *s != '\0' also ungleich dem "String-Endezeichen" */
        uart_putc(*s);
        s++;
    }
}
```

Warteschleifen sind insofern etwas kritisch, da während des Sendens eines Strings nicht mehr auf andere Ereignisse reagieren werden kann. Universeller ist die Nutzung von FIFO(first-in first-out)-Puffern, in denen die zu sendenden bzw. empfangenen Zeichen/Bytes zwischengespeichert und mittels Interruptroutinen an den U(S)ART weitergegeben bzw. ausgelesen werden. Dazu existieren fertige Komponenten (Bibliotheken, Libraries), die man recht einfach in eigene Entwicklungen integrieren kann. Es empfiehlt sich, diese Komponenten zu nutzen und das Rad nicht neu zu erfinden.

Schreiben von Variableninhalten

Sollen Inhalte von Variablen (Ganzzahlen, Fließkomma) in "menschenlesbarer" Form gesendet werden, ist vor dem Transfer eine Umwandlung in Zeichen ("ASCII") erforderlich. Bei nur einer Ziffer ist diese Umwandlung relativ einfach: man addiert den ASCII-Wert von Null zur Ziffer und kann diesen Wert direkt senden.

```
//...

// hier uart_putc (s.o.)

// Ausgabe von 0123456789
char c;

for (uint8_t i=0; i<=9; ++i) {
    c = i + '0';
    uart_putc( c );
    // verkuerzt: uart_putc( i + '0' );
}
```

Soll mehr als eine Ziffer ausgegeben werden, bedient man sich zweckmäßigerweise vorhandener Funktionen zur Umwandlung von Zahlen in Zeichenketten/Strings. Die Funktion der avr-libc zur Umwandlung von vorzeichenbehafteten 16bit-Ganzzahlen (int16_t) in Zeichenketten heißt *itoa* (Integer to ASCII). Man muss der Funktion einen Speicherbereich zur Verarbeitung (buffer) mit Platz für alle Ziffern, das String-Endezeichen ('\0') und evtl. das Vorzeichen bereitstellen.

```
#include <stdlib.h>

//...

// hier uart_init, uart_putc, uart_puts (s.o.)
```

```
int main(void)
{
   char s[7];
   int16_t i = -12345;

   uart_init();

   itoa( i, s, 10 ); // 10 fuer radix -> Dezimalsystem
   uart_puts( s );

   // da itoa einen Zeiger auf den Beginn von s zurueckgibt verkuerzt auch:
   uart_puts( itoa( i, s, 10 ) );

   while (1) {
      ;
   }

   return 0; // never reached
}
```

Für vorzeichenlose 16bit-Ganzzahlen (uint16_t) exisitert *utoa*. Die Funktionen für 32bit-Ganzzahlen (int32_t und uint32_t) heißen *ltoa* bzw. *ultoa*. Da 32bit-Ganzzahlen mehr Stellen aufweisen können, ist ein entsprechend größerer Pufferspeicher vorzusehen.

Auch Fließkommazahlen (float/double) können mit breits vorhandenen Funktionen in Zeichenfolgen umgewandelt werden, dazu existieren die Funktionen *dtostre* und *dtostrf*. dtostre nutzt Exponentialschreibweise ("engineering"-Format). (Hinweis: z.Zt. existiert im avr-gcc kein "echtes" double, intern wird immer mit "einfacher Genauigkeit", entsprechend float, gerechnet.)

dtostrf und dtostre benötigen die libm.a der avr-libc. Bei Nutzung von Makefiles ist der Parameter -lm in in LDFLAGS anzugeben (Standard in den WinAVR/mfile-Makefilevorlagen). Nutzt man AVRStudio als IDE für den GNU-Compiler (gcc-Plugin) ist die libm.a unter Libaries auszuwählen: Project -> Configurations Options -> Libaries -> libm.a mit dem Pfeil nach rechts einbinden. Siehe auch die FAQ

```
#include <stdlib.h>

//...

// hier uart_init, uart_putc, uart_puts (s.o.)

/* lt. avr-libc Dokumentation:
char* dtostrf(
  double __val,
  char   __width,
  char   __prec,
  char * __s
)
*/

int main(void)
{
   // Pufferspeicher ausreichend groß
   // evtl. Vorzeichen + width + Endezeichen:
   char s[8];
   float f = -12.345;

   uart_init();

   dtostrf( f, 6, 3, s );
   uart_puts( s );

   // verkürzt: uart_puts( dtostrf( f, 7, 3, s ) );

   while (1) {
      ;
   }

   return 0; // never reached
}
```

Zeichen Empfangen

Zum Empfang von Zeichen muss der Empfangsteil des UART bei der Initialisierung aktiviert werden, indem das RXEN-Bit im jeweiligen Konfigurationsregister (UCSRB bzw UCSR0B/UCSR1B) gesetzt wird. Im einfachsten Fall wird solange gewartet, bis ein Zeichen empfangen wurde, dieses steht dann im UART-Datenregister (UDR bzw. UDR0 und UDR1 bei AVRs mit 2 UARTS) zur Verfügung (sogen. "Polling-Betrieb"). Ein Beispiel für den ATmega16:

```
#include <inttypes.h>
#include <avr/io.h>

/* Zusaetzlich zur Baudrateneinstellung und der weiteren Initialisierung: */
void Usart_EnableRX()
{
    UCSRB |= ( 1 << RXEN );
}

/* Zeichen empfangen */
uint8_t Usart_Rx(void)
{
    while (!(UCSRA & (1<<RXC)))   // warten bis Zeichen verfuegbar
        ;
    return UDR;                   // Zeichen aus UDR an Aufrufer zurueckgeben
}
```

Diese Funktion blockiert den Programmablauf. Alternativ kann das RXC-Bit in einer Programmschleife abgefragt werden und dann nur bei gesetztem RXC-Bit UDR ausgelesen werden. Eleganter und in den meisten Anwendungsfällen "stabiler" ist die Vorgehensweise, die empfangenen Zeichen in einer Interrupt-Routine einzulesen und zur späteren Verarbeitung in einem Eingangsbuffer (FIFO-Buffer) zwischenzuspeichern. Dazu existieren fertige und gut getestete Bibliotheken und Quellcodekomponenten (z.B. UART-Library von P. Fleury, procyon-avrlib und einige in der "Academy" von avrfreaks.net).

siehe auch:

- Dokumenation der avr-libc/stdlib.h
- Die Nutzung von printf
- Peter Fleurys UART-Bibiliothek fuer avr-gcc/avr-libc

TODO: 9bit

Software-UART

Falls die Zahl der vorhandenen Hardware-UARTs nicht ausreicht, können weitere Schnittstellen über sogennante Software-UARTs ergänzt werden. Es gibt dazu (mindestens) zwei Ansätze:

- Der bei AVRs üblichste Ansatz basiert auf dem Prinzip, dass ein externer Interrupt-Pin für den Empfang ("RX") genutzt wird. Das Startbit löst den Interrupt aus, in der Interrupt-Routine (ISR) wird der externe Interrupt deaktiviert und ein Timer aktiviert. In der Interrupt-Routine des Timers wird der Zustand des Empfangs-Pins entsprechend der Baudrate abgetastet. Nach Empfang des Stop-Bits wird der externe Interrupt wieder aktiviert. Senden kann über einen beliebigen Pin ("TX") erfolgen, der entsprechend der Baudrate und dem zu sendenden Zeichen auf 0 oder 1 gesetzt wird. Die Implementierung ist nicht ganz einfach, es existieren dazu aber fertige Bibliotheken (z.B. bei avrfreaks oder in der Procyon avrlib).
- Ein weiterer Ansatz erfordert keinen Pin mit "Interrupt-Funktion" aber benötigt mehr Rechenzeit. Jeder Input-Pin kann als Empfangspin (RX) dienen. Über einen Timer wird der Zustand des RX-Pins mit einem vielfachen der Baudrate abgetastet (dreifach scheint üblich) und High- bzw. Lowbits anhand einer Mindestanzahl identifiziert. (Beispiel: "Generic Software Uart" Application-Note von IAR)

Neuere AVRs (z.B. ATtiny26 oder ATmega48,88,168,169) verfügen über ein Universal Serial Interface (USI), das teilweise UART-Funktion übernehmen kann. Atmel stellt eine Application-Note bereit, in der die Nutzung des USI als UART erläutert wird (im Prinzip "Hardware-unterstützter Software-UART").

Handshaking

Wenn der Sender ständig sendet, wird irgendwann der Fall eintreten, daß der Empfänger nicht bereit ist, neue Zeichen zu empfangen. In diesem Fall muß durch ein **Handshake-Verfahren** die Situation bereinigt werden. Handshake

bedeutet nichts anderes, als daß der Empfänger dem Sender mitteilt, daß er zur Zeit keine Daten annehmen kann und der Sender die Übertragung der nächsten Zeichen solange einstellen soll, bis der Empfänger signalisiert, daß er wieder Zeichen aufnehmen kann.

Hardwarehandshake (RTS/CTS)

Beim Hardwarehandshake werden zusätzlich zu den beiden Daten-Übertragungsleitungen noch 2 weitere Leitungen benötigt: **RTS** (**R**equest **T**o **S**end) und **CTS** (**C**lear **T**o **S**end). Jeder der beiden Kommunikationspartner ist verpflichtet, bevor ein Zeichen gesendet wird, den Zustand der **RTS** Leitung zu überprüfen. Nur wenn die Gegenstelle darauf Empfangsbereitschaft signalisiert, darf das Zeichen gesendet werden. Um der Gegenstelle zu signalisieren, daß sie zur Zeit keine Zeichen schicken soll, wird die Leitung **CTS** benutzt.

Softwarehandshake (XON/XOFF)

Beim Softwarehandshake sind keine speziellen Leitungen notwendig. Statt dessen werden besondere ASSCII-Zeichen benutzt, die der Gegenstelle signalisieren, daß Senden einzustellen bzw. wieder aufzunehmen.

- **XOFF** Aufforderung das Senden einzustellen
- **XON** Gegenstelle darf wieder senden

Nachteilig bei einem Softwarehandshake ist es, daß dadurch keine direkte binäre Datenübertragung mehr möglich ist. Von den möglichen 256 Bytewerten werden ja 2 (nämlich **XON** und **XOFF**) für besondere Zwecke benutzt und fallen daher aus.

Analoge Ein- und Ausgabe

Analoge Eingangswerte werden in der Regel über den AVR Analog-Digital-Converter (AD-Wandler, ADC) eingelesen, der in vielen Typen verfügbar ist (typisch 10bit Auflösung). Durch diesen werden analogen Signale (Spannungen) in digitale Zahlenwerte gewandelt. Bei AVRs, die über keinen internen AD-Wandler verfügen (z.B. ATmega162, ATtiny2313), kann durch externe Beschaltung (R/C-Netzwerk und "Zeitmessung") die Funktion des AD-Wandlers "emuliert" werden.

Es existieren keine AVRs mit eingebautem Digital-Analog-Konverter (DAC). Diese Funktion muss durch externe Komponenten nachgebildet werden (z.B. PWM und "Glättung").

Unabhängig davon besteht natürlich immer die Möglichkeit, spezielle Bausteine zur Analog-Digital- bzw. Digital-Analog-Wandlung zu nutzen und diese über eine digitale Schnittstelle (z.b. SPI oder I2C) mit einem AVR anzusteuern.

ADC (Analog Digital Converter)

Der Analog-Digital-Konverter (ADC) wandelt analoge Signale in digitale Werte um, welche vom Controller interpretiert werden können. Einige AVR-Typen haben bereits einen mehrkanaligen Analog-Digital-Konverter eingebaut. Die Genauigkeit, mit welcher ein analoges Signal aufgelöst werden kann, wird durch die Auflösung des ADC in Anzahl Bits angegeben, man hört bzw. liest jeweils von 8-Bit-ADC oder 10-Bit-ADC oder noch höher.

Ein ADC mit 8 Bit Auflösung kann somit das analoge Signal mit einer Genauigkeit von 1/256 des Maximalwertes darstellen. Wenn wir nun mal annehmen, wir hätten eine Spannung zwischen 0 und 5 Volt und eine Auflösung von 3 Bit, dann könnten die Werte 0V, 0.625V, 1.25, 1.875V, 2.5V, 3.125V, 3.75, 4.375, 5V daherkommen, siehe dazu folgende Tabelle:

Eingangsspannung am ADC	Entsprechender Messwert
0...<0.625V	0
0.625...<1.25V	1
1.25...<1.875V	2
1.875...<2.5V	3

2.5...<3.125V	4
3.125...<3.75V	5
3.75...<4.375V	6
4.375...5V	7

Die Angaben sind natürlich nur ungefähr. Je höher nun die Auflösung des Analog-Digital-Konverters ist, also je mehr Bits er hat, um so genauer kann der Wert erfasst werden.

Der interne ADC im AVR

Wenn es einmal etwas genauer sein soll, dann müssen wir auf einen AVR mit eingebautem Analog-Digital-Wandler (ADC) zurückgreifen, die über mehrere Kanäle verfügen. Kanäle heißt in diesem Zusammenhang, dass zwar bis zu zehn analoge Eingänge am AVR verfügbar sind, aber nur ein "echter" Analog-Digital-Wandler zur Verfügung steht, vor der eigentlichen Messung ist also einzustellen, welcher Kanal ("Pin") mit dem Wandler verbunden und gemessen wird.

Die Umwandlung innerhalb des AVR basiert auf der schrittweisen Näherung. Beim AVR müssen die Pins **AGND** und **AVCC** beschaltet werden. Für genaue Messungen sollte AVCC über ein L-C Netzwerk mit VCC verbunden werden, um Spannungsspitzen und -einbrüche vom Analog-Digital-Wandler fernzuhalten. Im Datenblatt findet sich dazu eine Schaltung, die 10uH und 100nF vorsieht.

Das Ergebnis der Analog-Digital-Wandlung wird auf eine Referenzspannung bezogen. Aktuelle AVRs bieten drei Möglichkeiten zur Wahl dieser Spannung:

- Eine externe Referenzspannung von maximal **Vcc** am Anschlusspin **AREF**. Die minimale (externe) Referenzspannung darf jedoch nicht beliebig niedrig sein, vgl. dazu das (aktuellste) Datenblatt des verwendeten Controllers.
- Verfügt der AVR über eine interne Referenzspannung, kann diese genutzt werden. Alle aktuellen AVRs mit internem AD-Wandler sollten damit ausgestattet sein (vgl. Datenblatt: 2,56V oder 1,1V je nach Typ). Das Datenblatt gibt auch über die Genauigkeit dieser Spannung Auskunft.
- Die **interne** Referenzspannung wird auf **Vcc** bezogen, eine externe Referenzspannung auf **GND (Masse)**. Davon unabhängig werden digitalisierte Spannungen **immer** auf GND bezogen. Beim ATMEGA8 z.B. ist der Pin AREF über 32kOhm mit GND verbunden, d.h. man muss diese doch extrem niedrige Eingangsimpedanz mit in die Berechnung für einen Spannungsteiler einbeziehen, bzw. kann diesen Widerstand als R2 gleich mit benutzen. Formel für Spannungsteiler: Udiv = U / ((R1 + R2) / R2)

Bei Nutzung von Vcc oder der internen Referenz wird empfohlen, einen Kondensator zwischen dem AREF-Pin und GND anzuordnen. Die Festlegung, welche Spannungsreferenz genutzt wird, erfolgt z.B. beim ATmega16 mit den Bits REFS1/REFS0 im ADMUX-Register. Die zu messende Spannung muss im Bereich zwischen **AGND** und **AREF** (egal ob intern oder extern) liegen.

Der **ADC** kann in zwei verschiedenen Betriebsarten verwendet werden:

Einfache Wandlung (Single Conversion)
: In dieser Betriebsart wird der Wandler bei Bedarf vom Programm angestoßen für jeweils eine Messung.

Frei laufend (Free Running)
: In dieser Betriebsart erfasst der Wandler permanent die anliegende Spannung und schreibt diese in das **ADC Data Register**.

Die Register des ADC

Der **ADC** verfügt über eigene Register. Im Folgenden die Registerbeschreibung eines ATMega16, welcher über 8 ADC-Kanäle verfügt. Die Register unterscheiden sich jedoch nicht erheblich von denen anderer AVRs (vgl. Datenblatt).

ADCSRA	**ADC** Control and **S**tatus **R**egister A.

In diesem Register stellen wir ein, wie wir den **ADC** verwenden möchten.
Das Register ist wie folgt aufgebaut:

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	**ADEN**	**ADSC**	**ADATE**	**ADIF**	**ADIE**	**ADPS2**	**ADPS1**	**ADPS0**
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0

ADEN (**AD**C **En**able)

Dieses Bit muss gesetzt werden, um den **ADC** überhaupt zu aktivieren. Wenn das Bit nicht gesetzt ist, können die Pins wie normale I/O-Pins verwendet werden.

ADSC (**AD**C **S**tart **C**onversion)

Mit diesem Bit wird ein Messvorgang gestartet. In der frei laufenden Betriebsart muss das Bit gesetzt werden, um die kontinuierliche Messung zu aktivieren.
Wenn das Bit nach dem Setzen des **ADEN**-Bits zum ersten Mal gesetzt wird, führt der Controller zuerst eine zusätzliche Wandlung und erst dann die eigentliche Wandlung aus. Diese zusätzliche Wandlung wird zu Initialisierungszwecken durchgeführt.
Das Bit bleibt nun so lange auf 1, bis die Umwandlung abgeschlossen ist, im Initialisierungsfall entsprechend bis die zweite Umwandlung erfolgt ist und geht danach auf 0.

ADATE (**AD**C **A**uto **T**rigger **E**nable)

Mit diesem Bit wird die Betriebsart eingestellt.
Eine logische 1 aktiviert den ADC bei einem im SFIOR Register eingestelltem Auslöser(Trigger).
Sind keine Bits im SFIOR Register geschrieben, arbeitet der ADC im frei laufenden Modus. Der **ADC** misst nun ständig den ausgewählten Kanal und schreibt den gemessenen Wert in das **ADC Data Register**.

ADIF (**AD**C **I**nterrupt **F**lag)

Dieses Bit wird vom **ADC** gesetzt, sobald eine Umwandlung erfolgt ist und das **ADC Data Register** aktualisiert wurde. Das Bit wird bei lesendem Zugriff auf **ADC(L,H)** automatisch (d.h. durch die Hardware) gelöscht.
Wenn das **ADIE** Bit sowie das **I-Bit** im AVR **Statusregister** gesetzt ist, wird der **ADC Interrupt** ausgelöst und die Interrupt-Behandlungsroutine aufgerufen.
Das Bit wird automatisch gelöscht, wenn die Interrupt-Behandlungsroutine aufgerufen wird. Es kann jedoch auch gelöscht werden, indem eine logische 1 in das Register geschrieben wird.

ADIE (**AD**C **I**nterrupt **E**nable)

Wenn dieses Bit gesetzt ist und ebenso das **I-Bit** im Statusregister **SREG**, dann wird der **ADC-Interrupt** aktiviert.

ADPS2...ADPS0 (**AD**C **P**rescaler **S**elect Bits)

Diese Bits bestimmen den Teilungsfaktor zwischen der Taktfrequenz und dem Eingangstakt des **ADC**.
Der **ADC** benötigt einen eigenen Takt, welchen er sich selber aus der CPU-Taktfreqenz erzeugt.
Der **ADC**-Takt sollte zwischen 50 und 200kHz sein.
Der Vorteiler muss also so eingestellt werden, dass die CPU-Taktfrequenz dividiert durch den Teilungsfaktor einen Wert zwischen 50-200kHz ergibt.
Bei einer CPU-Taktfrequenz von 4MHz beispielsweise rechnen wir

$$TF_{min} = \frac{CLK}{200\,\mathrm{kHz}} = \frac{4000000}{200000} = \mathbf{20}$$

$$TF_{max} = \frac{CLK}{50\,\mathrm{kHz}} = \frac{4000000}{50000} = \mathbf{80}$$

Somit kann hier der Teilungsfaktor 32 oder 64 verwendet werden. Im Interesse der schnelleren Wandlungszeit werden wir hier den Faktor 32 einstellen.

ADPS2	ADPS1	ADPS0	Teilungsfaktor
0	0	0	2
0	0	1	2
0	1	0	4
0	1	1	8
1	0	0	16
1	0	1	32
1	1	0	64
1	1	1	128

ADCL

ADCH

ADC Data Register

Wenn eine Umwandlung abgeschlossen ist, befindet sich der gemessene Wert in diesen beiden Registern. Von **ADCH** werden nur die beiden niederwertigsten Bits verwendet. Es müssen immer beide Register ausgelesen werden, und zwar immer **in der Reihenfolge: ADCL, ADCH**. Der effektive Messwert ergibt sich dann zu:

```
x = ADCL;        // mit uint16_t x
x += (ADCH<<8); // in zwei Zeilen (LSB/MSB-Reihenfolge und
                // C-Operatorpriorität sichergestellt)
```

oder

```
x = ADCW; // je nach AVR auch x = ADC (siehe avr/ioxxx.h)
```

ADMUX

ADC **Mu**ltiple**x**er Select Register

Mit diesem Register wird der zu messende Kanal ausgewählt. Beim 90S8535 kann jeder Pin von Port A als **ADC**-Eingang verwendet werden (=8 Kanäle).
Das Register ist wie folgt aufgebaut:

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	**REFS1**	**REFS0**	**ADLAR**	**MUX4**	**MUX3**	**MUX2**	**MUX1**	**MUX0**
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0

REFS1...REFS0 (**Ref**erence**S**election Bits)

Mit diesen Bits kann die Referenzspannung eingestellt werden:

REFS1	REFS0	Referenzspanung
0	0	Externes AREF
0	1	AVCC als Referenz
1	0	Reserviert
1	1	Interne 2,56 Volt

ADLAR (**ADC L**eft **A**djust **R**esult)

Das ADLAR Bit verändert das Aussehen des Ergenbisses der AD-Wandlung. Bei einer logischen 1 wird das Ergebnis linksbündig ausgegeben, bei einer 0 rechtsündig. Eine Änderung in diesem Bit beeinflusst das Ergenbis sofort, ganz egal ob bereits eine Wandlung läuft.

MUX4...MUX0

Mit diesem 5 Bits wird der zu messende Kanal bestimmt. Wenn man einen einfachen 1-kanaligen ADC verwendet wird einfach die entsprechende Pinnummer des Ports in die Bits 0...2 eingeschrieben.
Wenn das Register beschrieben wird, während dem eine Umwandlung läuft, so wird zuerst die aktuelle Umwandlung auf dem bisherigen Kanal beendet. Dies ist vor allem beim frei laufenden Betrieb zu berücksichtigen.

Eine Empfehlung ist deswegen diese, dass der frei laufende Betrieb nur bei einem einzelnen zu verwendenden Analogeingang verwendet werden sollte, wenn man sich Probleme bei der Umschalterei ersparen will.

Aktivieren des ADC

Um den **ADC** zu aktivieren, müssen wir das **ADEN**-Bit im **ADCSR**-Register setzen. Im gleichen Schritt legen wir auch gleich die Betriebsart fest.

Ein kleines Beispiel für den "single conversion"-Mode bei einem ATmega169 und Nutzung der internen Referenzspannung (beim '169 1,1V bei anderen AVRs auch 2,56V). D.h. das Eingangssignal darf diese Spannung nicht überschreiten, gegebenenfalls mit Spannungsteiler einstellen. Ergebnis der Routine ist der ADC-Wert, also 0 für 0-Volt und 1023 für V_ref-Volt.

```
uint16_t ReadChannel(uint8_t mux)
{
  uint8_t i;
  uint16_t result;

  ADCSRA = (1<<ADEN) | (1<<ADPS1) | (1<<ADPS0);    // Frequenzvorteiler
                                 // setzen auf 8 (1) und ADC aktivieren (1)

  ADMUX = mux;                        // Kanal waehlen
  ADMUX |= (1<<REFS1) | (1<<REFS0); // interne Referenzspannung nutzen

  /* nach Aktivieren des ADC wird ein "Dummy-Readout" empfohlen, man liest
     also einen Wert und verwirft diesen, um den ADC "warmlaufen zu lassen" */
  ADCSRA |= (1<<ADSC);                // eine ADC-Wandlung
  while ( ADCSRA & (1<<ADSC) ) {
     ;     // auf Abschluss der Konvertierung warten
  }
  result = ADCW;  // ADCW muss einmal gelesen werden,
                  // sonst wird Ergebnis der nächsten Wandlung
                  // nicht übernommen.

  /* Eigentliche Messung - Mittelwert aus 4 aufeinanderfolgenden Wandlungen */
  result = 0;
  for( i=0; i<4; i++ )
  {
    ADCSRA |= (1<<ADSC);              // eine Wandlung "single conversion"
    while ( ADCSRA & (1<<ADSC) ) {
      ;   // auf Abschluss der Konvertierung warten
    }
    result += ADCW;                   // Wandlungsergebnisse aufaddieren
  }
  ADCSRA &= ~(1<<ADEN);               // ADC deaktivieren (2)

  result /= 4;                       // Summe durch vier teilen = arithm. Mittelwert

  return result;
}

...
```

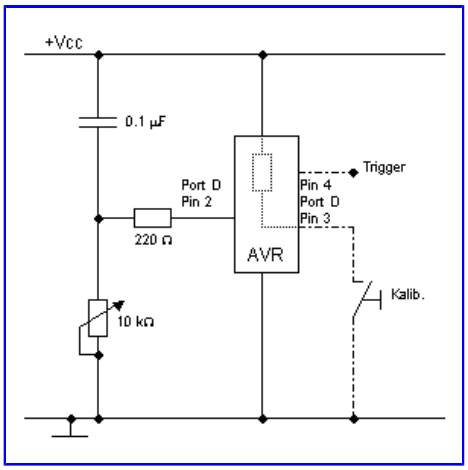
```
/* Beispielaufrufe: */

void foo(void)
{
  uint16_t adcval;

  adcval = ReadChannel(0); /* MUX-Bits auf 0b0000 -> Channel 0 */
  ...
  adcval = ReadChannel(2); /* MUX-Bits auf 0b0010 -> Channel 2 */
  ...
}
```

Im Beispiel wird bei jedem Aufruf der ADC aktiviert und nach der Wandlung wieder abgeschaltet, das spart Strom. Will man dies nicht, verschiebt man die mit (1) gekennzeichneten Zeilen in eine Funktion adc_init() o.ä. und löscht die mit (2) markierten Zeilen.

Analog-Digital-Wandlung ohne internen ADC

Messen eines Widerstandes

Analoge Werte lassen sich ohne Analog-Digital-Wandler auch indirekt ermitteln. Im Folgenden wird die Messung des an einem Potentiometer eingestellten Widerstands anhand der Ladekurve eines Kondensators erläutert. Bei dieser Methode wird nur ein Portpin benötigt, ein Analog-Digital-Wandler oder Analog-Comparator ist nicht erforderlich. Es wird dazu eine Kondensator und der Widerstand (das Potentiometer) in Reihe zwischen Vorsorgungsspannung und Masse/GND geschaltet (sogen. RC-Netzwerk). Zusätzlich wird eine Verbindung der Leitung zwischen Kondensator und Potentiometer zu einem Portpin des Controllers hergestellt. Die folgende Abbildung verdeutlicht die erforderliche Schaltung.



Wird der Portpin des Controllers auf Ausgang konfiguriert (im Beispiel *DDRD |= (1<<PD2)*) und dieser Ausgang auf Logisch 1 ("High", *PORTD |= (1<<PD2)*) geschaltet, liegt an beiden "Platten" des Kondensators das gleiche Potential **VCC** an und der Kondensator somit entladen. (Klingt komisch, mit **Vcc** entladen, ist aber so, da an beiden Seiten des Kondensators das gleiche Potential anliegt und somit eine Potentialdifferenz von 0V besteht => Kondensator ist entladen).

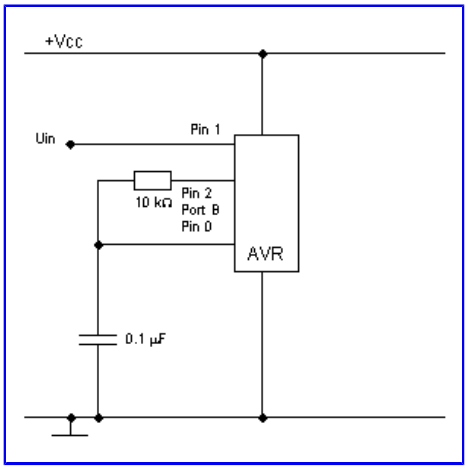
Nach einer gewissen Zeit ist der Kondensator entladen und der Portpin wird als Eingang konfiguriert (*DDRD &= ~(1<<PD2); PORTD &= ~(1<<PD2)*), wodurch dieser hochohmig wird. Der Status des Eingangspin (in PIND) ist Logisch 1 (High). Der Kondensator lädt sich jetzt über das Poti auf, dabei steigt der Spannungsabfall über dem Kondensator und derjenige über dem Poti sinkt. Fällt nun der Spannungsabfall über dem Poti unter die Thresholdspannung des Eingangspins (2/5 Vcc, also ca. 2V), wird das Eingangssignal als LOW erkannt (Bit in PIND wird 0). Die Zeitspanne zwischen der Umschaltung von Entladung auf Aufladung und dem Wechsel des Eingangssignals von High auf Low ist ein Maß für den am Potentiometer eingestellten Widerstand. Zur Zeitmessung kann einer der im Controller vorhandenen Timer genutzt werden. Der 220 Ohm Widerstand dient dem Schutz des Controllers. Es würde sonst bei Maximaleinstellung des Potentionmeters (hier 0 Ohm) ein zu hoher Strom fließen, der die Eingangsstufe des Controllers zerstört.

Mit einem weiteren Eingangspin und ein wenig Software können wir auch eine Kalibrierung realisieren, um den Messwert in einen vernünftigen Bereich (z.B: 0...100 % oder so) umzurechnen. Ein Beispielprogramm findet sich auf Christian Schifferles Web-Seite im Archiv *ATMEL.ZIP*, welches unter den Titel *Tutorial "Programmieren mit C für Atmel Mikrocontroller* heruntergeladen werden kann.

ADC über Komparator

Es gibt einen weiteren Weg, eine analoge Spannung mit Hilfe des Komparators, welcher in fast jedem AVR integriert ist, zu messen. Siehe dazu auch die Application Note AVR400 von Atmel.

Dabei wird das zu messende Signal auf den invertierenden Eingang des Komparators geführt. Zusätzlich wird ein Referenzsignal an den nicht invertierenden Eingang des Komparators angeschlossen. Das Referenzsignal wird hier auch wieder über ein RC-Glied erzeugt, allerdings mit festen Werten für R und C.



Das Prinzip der Messung ist nun dem vorhergehenden recht ähnlich. Durch Anlegen eines LOW-Pegels an Pin 2 wird der Kondensator zuerst einmal entladen. Auch hier muss darauf geachtet werden, dass der Entladevorgang genügend lang dauert.
Nun wird Pin 2 auf HIGH gelegt. Der Kondensator wird geladen. Wenn die Spannung über dem Kondensator die am Eingangspin anliegende Spannung erreicht hat schaltet der Komparator durch. Die Zeit, welche benötigt wird, um den Kondensator zu laden kann nun auch wieder als Maß für die Spannung an Pin 1 herangezogen werden.

Ich habe es mir gespart, diese Schaltung auch aufzubauen und zwar aus mehreren Gründen:

1. 3 Pins notwendig.
2. Genauigkeit vergleichbar mit einfacherer Lösung.
3. War einfach zu faul.

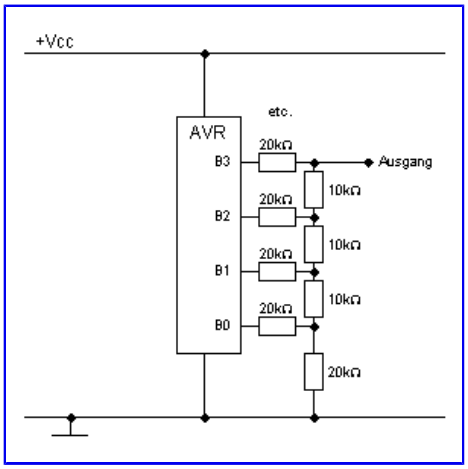
Der Vorteil dieser Schaltung liegt allerdings darin, dass damit direkt Spannungen gemessen werden können.

DAC (Digital Analog Converter)

Mit Hilfe eines Digital-Analog-Konverters (**DAC**) können wir nun auch Analogsignale ausgeben. Es gibt hier mehrere Verfahren.

DAC über mehrere digitale Ausgänge

Wenn wir an den Ausgängen des Controllers ein entsprechendes Widerstandsnetzwerk aufbauen haben wir die Möglichkeit, durch die Ansteuerung der Ausgänge über den Widerständen einen Addierer aufzubauen, mit dessen Hilfe wir eine dem Zahlenwert proportionale Spannung erzeugen können. Das Schaltbild dazu kann etwa so aussehen:

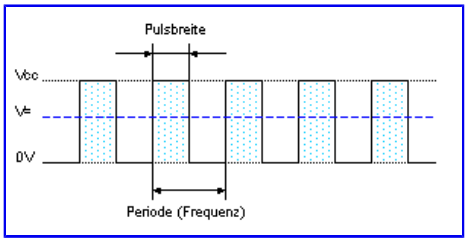


Es sollten selbstverständlich möglichst genaue Widerstände verwendet werden, also nicht unbedingt solche mit einer Toleranz von 10% oder mehr. Weiterhin empfiehlt es sich, je nach Anwendung den Ausgangsstrom über einen Operationsverstärker zu verstärken.

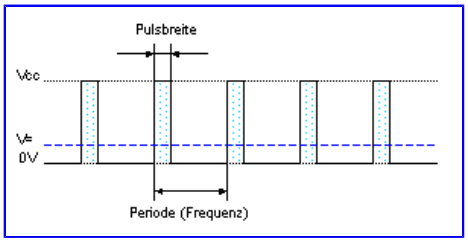
PWM (Pulsweitenmodulation)

Wir kommen nun zu einem Thema, welches in aller Munde ist, aber viele Anwender verstehen nicht ganz, wie **PWM** eigentlich funktioniert.

Wie wir alle wissen, ist ein Mikrocontroller ein rein digitales Bauteil. Definieren wir einen Pin als Ausgang, dann können wir diesen Ausgang entweder auf HIGH setzen, worauf am Ausgang die Versorgungsspannung **Vcc** anliegt, oder aber wir setzen den Ausgang auf LOW, wonach dann **0V** am Ausgang liegt. Was passiert aber nun, wenn wir periodisch mit einer festen Frequenz zwischen HIGH und LOW umschalten? - Richtig, wir erhalten eine Rechteckspannung, wie die folgende Abbildung zeigt:



Diese Rechteckspannung hat nun einen arithmetischen Mittelwert, der je nach Pulsbreite kleiner oder größer ist.



Wenn wir nun diese pulsierende Ausgangsspannung noch über ein RC-Glied filtern/"glätten", dann haben wir schon eine entsprechende Gleichspannung erzeugt.

Mit den AVRs können wir direkt **PWM**-Signale erzeugen. Dazu dient der 16-Bit Zähler, welcher im sogenannten **PWM**-Modus betrieben werden kann.

Hinweis:

> In den folgenden Überlegungen wird als Controller der 90S2313 vorausgesetzt. Die Theorie ist bei anderen AVR-Controllern vergleichbar, die Pinbelegung allerdings nicht unbedingt, weshalb ein Blick ins entsprechende Datenblatt dringend angeraten wird.

Um den **PWM**-Modus zu aktivieren, müssen im Timer/Counter1 Control Register A **TCCR1A** die Pulsweiten-Modulatorbits **PWM10** bzw. **PWM11** entsprechend nachfolgender Tabelle gesetzt werden:

PWM11	PWM10	Bedeutung
0	0	PWM-Modus des Timers ist nicht aktiv.
0	1	8-Bit PWM.
1	0	9-Bit PWM.
1	1	10-Bit PWM.

Der Timer/Counter zählt nun permanent von 0 bis zur Obergrenze und wieder zurück, er wird also als sogenannter Auf-/Ab Zähler betrieben. Die Obergrenze hängt davon ab, ob wir mit 8, 9 oder 10-Bit PWM arbeiten wollen:

Auflösung	Obergrenze	Frequenz
8	255	f_{TC1} / 510
9	511	f_{TC1} / 1022
10	1023	f_{TC1} / 2046

Zusätzlich muss mit den Bits **COM1A1** und **COM1A0** desselben Registers die gewünschte Ausgabeart des Signals definiert werden:

COM1A1	COM1A0	Bedeutung
0	0	Keine Wirkung, Pin wird nicht geschaltet.
0	1	Keine Wirkung, Pin wird nicht geschaltet.
1	0	Nicht invertierende PWM. Der Ausgangspin wird gelöscht beim Hochzählen und gesetzt beim Herunterzählen.
1	1	Invertierende PWM. Der Ausgangspin wird gelöscht beim Herunterzählen und gesetzt beim Hochzählen.

Der entsprechende Befehl, um beispielsweise den Timer/Counter als nicht invertierenden 10-Bit PWM zu verwenden, heißt dann:

alte Schreibweise (PWMxx wird nicht mehr akzeptiert)

```
TCCR1A = (1<<PWM11)|(1<<PWM10)|(1<<COM1A1);
```

neue Schreibweise

```
TCCR1A = (1<<WGM11)|(1<<WGM10)|(1<<COM1A1);
```

Damit der Timer/Counter überhaupt läuft, müssen wir im Control Register B **TCCR1B** noch den gewünschten Takt (Vorteiler) einstellen und somit auch die Frequenz des **PWM**-Signals bestimmen.

CS12	CS11	CS10	Bedeutung
0	0	0	Stop. Der Timer/Counter wird gestoppt.
0	0	1	CK
0	1	0	CK / 8
0	1	1	CK / 64
1	0	0	CK / 256
1	0	1	CK / 1024
1	1	0	Externer Pin 1, negative Flanke

1	1	1	Externer Pin 1, positive Flanke

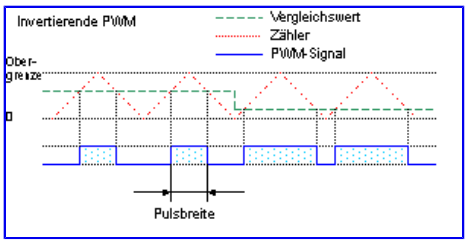
Also um einen Takt von CK / 1024 zu generieren, verwenden wir folgenden Befehl:

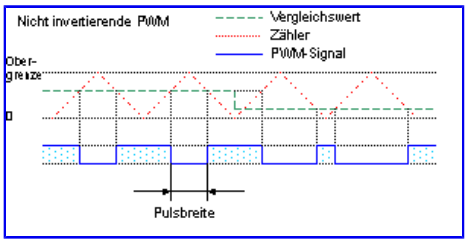
```
TCCR1B = (1<<CS12) | (1<<CS10);
```

Jetzt muss nur noch der Vergleichswert festgelegt werden. Diesen schreiben wir in das 16-Bit Timer/Counter Output Compare Register **OCR1A**.

```
OCR1A = xxx;
```

Die folgende Grafik soll den Zusammenhang zwischen dem Vergleichswert und dem generierten **PWM**-Signal aufzeigen.





Ach ja, fast hätte ich's vergessen. Das generierte **PWM**-Signal wird am Output Compare Pin **OC1** des Timers ausgegeben und leider können wir deshalb auch beim AT90S2313 nur ein einzelnes **PWM**-Signal mit dieser Methode generieren. Andere AVR-Typen verfügen über bis zu vier PWM-Ausgänge. Zu beachten ist außerdem, das wenn der OC Pin aktiviert ist, er nichtmehr wie üblich funktioniert und z.B. nicht einfach über PORTx ausgelesen werden kann.

LCD Ansteuerung

Das LCD und sein Controller

Die meisten Text-LCDs verwenden den Controller **HD44780** oder einen kompatiblen (z.B. KS0070) und haben 14 oder 16 Pins. Die Pinbelegung ist praktisch immer gleich:

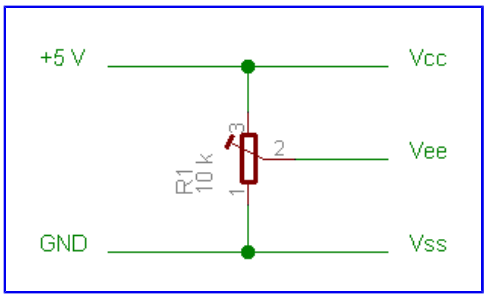
Pin #	Bezeichnung	Funktion
1	Vss	GND
2	Vcc	5V
3	Vee	Kontrastspannung (0V bis 5V)
4	RS	Register Select (Befehle/Daten)
5	RW	Read/Write
6	E	Enable
7	DB0	Datenbit 0
8	DB1	Datenbit 1
9	DB2	Datenbit 2
10	DB3	Datenbit 3
11	DB4	Datenbit 4
12	DB5	Datenbit 5

13	DB6	Datenbit 6
14	DB7	Datenbit 7
15	A	LED-Beleuchtung, Anode
16	K	LED-Beleuchtung, Kathode

Achtung: Unbedingt von der richtigen Seite zu zählen anfangen! Meistens ist neben Pin 1 eine kleine 1 auf der LCD-Platine, ansonsten im Datenblatt nachschauen.

Bei LCDs mit 16-poligem Anschluss sind die beiden letzten Pins für die Hintergrundbeleuchtung reserviert. Hier unbedingt das Datenblatt zu Rate ziehen, die beiden Anschlüsse sind je nach Hersteller verdreht beschaltet. Falls kein Datenblatt vorliegt, kann man mit einem Durchgangsprüfer feststellen, welcher Anschluss mit Masse (GND) verbunden ist.

Vss wird ganz einfach an GND angeschlossen und Vcc an 5V. Vee kann man testweise auch an GND legen. Wenn das LCD dann zu dunkel sein sollte muss man ein 10k-Potentiometer zwischen GND und 5V schalten, mit dem Schleifer an Vee:



Es gibt zwei verschiedene Möglichkeiten zur Ansteuerung eines solchen Displays: den **8-bit-** und den **4-bit**-Modus.

- Für den **8-bit-Modus** werden (wie der Name schon sagt) alle acht Datenleitungen zur Ansteuerung verwendet, somit kann durch einen Zugriff immer ein ganzes Byte übertragen werden.
- Der **4-bit-Modus** verwendet nur die oberen vier Datenleitungen (**DB4-DB7**). Um ein Byte zu übertragen braucht man somit zwei Zugriffe, wobei zuerst das höherwertige **"Nibble"** (= 4 Bits), also Bit 4 bis Bit 7 übertragen wird und dann das niederwertige, also Bit 0 bis Bit 3. Die unteren Datenleitungen des LCDs, die beim Lesezyklus Ausgänge sind, lässt man offen (siehe Datasheets, z.B. vom KS0070).

Der 4-bit-Modus hat den Vorteil, dass man 4 IO-Pins weniger benötigt als beim 8-bit-Modus, weshalb ich mich hier für eine Ansteuerung mit 4bit entschieden habe.

Neben den vier Datenleitungen (DB4, DB5, DB6 und DB7) werden noch die Anschlüsse **RS**, **RW** und **E** benötigt.

- Über **RS** wird ausgewählt, ob man einen Befehl oder ein Datenbyte an das LCD schicken möchte. Ist RS Low, dann wird das ankommende Byte als Befehl interpretiert, ist RS high, dann wird das Byte auf dem LCD angezeigt.
- **RW** legt fest, ob geschrieben oder gelesen werden soll. High bedeutet lesen, low bedeutet schreiben. Wenn man RW auf lesen einstellt und RS auf Befehl, dann kann man das **Busy-Flag** an DB7 lesen, das anzeigt ob das LCD den vorhergehenden Befehl fertig verarbeitetet hat. Ist RS auf Daten eingestellt, dann kann man z.B. den Inhalt des Displays lesen - was jedoch nur in den wenigsten Fällen Sinn macht. Deshalb kann man RW dauerhaft auf low lassen (= an GND anschließen), so dass man noch ein IO-Pin am Controller einspart. Der Nachteil ist, dass man dann das Busy-Flag nicht lesen kann, weswegen man nach jedem Befehl vorsichtshalber ein paar Mikrosekunden warten sollte um dem LCD Zeit zum Ausführen des Befehls zu geben. Dummerweise schwankt die Ausführungszeit von Display zu Display und ist auch von der Betriebsspannung abhängig. Für professionellere Sachen also lieber den IO-Pin opfern und Busy abfragen.
- Der **E** Anschluss schließlich signalisiert dem LCD, dass die übrigen Datenleitungen jetzt korrekte Pegel angenommen haben und es die gewünschten Daten von den Datenleitungen bzw. Kommandos von den Datenleitungen übernehmen kann.

Anschluss an den Controller

Jetzt da wir wissen, welche Anschlüsse das LCDs benötigt, können wir das LCD mit dem Mikrocontroller verbinden:

Pin #-LCD	Bezeichnung-LCD	Pin-µC
1	Vss	GND
2	Vcc	5V
3	Vee	GND oder Poti (siehe oben)
4	RS	PD4 am AVR
5	RW	GND
6	E	PD5 am AVR
7	DB0	offen
8	DB1	offen
9	DB2	offen
10	DB3	offen
11	DB4	PD0 am AVR
12	DB5	PD1 am AVR
13	DB6	PD2 am AVR
14	DB7	PD3 am AVR

Ok, alles ist verbunden, wenn man jetzt den Strom einschaltet sollten ein oder zwei schwarze Balken auf dem Display angezeigt werden. Doch wie bekommt man jetzt die Befehle und Daten in das Display?

Programmierung

Datei **lcd-routines.h**

```
void lcd_data(unsigned char temp1);
void lcd_command(unsigned char temp1);
void lcd_enable(void);
void lcd_init(void);
void lcd_home(void);
void lcd_clear(void);
void set_cursor(uint8_t x, uint8_t y);
```

Datei **lcd-routines.c**:

```
// Pinbelegung über defines einstellbar

#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include "lcd-routines.h"

// LCD Befehle

#define CLEAR_DISPLAY 0x01
#define CURSOR_HOME   0x02

// Pinbelegung für das LCD

#define LCD_PORT      PORTD
#define LCD_DDR       DDRD
#define LCD_RS        4
#define LCD_EN        5


// sendet ein Datenbyte an das LCD

void lcd_data(unsigned char temp1)
{
   unsigned char temp2 = temp1;

   LCD_PORT |= (1<<LCD_RS);        // RS auf 1 setzen

   temp1 = temp1 >> 4;
   temp1 = temp1 & 0x0F;
   LCD_PORT &= 0xF0;
```

```
    LCD_PORT |= temp1;              // setzen
    lcd_enable();

    temp2 = temp2 & 0x0F;
    LCD_PORT &= 0xF0;
    LCD_PORT |= temp2;              // setzen
    lcd_enable();

    _delay_us(42);
}

// sendet einen Befehl an das LCD

void lcd_command(unsigned char temp1)
{
    unsigned char temp2 = temp1;

     LCD_PORT &= ~(1<<LCD_RS);      // RS auf 0 setzen

    temp1 = temp1 >> 4;             // oberes Nibble holen
    temp1 = temp1 & 0x0F;           // maskieren
    LCD_PORT &= 0xF0;
    LCD_PORT |= temp1;              // setzen
    lcd_enable();

    temp2 = temp2 & 0x0F;           // unteres Nibble holen und maskieren
    LCD_PORT &= 0xF0;
    LCD_PORT |= temp2;              // setzen
    lcd_enable();

    _delay_us(42);
}

// erzeugt den Enable-Puls
void lcd_enable(void)
{
    LCD_PORT |= (1<<LCD_EN);
     _delay_us(1);                  // kurze Pause
    LCD_PORT &= ~(1<<LCD_EN);
}

// Initialisierung:
// Muss ganz am Anfang des Programms aufgerufen werden.

void lcd_init(void)
{
    LCD_DDR = LCD_DDR | 0x0F | (1<<LCD_RS) | (1<<LCD_EN);   // Port auf Ausgang schalten

    // muss 3mal hintereinander gesendet werden zur Initialisierung

     _delay_ms(15);
    LCD_PORT &= 0xF0;
    LCD_PORT |= 0x03;
    LCD_PORT &= ~(1<<LCD_RS);      // RS auf 0
    lcd_enable();

     _delay_ms(5);
    lcd_enable();

     _delay_ms(1);
    lcd_enable();

    // 4 Bit Modus aktivieren
    LCD_PORT &= 0xF0;
    LCD_PORT |= 0x02;
    lcd_enable();

    // 4Bit / 2 Zeilen / 5x7
     lcd_command(0x28);

    // Display ein / Cursor aus / kein Blinken
    lcd_command(0x0C);

    // inkrement / kein Scrollen
    lcd_command(0x06);

     lcd_clear();
}
```

```
// Sendet den Befehl zur Löschung des Displays

void lcd_clear(void)
{
   lcd_command(CLEAR_DISPLAY);
   _delay_ms(5);
}

// Sendet den Befehl: Cursor Home

void lcd_home(void)
{
   lcd_command(CURSOR_HOME);
   _delay_ms(5);
}

// setzt den Cursor in Zeile y (1..4) Spalte x (0..15)

void set_cursor(uint8_t x, uint8_t y)
{
  switch (y) {
    case 1: lcd_command(0x80+0x00+x); break;    // 1. Zeile
    case 2: lcd_command(0x80+0x40+x); break;    // 2. Zeile
    case 3: lcd_command(0x80+0x10+x); break;    // 3. Zeile
    case 4: lcd_command(0x80+0x50+x); break;    // 4. Zeile
  }
}

// Schreibt einen String auf das LCD

void lcd_string(char *data)
{
    while(*data) {
        lcd_data(*data);
        data++;
    }
}
```

Ein Hauptprogramm, welches die Funktionen benutzt sieht zb. so aus:

```
//
// Anpassungen im makefile:
//    ATMega8 => MCU=atmega8 im makefile einstellen
//    lcd-routines.c in SRC = ... Zeile anhängen
//
#include <avr/io.h>
#include "lcd-routines.h"

int main(void)
{
    lcd_init();

    lcd_data('T');
    lcd_data('e');
    lcd_data('s');
    lcd_data('t');

    set_cursor(0,2);

    lcd_string("Hello World!");

    while(1)
    {
    }

    return 0;
}
```

Wichtig ist dabei, dass die Optimierung bei der Compilierung eingeschaltet ist, sonst stimmen die Zeiten der Funktionen _delay_us() und _delay_ms() nicht und der Code wird wesentlich länger (Siehe Dokumentation der libc im WinAVR).

Die Timer/Counter des AVR

Die heutigen Mikrocontroller und insbesondere die RISC-AVRs sind für viele Steuerungsaufgaben zu schnell. Wenn wir beispielsweise eine LED oder Lampe blinken lassen wollen, können wir selbstverständlich nicht die CPU-Frequenz verwenden, da ja dann nichts mehr vom Blinken zu bemerken wäre.

Wir brauchen also eine Möglichkeit, Vorgänge in Zeitabständen durchzuführen, die geringer als die Taktfrequenz des Controllers sind. Selbstverständlich sollte die resultierende Frequenz auch noch möglichst genau und stabil sein.

Hier kommen die im AVR vorhandenen Timer/Counter zum Einsatz.

Ein Timer ist ganz einfach ein bestimmtes Register im µC, dass völlig ohne Zutun des Programmes, per Hardware, hochgezählt wird. Das alleine wäre noch nicht allzu nützlich, wenn nicht dieses Hardwareregister bei bestimmten Zählerständen einen Interrupt auslösen könnte. Ein solches Ereignis ist der Overflow: Da die Bitbreite des Registers beschränkt ist, kommt es natürlich auch vor, dass der Zähler so hoch zählt, dass der nächste Zählerstand mit dieser Bitbreite nicht mehr darstellbar ist und der Zähler wieder auf 0 zurückgesetzt wird. Dieses Ereignis nennt man den Overflow und es ist möglich an dieses Ereignis einen Interrupt zu koppeln.

Ein anderes Anwendungsgebiet ist die Zählung von Signalen, welche über einen I/O-Pin zugeführt werden können.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf den AT90S2313. Für andere Modelltypen müsst ihr euch die allenfalls notwendigen Anpassungen aus den Datenblättern der entsprechenden Controller herauslesen.

Wir unterscheiden grundsätzlich zwischen 8-Bit Timern, welche eine Auflösung von 256 aufweisen und 16-Bit Timern mit (logischerweise) einer Auflösung von 65536. Als Eingangstakt für die Timer/Counter kann entweder die CPU-Taktfrequenz, der Vorteiler-Ausgang oder ein an einen I/O-Pin angelegtes Signal verwendet werden. Wenn ein externes Signal verwendet wird, so darf dessen Frequenz nicht höher sein als die Hälfte des CPU-Taktes.

Der Vorteiler (Prescaler)

Der Vorteiler dient dazu, den CPU-Takt vorerst um einen einstellbaren Faktor zu reduzieren. Die so geteilte Frequenz wird den Eingängen der Timer zugeführt.

Wenn wir mit einem CPU-Takt von 4 MHz arbeiten und den Vorteiler auf 1024 einstellen, wird also der Timer mit einer Frequenz von 4 MHz / 1024, also mit ca. 4 kHz versorgt. Wenn also der Timer läuft, so wird das Daten- bzw. Zählregister (TCNTx) mit dieser Frequenz inkrementiert.

8-Bit Timer/Counter

Alle AVR-Modelle verfügen über mindestens einen, teilweise sogar zwei, 8-Bit Timer.

Der 8-Bit Timer wird z.B bei AT90S2313 über folgende Register angesprochen (bei anderen Typen weitestgehend analog):

TCCR0

Timer/**C**ounter **C**ontrol **R**egister

Timer **0**

In diesem Register stellen wir ein, wie wir den Timer/Counter verwenden möchten.

Das Register ist wie folgt aufgebaut:

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**CS02**	**CS01**	**CS00**
R/W	R	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0

CS02, CS01, CS00 (**C**lock **S**elect Bits)

Diese 3 Bits bestimmen die Quelle für den Timer/Counter:

CS02	CS01	CS00	Resultat
0	0	0	Stopp, Der Timer/Counter wird angehalten.
0	0	1	CPU-Takt
0	1	0	CPU-Takt / 8
0	1	1	CPU-Takt / 64
1	0	0	CPU-Takt / 256
1	0	1	CPU-Takt / 1024
1	1	0	Externer Pin **TO**, fallende Flanke
1	1	1	Externer Pin **TO**, steigende Flanke

Wenn als Quelle der externe Pin **TO** verwendet wird, so wird ein Flankenwechsel auch erkannt, wenn der Pin **TO** als Ausgang geschaltet ist.

TCNT0

Timer/**C**ou**nt**er Daten Register Timer **0**

Dieses ist als 8-Bit Aufwärtszähler mit Schreib- und Lesezugriff realisiert. Wenn der Zähler den Wert 255 erreicht hat beginnt er beim nächsten Zyklus wieder bei 0.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	**MSB**							**LSB**
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0

Um nun also den Timer0 in Betrieb zu setzen und ihn mit einer Frequenz von 1/1024-tel des CPU-Taktes zählen zu lassen, schreiben wir die folgende Befehlszeile:

```
TCCR0 |= (1<<CS00)|(1<<CS02);
```

Der Zähler zählt nun aufwärts bis 255, um dann wieder bei 0 zu beginnen. Der aktuelle Zählerstand steht in TCNT0. Bei jedem Überlauf von 255 auf 0 wird das Timer Overflow Flag **TOV0** im Timer Interrupt Flag **TIFR**-Register gesetzt und, falls so konfiguriert, ein entsprechender Timer-Overflow-Interrupt ausgelöst und die daran gebundene Interrupt-Routine abgearbeitet. Das TOV Flag lässt sich durch das Hineinschreiben einer 1 und nicht wie erwartet einer 0 wieder zurücksetzen.

16-Bit Timer/Counter

Viele AVR-Modelle besitzen außer den 8-Bit Timern auch 16-Bit Timer. Die 16-Bit Timer/Counter sind etwas komplexer aufgebaut als die 8-Bit Timer/Counter, bieten dafür aber auch viel mehr Möglichkeiten, als da sind:

- Die PWM-Betriebsart Erzeugung eines pulsweitenmodulierten Ausgangssignals.
- Vergleichswert-Überprüfung mit Erzeugung eines Ausgangssignals (Output Compare Match).
- Einfangen eines Eingangssignals mit Speicherung des aktuellen Zählerwertes (Input Capturing), mit zuschaltbarer Rauschunterdrückung (Noise Filtering).

Folgende Register sind dem Timer/Counter 1 zugeordnet:

TCCR1A

Timer/**C**ounter **C**ontrol **R**egister **A** Timer **1**

In diesem und dem folgenden Register stellen wir ein, wie wir den Timer/Counter verwenden möchten. Das Register ist wie folgt aufgebaut:

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	**COM1A1**	**COM1A0**	-	-	-	-	**PWM11**	**PWM10**

R/W	R/W	R/W	R	R	R	R	R/W	R/W
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0

COM1A1, **COM1A0** (**Co**mpare **M**atch Control Bits)

Diese 2 Bits bestimmen die Aktion, welche am Output-Pin **OC1** ausgeführt werden soll, wenn der Wert des Datenregisters des Timer/Counter 1 den Wert des Vergleichsregisters erreicht, also ein so genannter Compare Match auftritt.
Der Pin **OC1** (**PB3** beim 2313) muss mit dem Datenrichtungsregister als Ausgang konfiguriert werden.

COM1A1	COM1A0	Resultat
0	0	Output-Pin **OC1** wird nicht angesteuert.
0	1	Das Signal am Pin **OC1** wird invertiert (Toggle).
1	0	Der Output Pin **OC1** wird auf 0 gesetzt.
1	1	Der Output Pin **OC1** wird auf 1 gesetzt.

In der PWM-Betriebsart haben diese Bits eine andere Funktion.

COM1A1	COM1A0	Resultat
0	0	Output-Pin **OC1** wird nicht angesteuert.
0	1	Output-Pin **OC1** wird nicht angesteuert.
1	0	Wird beim Hochzählen der Wert im Vergleichsregister erreicht, so wird der Pin **OC1** auf 0 gesetzt. Wird beim Herunterzählen der Wert im Vergleichsregister erreicht, so wird der Pin auf 1 gesetzt. Man nennt dies *nicht invertierende PWM*.
1	1	Wird beim Hochzählen der Wert im Vergleichsregister erreicht, so wird der Pin **OC1** auf 1 gesetzt. Wird beim Herunterzählen der Wert im Vergleichsregister erreicht, so wird der Pin auf 0 gesetzt. Man nennt dies *invertierende PWM*.

PWM11, **PWM10** (**PWM** Mode Select Bits)

Mit diesen 2 Bits wird die PWM-Betriebsart des Timer/Counter 1 gesteuert.

PWM11	PWM10	Resultat
0	0	Die PWM-Betriebsart ist nicht aktiviert. Timer/Counter 1 arbeitet als normaler Timer bzw. Zähler.
0	1	8-Bit PWM Betriebsart aktivieren.
1	0	9-Bit PWM Betriebsart aktivieren.
1	1	10-Bit PWM Betriebsart aktivieren.

TCCR1B

Timer/**C**ounter **C**ontrol **R**egister **B** Timer **1**

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	**ICNC1**	**ICES1**	**-**	**-**	**CTC1**	**CS12**	**CS11**	**CS10**

R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R/W	R/W	R/W
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0

ICNC1 (**I**nput **C**apture **N**oise **C**anceler (4 CKs) Timer/Counter 1

oder auf Deutsch Rauschunterdrückung des Eingangssignals.
Wenn dieses Bit gesetzt ist und mit dem Input Capture Signal gearbeitet wird so werden nach der Triggerung des Signals mit der entsprechenden Flanke (steigend oder fallend) am Input Capture Pin **ICP** jeweils 4 Messungen mit der CPU-Frequenz des Eingangssignals abgefragt. Nur dann, wenn alle 4 Messungen den gleichen Zustand aufweisen gilt das Signal als erkannt.

ICES1 (**I**nput **C**apture **E**dge **S**elect Timer/Counter **1**)

Mit diesem Bit wird bestimmt, ob die steigende (**ICES1**=1) oder fallende (**ICES1**=0) Flanke zur Auswertung des Input Capture Signals an Pin **ICP** heran gezogen wird.

CTC1 (**C**lear **T**imer/**C**ounter on Compare Match Timer/Counter **1**)

Wenn dieses Bit gesetzt ist, so wird nach einer Übereinstimmung des Datenregisters **TCNT1H/TCNT1L** mit dem Vergleichswert in **OCR1H/OCR1L** das Datenregister **TCNT1H/TCNT1L** auf 0 gesetzt.
Da die Übereinstimmung im Takt nach dem Vergleich behandelt wird, ergibt sich je nach eingestelltem Vorteiler ein etwas anderes Zählverhalten:
Wenn der Vorteiler auf 1 gestellt ist und C der jeweilige Zählerwert ist, dann nimmt das Datenregister, im CPU-Takt betrachtet, folgende Werte an:
... | C-2 | C-1 | C | 0 | 1 |...
Wenn der Vorteiler z.B. auf 8 eingestellt ist, dann nimmt das Datenregister folgende Werte an:
... | C-2, C-2, C-2, C-2, C-2, C-2, C-2, C-2 | C-1, C-1, C-1, C-1, C-1, C-1, C-1, C-1 | C, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 |...
In der PWM-Betriebsart hat dieses Bit keine Funktion.

CS12, **CS11**, **CS10** (**C**lock **S**elect Bits)

Diese 3 Bits bestimmen die Quelle für den Timer/Counter:

CS12	CS11	CS10	Resultat
0	0	0	Stopp, Der Timer/Counter wird angehalten.
0	0	1	CPU-Takt
0	1	0	CPU-Takt / 8
0	1	1	CPU-Takt / 64
1	0	0	CPU-Takt / 256
1	0	1	CPU-Takt / 1024
1	1	0	Externer Pin T1, fallende Flanke
1	1	1	Externer Pin T1, steigende Flanke

Wenn als Quelle der externe Pin T1 verwendet wird, so wird ein Flankenwechsel auch erkannt, wenn der Pin T1 als Ausgang geschaltet ist.

TCNT1H
TCNT1L

Timer/**Cou**n**t**er Daten Register Timer/Counter **1**

Dieses ist als 16-Bit Aufwärtszähler mit Schreib- und Lesezugriff realisiert. Wenn der Zähler den Wert 65535 erreicht hat, beginnt er beim nächsten Zyklus wieder bei 0.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
Name	**MSB**								**TCNT1H**

Name								**LSB**	**TCNT1L**
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0	

In der PWM-Betriebsart wird das Register als Auf/Ab-Zähler verwendet, d.h. der Wert steigt zuerst von 0, bis er den Überlauf von 65535 auf 0 erreicht hat. Dann zählt das Register rückwärts wiederum bis 0.

Zum Auslesen des Registers wird von der CPU ein internes TEMP-Register verwendet. Das gleiche Register wird auch verwendet, wenn auf **OCR1** oder **ICR1** zugegriffen wird.

Deshalb müssen vor dem Zugriff auf eines dieser Register alle Interrupts gesperrt werden, weil sonst die Möglichkeit des gleichzeitigen Zugriffs auf das Temporärregister gegeben ist, was natürlich zu fehlerhaftem Verhalten des Programms führt.. Zudem muss zuerst **TCNT1L** und erst danach **TCNT1H** ausgelesen werden.

Wenn in das Register geschrieben werden soll, müssen ebenfalls alle Interrrupts gesperrt werden. Dann muss zuerst das **TCNT1H**-Register und erst danach das **TCNT1L**-Register geschrieben werden, also genau die umgekehrte Reihenfolge wie beim Lesen des Registers.

OCR1H
OCR1L

Timer/Counter **O**utput **C**ompare **R**egister Timer/Counter **1**

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
Name	**MSB**								**OCR1H**
Name								**LSB**	**OCR1L**
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0	

Der Wert im Output Compare Register wird ständig mit dem aktuellen Wert im Datenregister TCNT1H/TCNT1L verglichen. Stimmen die beiden Werte überein, so wird ein sogenannter Output Compare Match ausgelöst. Die entsprechenden Aktionen werden über die Timer/Counter 1 Control und Status Register eingestellt.

Zum Auslesen des Registers wird von der CPU ein internes TEMP-Register verwendet. Das gleiche Register wird auch verwendet, wenn auf **OCR1** oder **ICR1** zugegriffen wird. Deshalb müssen vor dem Zugriff auf eines dieser Register alle Interrupts gesperrt werden, weil sonst die Möglichkeit des gleichzeitigen Zugriffs auf das Temporärregister gegeben ist, was natürlich zu fehlerhaftem Verhalten des Programms führt.. Zudem muss zuerst **OCR1L** und erst danach **OCR1H** ausgelesen werden.

Wenn in das Register geschrieben werden soll, müssen ebenfalls alle Interrupts gesperrt werden. Dann muss zuerst das **OCR1H**-Register und erst danach das **OCR1L**-Register geschrieben werden, also genau die umgekehrte Reihenfolge wie beim Lesen des Registers.

ICR1H
ICR1L

Timer/Counter **I**nput **C**apture **R**egister Timer/Counter **1**

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
Name	**MSB**								**ICR1'***H'*
Name								**LSB**	**ICR1'***L'*
R/W	R	R	R	R	R	R	R	R	
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0	

Das Input Capture Register ist ein 16-Bit Register mit Lesezugriff. Es kann nicht beschrieben werden.

Wenn am Input Capture Pin **ICP** die gemäß Einstellungen im **TCCR1B** definierte Flanke erkannt wird, so wird der aktuelle Inhalt des Datenregisters **TCNT1H**/**TCNT1L** sofort in dieses Register kopiert und das Input Capture Flag **ICF1** im Timer Interrupt Flag Register **TIFR** gesetzt.

Wie bereits oben erwähnt, müssen vor dem Zugriff auf dieses Register alle Interrupts gesperrt werden.

	Zudem müssen Low- und Highbyte des Registers in der richtigen Reihenfolge bearbeitet werden: Lesen: **ICR1L** -> **ICR1H** Schreiben: **ICR1H** -> **ICR1L**

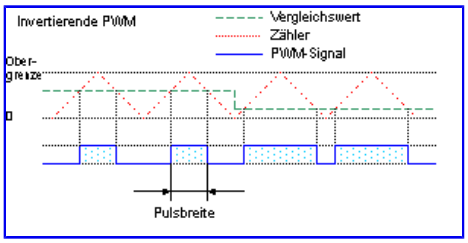
Die PWM-Betriebsart

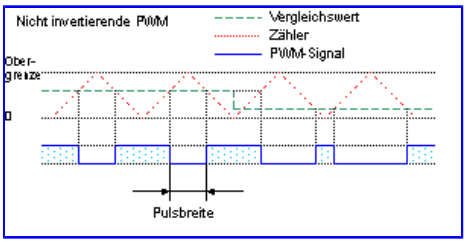
Wenn der Timer/Counter 1 in der PWM-Betriebsart betrieben wird, so bilden das Datenregister **TCNT1H**/**TCNT1L** und das Vergleichsregister **OCR1H**/**OCR1L** einen 8-, 9- oder 10-Bit, frei laufenden PWM-Modulator, welcher als PWM-Signal am **OC1**-Pin (**PB3** beim 2313) abgegriffen werden kann. Das Datenregister **TCNT1H**/**TCNT1L** wird dabei als Auf-/Ab-Zähler betrieben, welcher von 0 an aufwärts zählt bis zur Obergrenze und danach wieder zurück auf 0. Die Obergrenze ergibt sich daraus, ob 8-, 9- oder 10-Bit PWM verwendet wird, und zwar gemäß folgender Tabelle:

Auflösung	Obergrenze	Frequenz
8	255	f_{TC1} / 510
9	511	f_{TC1} / 1022
10	1023	f_{TC1} / 2046

Wenn nun der Zählerwert im Datenregister den in **OCR1H**/**OCR1L** gespeicherten Wert erreicht, wird der Ausgabepin **OC1** gesetzt bzw. gelöscht, je nach Einstellung von **COM1A1** und **COM1A0** im **TCCR1A**-Register.

Ich habe versucht, die entsprechenden Signale in der folgenden Grafik zusammenzufassen





Vergleichswert-Überprüfung

Hier wird in ein spezielles Vergleichswertregister (**OCR1H**/**OCR1L**) ein Wert eingeschrieben, welcher ständig mit dem aktuellen Zählerwert verglichen wird. Erreicht der Zähler den in diesem Register eingetragenen Wert, so kann ein Signal (0 oder 1) am Pin **OC1** erzeugt und/oder ein Interrupt ausgelöst werden.

Einfangen eines Eingangssignals (Input Capturing)

Bei dieser Betriebsart wird an den Input Capturing Pin (ICP) des Controllers eine Signalquelle angeschlossen. Nun kann je nach Konfiguration entweder ein Signalwechsel von 0 nach 1 (steigende Flanke) oder von 1 nach 0 (fallende Flanke) erkannt werden und der zu diesem Zeitpunkt aktuelle Zählerstand in ein spezielles Register abgelegt werden. Gleichzeitig kann auch ein entsprechender Interrupt ausgelöst werden. Wenn die Signalquelle ein starkes Rauschen beinhaltet, kann die Rauschunterdrückung eingeschaltet werden. Dann wird beim Erkennen der konfigurierten Flanke über 4 Taktzyklen das Signal überwacht und nur dann, wenn alle 4 Messungen gleich sind, wird die entsprechende Aktion ausgelöst.

Gemeinsame Register

Verschiedene Register beinhalten Zustände und Einstellungen, welche sowohl für den 8-Bit, als auch für den 16-Bit Timer/Counter in ein und demselben Register zu finden sind.

TIMSK	**T**imer/Counter **I**nterrupt **M**a**sk** Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	**TOIE1**	**OCIE1A**	**-**	**-**	**TICIE**	**-**	**TOIE0**	**-**
R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R	R/W	R
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0

TOIE1 (**T**imer/Counter **O**verflow **I**nterrupt **E**nable Timer/Counter **1**)

Wenn dieses Bit gesetzt ist, wird bei einem Überlauf des Datenregisters des Timer/Counter 1 ein Timer Overflow 1 Interrupt ausgelöst. Das Global Enable Interrupt Flag muss selbstverständlich auch gesetzt sein.

OCIE1A (**O**utput **C**ompare Match **I**nterrupt **E**nable Timer/Counter **1**)

Beim Timer/Counter 1 kann zusätzlich zum Überlauf ein Vergleichswert definiert werden.

Wenn dieses Bit gesetzt ist, wird beim Erreichen des Vergleichswertes ein Compare Match Interrupt ausgelöst. Das Global Enable Interrupt Flag muss selbstverständlich auch gesetzt sein.

TICIE (**T**imer/Counter **I**nput **C**apture **I**nterrupt **E**nable)

Wenn dieses Bit gesetzt ist, wird ein Capture Event Interrupt ausgelöst, wenn ein entsprechendes Signalereignis am Pin PD6(ICP) auftritt. Das Global Enable Interrupt Flag muss selbstverständlich auch gesetzt sein, wenn auch ein entsprechender Interrupt ausgelöst werden soll.

TOIE0 (**T**imer/Counter **O**verflow **I**nterrupt **E**nable Timer/Counter **0**)

Wenn dieses Bit gesetzt ist, wird bei einem Überlauf des Datenregisters des Timer/Counter 0 ein Timer Overflow 0 Interrupt ausgelöst. Das Global Enable Interrupt Flag muss selbstverständlich auch gesetzt sein.

TIFR

Timer/Counter **I**nterrupt **F**lag **R**egister

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	**TOV1**	**OCF1A**	**-**	**-**	**ICF1**	**-**	**TOV0**	**-**
R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R	R/W	R
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0

TOV1 (**T**imer/Counter **O**verflow Flag Timer/Counter **1**)

Dieses Bit wird vom Controller gesetzt, wenn beim Timer 1 ein Überlauf des Datenregisters stattfindet.

In der PWM-Betriebsart wird das Bit gesetzt, wenn die Zählrichtung von auf- zu abwärts und umgekehrt geändert wird (Zählerwert = 0).

Das Flag wird automatisch gelöscht, wenn der zugehörige Interrupt-Vektor aufgerufen wird. Es kann jedoch auch gelöscht werden, indem eine logische 1 (!) in das entsprechende Bit geschrieben wird.

OCF1A (**O**utput **C**ompare **F**lag Timer/Counter **1**)

Dieses Bit wird gesetzt, wenn der aktuelle Wert des Datenregisters von Timer/Counter 1 mit demjenigen im Vergleichsregister **OCR1** übereinstimmt.

Das Flag wird automatisch gelöscht, wenn der zugehörige Interrupt-Vektor aufgerufen wird. Es kann jedoch auch gelöscht werden, indem eine logische 1 (!) in das entsprechende Bit geschrieben wird.

ICF1 (**I**nput **C**apture **F**lag Timer/Counter **1**)

Dieses Bit wird gesetzt, wenn ein Capture-Ereignis aufgetreten ist, welches anzeigt, dass der Wert des Datenregisters des Timer/Counter 1 in das Input Capture Register ICR1 übertragen wurde.

Das Flag wird automatisch gelöscht, wenn der zugehörige Interrupt-Vektor aufgerufen wird. Es kann jedoch auch gelöscht werden, indem eine logische 1 (!) in das entsprechende Bit geschrieben wird.

TOV0 (**T**imer/Counter **O**verflow Flag Timer/Counter **0**)

Dieses Bit wird vom Controller gesetzt, wenn beim Timer 0 ein Überlauf des Datenregisters stattfindet.

Das Flag wird automatisch gelöscht, wenn der zugehörige Interrupt-Vektor aufgerufen wird. Es kann jedoch auch gelöscht werden, indem eine logische 1 (!) in das entsprechende Bit geschrieben wird.

Warteschleifen (delay.h)

Der Programmablauf kann verschiedene Arten von Wartefunktionen erfordern:

- Warten im Sinn von Zeitvertrödeln
- Warten auf einen bestimmten Zustand an den I/O-Pins
- Warten auf einen bestimmten Zeitpunkt (siehe Timer)
- Warten auf einen bestimmten Zählerstand (siehe Counter)

Der einfachste Fall, das Zeitvertrödeln, kann in vielen Fällen und mit großer Genauigkeit anhand der avr-libc Bibliotheksfunktionen _delay_ms() und _delay_us() erledigt werden. Die Bibliotheksfunktionen sind einfachen Zählschleifen (Warteschleifen) vorzuziehen, da leere Zählschleifen ohne besondere Vorkehrungen sonst bei eingeschalteter Optimierung vom avr-gcc-Compiler wegoptimiert werden. Weiterhin sind die Bibliotheksfunktionen bereits darauf vorbereitet, die in F_CPU definierte Taktfrequenz zu verwenden. Ausserdem sind die Funktionen der Bibliothek wirklich getestet.

Diese Bibliotheksfunktionen funktionieren allerdings nur dann korrekt, wenn sie mit zur Übersetzungszeit (beim Compilieren) bekannten konstanten Werten aufgerufen werden. Die Wartezeit der Funktion _delay_ms() ist auf 262,14ms/F_CPU (in MHz) begrenzt, d.h. bei 20 MHz kann man nur max. 13,1ms warten. Die Wartezeit der Funktion _delay_us() ist auf 768us/F_CPU (in MHz) begrenzt, d.h. bei 20 MHz kann man nur max. 38,4us warten. Längere Wartezeiten müssen dann über einen mehrfachen Aufruf in einer Schleife gelöst werden. Der Quellcode muss mit eingeschalteter Optimierung übersetzt werden, sonst wird sehr viel Maschinencode erzeugt und die Wartezeiten stimmen nicht mehr mit dem Parameter überein.

Beispiel: Blinken einer LED an PORTB Pin PB0 im ca. 1s Rhythmus

```
#include <avr/io.h>
#ifndef F_CPU
/* wenn F_CPU nicht bereits vorher definiert (z.B. durch
   Übergabe als Parameter zum Compiler innerhalb des Makefiles) */
#define F_CPU 3686400UL     /* Quarz mit 3.6864 Mhz */
#endif
#include <util/delay.h>     /* in älteren avr-libc Versionen <avr/delay.h> */

int main(void)
{
    unsigned char i;

    DDRB = (1<<PB0);          // PB0 an PORTB als Ausgang setzen

    while(1)                  // Für immer
    {
        PORTB ^= (1 << PB0);  // Toggle PB0 z.B. angeschlossene LED

        /*
           Eine ungefähre Sekunde warten...

           Die maximale Zeit pro Funktionsaufruf ist begrenzt auf
           262.14 ms / F_CPU in MHz (im Beispiel:
           262.1 / 3.6864 = max. 71 ms)
```

```
            Daher wird die kleine Warteschleife mehrfach aufgerufen,
            um auf eine längere Wartezeit zu kommen. Die zusätzliche
            Prüfung der Schleifenbedingung lässt die Wartezeit geringfügig
            ungenau werden (macht hier vielleicht 2-3ms aus).

            100 * 10ms (+ Zeit für Schleife) = ca. eine Sekunde warten
        */
        for (i=1; i<=100; i++)
            _delay_ms(10);
    }

    return 0;
}
```

Einfach!? Schon, aber während gewartet wird, macht der µC nichts anderes mehr. Die Wartefunktion blockiert den Programmablauf. Möchte man einerseits warten, um z.B. eine LED blinken zu lassen und gleichzeitig andere Aktionen ausführen z.B. weitere LED bedienen, sollten die Timer/Counter des AVR verwendet werden.

Sleep-Modes

AVR Controller verfügen über eine Reihe von sogenannten *Sleep-Modes* ("Schlaf-Modi"). Diese ermöglichen es, Teile des Controllers abzuschalten. Zum Einen kann damit besonders bei Batteriebetrieb Strom gespart werden, zum Anderen können Komponenten des Controllers deaktiviert werden, die die Genauigkeit des Analog-Digital-Wandlers bzw. des Analog-Comparators negativ beeinflussen. Der Controller wird durch Interrupts aus dem Schlaf geweckt. Welche Interrupts den jeweiligen Schlafmodus beenden, ist einer Tabelle im Datenblatt des jeweiligen Controllers zu entnehmen. Die Funktionen der avr-libc stehen nach Einbinden der header-Datei *sleep.h* zur Verfügung.

- **set_sleep_mode(uint8_t mode)**

  Setzt den Schlafmodus, der bei Aufruf von sleep() aktiviert wird. In sleep.h sind einige Konstanten definiert (z.B. SLEEP_MODE_PWR_DOWN). Die definierten Modi werden jedoch nicht alle von sämtlichten AVR-Controllern unterstützt.

- **sleep_mode()**

  Versetzt den Controller in den mit set_sleep_mode gewählten Schlafmodus.

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/sleep.h>
...
   set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN);
   sleep_mode();

   // Code hier wird erst nach Auftreten eines entsprechenden
   // "Aufwach-Interrupts" verarbeitet
...
```

In älteren Versionenen der avr-libc wurden nicht alle AVR-Controller durch die sleep-Funktionen richtig angesteuert. Mit avr-libc 1.2.0 wurde die Anzahl der unterstützten Typen jedoch deutlich erweitert. Bei nicht-unterstützten Typen erreicht man die gewünschte Funktionalität durch direkte "Bitmanipulation" der entsprechenden Register (vgl. Datenblatt) und Aufruf des Sleep-Befehls via Inline-Assembler:

```
#include <avr/io.h>
...
   // Sleep-Mode "Power-Save" beim ATmega169 "manuell" aktivieren
   SMCR = (3<<SM0) | (1<<SE);
   asm volatile ("sleep"::);
...
```

- siehe auch: Dokumentation der avr-libc Abschnitt Modules/Power Management and Sleep-Modes

Der Watchdog

Und hier kommt das ultimative Mittel gegen die Unvollkommenheit von uns Programmierern, der Watchdog.

So sehr wir uns auch anstrengen, es wird uns kaum je gelingen, das absolut perfekte und fehlerfreie Programm zu entwickeln.

Der Watchdog kann uns zwar auch nicht zu besseren Programmen verhelfen aber er kann dafür sorgen, dass unser Programm, wenn es sich wieder mal in's Nirwana verabschiedet hat, neu gestartet wird, indem ein Reset des Controllers ausgelöst wird.

Betrachten wir doch einmal folgende Codesequenz:

```
uint8_t x;

x = 10;

while (x >= 0)
{
  // tu was

  x--;
}
```

Wenn wir die Schleife mal genau anschauen sollte uns auffallen, dass dieselbe niemals beendet wird. Warum nicht? Ganz einfach, weil eine als ***unsigned*** deklarierte Variable niemals kleiner als Null werden kann (der Compiler sollte jedoch eine ensprechende Warnung ausgeben). Das Programm würde sich also hier aufhängen und auf ewig in der Schleife drehen. Und hier genau kommt der Watchdog zum Zug.

Wie funktioniert nun der Watchdog?

Der Watchdog enthält einen separaten Timer/Counter, welcher mit einem intern erzeugten Takt von 1 MHz bei 5V Vcc getaktet wird. Einige Controller haben einen eigenen Watchdog Oszillator, z.B. der Tiny2313 mit 128kHz. Nachdem der Watchdog aktiviert und der gewünschte Vorteiler eingestellt wurde, beginnt der Counter von 0 an hochzuzählen. Wenn nun die je nach Vorteiler eingestellte Anzahl Zyklen erreicht wurde, löst der Watchdog einen Reset aus. Um nun also im Normalbetrieb den Reset zu verhindern, müssen wir den Watchdog regelmäßig wieder neu starten bzw. rücksetzen (Watchdog Reset). Dies sollte innerhalb unserer Hauptschleife passieren.

Um ein unbeabsichtigtes Ausschalten des Watchdogs zu verhindern, muss ein spezielles Prozedere verwendet werden, um den WD auszuschalten. Es müssen zuerst die beiden Bits WDTOE und WDE in einer einzelnen Operation (also nicht mit sbi) auf 1 gesetzt werden. Dann muss innerhalb der nächsten 4 Taktzyklen das Bit WDE auf 0 gesetzt werden.

Das Watchdog Control Register:

WDTCR

Watchog **T**imer **C**ontrol **R**egister

In diesem Register stellen wir ein, wie wir den Watchdog verwenden möchten.

Das Register ist wie folgt aufgebaut:

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	-	-	-	**WDTOE**	**WDE**	**WDP2**	**WDP1**	**WDP0**
R/W	R	R	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0

WDTOE (**W**atch**d**og **T**urn **O**ff **E**nable)

Dieses Bit muss gesetzt sein, wenn das Bit **WDE** gelöscht wird, andernfalls wird der Watchdog nicht ausgeschaltet.
Wenn das Bit einmal gesetzt ist, wird es von der Hardware nach 4 Taktzyklen automatisch wieder gelöscht.

WDE (**W**atch**d**og **E**nable)

Wenn dieses Bit gesetzt wird, so wird der Watchdog aktiviert.
Das Bit kann nur gelöscht werden, solange das Bit **WDTOE** auf 1 steht.

WDP2, **WDP1**, **WDP0** (**W**atch**d**og Timer **P**rescaler Bits)

Diese 3 Bits bestimmen die Anzahl Oszillatorzyklen für den Watchdog, also, wie lange es dauert, bis ein Reset ausgelöst wird:

WDP2	WDP1	WDP0	Anzahl Zyklen	Typ. Timeoutzeit bei Vcc = 3V	Typ. Timeoutzeit bei Vcc = 5V
0	0	0	16K	47ms	15ms
0	0	1	32K	94ms	30ms
0	1	0	64K	0.19s	60ms
0	1	1	128K	0.38s	0.12s
1	0	0	256K	0.75s	0.24s
1	0	1	512K	1.5s	0.49s
1	1	0	1024K	3s	0.97s
1	1	1	2048K	6s	1.9s

Um den Watchdog mit dem AVR-GCC Compiler zu verwenden, muss die Headerdatei *wdt.h* (*#include <avr/wdt.h>*) in die Quelldatei eingebunden werden. Danach können die folgenden Funktionen verwendet werden:

- **wdt_enable(uint8_t timeout)**

  Aktiviert den Watchdog und stellt den Vorteiler auf den gewünschten Wert ein bzw. der in timeout übergebene Wert wird in das WDTCR-Register eingetragen. Einige Timeout-Werte sind als Konstanten vordefiniert Mögliche Timeoutwerte:

Konstante	Wert	TimeOut
WDTO_15MS	0	15 ms
WDTO_30MS	1	30 ms
WDTO_60MS	2	60 ms
WDTO_120MS	3	120 ms
WDTO_250MS	4	250 ms
WDTO_500MS	5	500 ms
WDTO_1S	6	1 S
WDTO_2S	7	2s

- **wdt_disable()**

  Mit dieser Funktion kann der Watchdog ausgeschaltet werden. Dabei wird das notwendige Prozedere, wie oben beschrieben, automatisch ausgeführt.

- **wdt_reset()**

  Dies ist wohl die wichtigste der Watchdog-Funktionen. Sie erzeugt einen Watchdog-Reset, welcher periodisch, und zwar vor Ablauf der Timeoutzeit, ausgeführt werden muss, damit der Watchdog nicht den AVR zurücksetzt.

Selbstverständlich kann das **WDTCR**-Register auch mit den uns bereits bekannten Funktionen für den Zugriff auf Register programmiert werden.

Watchdog-Anwendungshinweise

Ob nun der Watchdog als Schutzfunktion überhaupt verwendet werden soll, hängt stark von der Anwendung, der genutzten Peripherie und dem Umfang und der Qualitätssicherung des Codes ab. Will man sicher gehen, dass ein

Programm sich nicht in einer Endlosschleife verfängt, ist der Wachdog das geeignete Mittel dies zu verhindern. Weiterhin kann bei geschickter Programmierung der Watchdog dazu genutzt werden, bestimmte Stromsparfunktionen zu implementieren. Bei einigen neueren AVRs (z.B. dem ATTiny13) kann der Watchdog auch direkt als Timer genutzt werden, der den Controller aus einem Schlafmodus aufweckt. Auch dies kann im **WDTCR**-Register eingestellt werden. Außerdem bietet der WD die einzige Möglichkeit einen beabsichtigten System-Reset (ein "richtiger Reset", kein "jmp 0x0000") ohne externe Beschaltung auszulösen, was z.B. bei der Implementierung eines Bootloaders nützlich ist. Bei bestimmten Anwendungen kann die Nutzung des WD als "ultimative Deadlock-Sicherung für nicht bedachte Zustände" natürlich immer als zusätzliche Sicherung dienen.

Es besteht die Möglichkeit herauszufinden, ob ein Reset durch den Watchdog ausgelöst wurde (beim ATmega16 z.B. Bit WDRF in MCUCSR). Diese Information sollte auch genutzt werden, falls ein WD-Reset in der Anwendung nicht planmäßig implementiert wurde. Zum Beispiel kann man eine LED an einen freien Pin hängen, die nur bei einem Reset durch den WD aufleuchtet oder aber das "Ereignis WD-Reset" im internen EEPROM des AVR absichern, um die Information später z.B. über UART oder ein Display auszugeben (oder einfach den EEPROM-Inhalt über die ISP/JTAG-Schnittstelle auslesen).

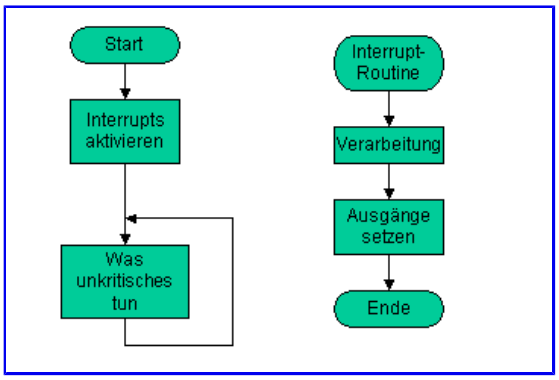
Siehe auch:

- Dokumentation der avr-libc Abschnitt Modules/Watchdog timer handling
- Bug in ATtiny2313?

Programmieren mit Interrupts

Nachdem wir nun alles Wissenswerte für die serielle Programmerstellung gelernt haben nehmen wir jetzt ein völlig anderes Thema in Angriff, nämlich die Programmierung unter Zuhilfenahme der Interrupts des AVR.

Als erstes wollen wir uns noch einmal den allgemeinen Programmablauf bei der Interrupt-Programmierung zu Gemüte führen.



Man sieht, dass die Interruptroutine quasi parallel zum Hauptprogramm abläuft. Da wir nur eine CPU haben ist es natürlich keine echte Parallelität, sondern das Hauptprogramm wird beim Eintreffen eines Interrupts unterbrochen, die Interruptroutine wird ausgeführt und danach erst wieder zum Hauptprogramm zurückgekehrt.

Ausführlicher Thread im Forum

Anforderungen an Interrupt-Routinen

Um unliebsamen Überraschungen vorzubeugen, sollten einige Grundregeln bei der Implementierung der Interruptroutinen beachtet werden. Interruptroutinen soll möglichst kurz und schnell abarbeitbar sein, daraus folgt:

- Keine umfangreichen Berechnungen innerhalb der Interruptroutine. (*)
- Keine langen Programmschleifen.
- Obwohl es möglich ist, während der Abarbeitung einer Interruptroutine andere oder sogar den gleichen Interrupt wieder zuzulassen, wird davon ohne genaue Kenntnis der internen Abläufe dringend abgeraten.

Interruptroutinen (ISRs) sollten also möglichst kurz sein und keine Schleifen mit vielen Durchläufen enthalten. Längere Operationen können meist in einen "Interrupt-Teil" in einer ISR und einen "Arbeitsteil" im Hauptprogramm

aufgetrennt werden. Z.B. Speichern des Zustands aller Eingänge im EEPROM in bestimmten Zeitabständen: ISR-Teil: Zeitvergleich (Timer,RTC) mit Logzeit/-intervall. Bei Übereinstimmung ein globales Flag setzen (volatile bei Flag-Deklaration nicht vergessen, s.u.). Dann im Hauptprogramm prüfen, ob das Flag gesetzt ist. Wenn ja: die Daten im EEPROM ablegen und Flag löschen.

(*) Hinweis: Es gibt allerdings die seltene Situation, dass man gerade eingelesene ADC-Werte sofort verarbeiten muss. Besonders dann, wenn man mehrere Werte sehr schnell hintereinander bekommt. Dann bleibt einem nichts anderes übrig, als die Werte noch in der ISR zu verarbeiten. Kommt aber sehr selten vor und sollte durch geeignete Wahl des Systemtaktes bzw. Auswahl des Controllers vermieden werden!

Interrupt-Quellen

Die folgenden Ereignisse können einen Interrupt auf einem AVR AT90S2313 auslösen, wobei die Reihenfolge der Auflistung auch die Priorität der Interrupts aufzeigt.

- Reset
- Externer Interrupt 0
- Externer Interrupt 1
- Timer/Counter 1 Capture Ereignis
- Timer/Counter 1 Compare Match
- Timer/Counter 1 Überlauf
- Timer/Counter 0 Überlauf
- UART Zeichen empfangen
- UART Datenregister leer
- UART Zeichen gesendet
- Analoger Komparator

Die Anzahl der möglichen Interruptquellen variiert zwischen den verschiedenen Typen. Im Zweifel hilft ein Blick ins Datenblatt ("Interrupt Vectors").

Register

Der AT90S2313 verfügt über 2 Register die mit den Interrupts zusammen hängen.

<table>
<tr><td>GIMSK</td><td>
General Interrupt Mask Register.
<table>
<tr><td>Bit</td><td>7</td><td>6</td><td>5</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Name</td><td>INT1</td><td>INT0</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>R/W</td><td>R/W</td><td>R/W</td><td>R</td><td>R</td><td>R</td><td>R</td><td>R</td><td>R</td></tr>
<tr><td>Initialwert</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr>
</table>
INT1 (External Interrupt Request 1 Enable)

Wenn dieses Bit gesetzt ist, wird ein Interrupt ausgelöst, wenn am INT1-Pin eine steigende oder fallende (je nach Konfiguration im MCUCR) Flanke erkannt wird.
Das Global Enable Interrupt Flag muss selbstverständlich auch gesetzt sein.
Der Interrupt wird auch ausgelöst, wenn der Pin als Ausgang geschaltet ist. Auf diese Weise bietet sich die Möglichkeit, Software-Interrupts zu realisieren.

INT0 (External Interrupt Request 0 Enable)

Wenn dieses Bit gesetzt ist, wird ein Interrupt ausgelöst, wenn am INT0-Pin eine steigende oder fallende (je nach Konfiguration im MCUCR) Flanke erkannt wird.
Das Global Enable Interrupt Flag muss selbstverständlich auch gesetzt sein.
Der Interrupt wird auch ausgelöst, wenn der Pin als Ausgang geschaltet ist. Auf diese Weise bietet sich die Möglichkeit, Software-Interrupts zu realisieren.
</td></tr>
</table>

GIFR

General **I**nterrupt **F**lag **R**egister.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	**INTF1**	**INTF0**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
R/W	R/W	R/W	R	R	R	R	R	R
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0

INTF1 (External **Int**errupt Flag **1**)

Dieses Bit wird gesetzt, wenn am **INT1**-Pin eine Interrupt-Kondition, entsprechend der Konfiguration, erkannt wird. Wenn das Global Enable Interrupt Flag gesetzt ist, wird die Interruptroutine angesprungen.
Das Flag wird automatisch gelöscht, wenn die Interruptroutine beendet ist. Alternativ kann das Flag gelöscht werden, indem der Wert **1(!)** eingeschrieben wird.

INTF0 (External **Int**errupt Flag **0**)

Dieses Bit wird gesetzt, wenn am **INT0**-Pin eine Interrupt-Kondition, entsprechend der Konfiguration, erkannt wird. Wenn das Global Enable Interrupt Flag gesetzt ist, wird die Interruptroutine angesprungen.
Das Flag wird automatisch gelöscht, wenn die Interruptroutine beendet ist. Alternativ kann das Flag gelöscht werden, indem der Wert **1(!)** eingeschrieben wird.

MCUCR

MCU Control **R**egister.

Das MCU Control Register enthält Kontrollbits für allgemeine MCU-Funktionen.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	**-**	**-**	**SE**	**SM**	**ISC11**	**ISC10**	**ISC01**	**ISC00**
R/W	R	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0

SE (**S**leep **E**nable)

Dieses Bit muss gesetzt sein, um den Controller mit dem **SLEEP**-Befehl in den Schlafzustand versetzen zu können.
Um den Schlafmodus nicht irrtümlich einzuschalten, wird empfohlen, das Bit erst unmittelbar vor Ausführung des **SLEEP**-Befehls zu setzen.

SM (**S**leep **M**ode)

Dieses Bit bestimmt der Schlafmodus.
Ist das Bit gelöscht, so wird der **Idle**-Modus ausgeführt. Ist das Bit gesetzt, so wird der **Power-Down**-Modus ausgeführt. (für andere AVR Controller siehe Abschnitt "Sleep-Mode")

ISC11, **ISC10** (**I**nterrupt **S**ense **C**ontrol **1** Bits)

Diese beiden Bits bestimmen, ob die steigende oder die fallende Flanke für die Interrupterkennung am **INT1**-Pin ausgewertet wird.

ISC11	**ISC10**	**Bedeutung**
0	0	Low Level an **INT1** erzeugt einen Interrupt. In der Beschreibung heißt es, der Interrupt wird getriggert, solange der Pin auf 0 bleibt, also eigentlich unbrauchbar.
0	1	Reserviert
1	0	Die fallende Flanke an **INT1** erzeugt einen Interrupt.

1	1	Die steigende Flanke an **INT1** erzeugt einen Interrupt.

ISC01, **ISC00** (**I**nterrupt **S**ense **C**ontrol **0** Bits)

Diese beiden Bits bestimmen, ob die steigende oder die fallende Flanke für die Interrupterkennung am **INT0**-Pin ausgewertet wird.

ISC01	ISC00	Bedeutung
0	0	Low Level an **INT0** erzeugt einen Interrupt. In der Beschreibung heißt es, der Interrupt wird getriggert, solange der Pin auf 0 bleibt, also eigentlich unbrauchbar.
0	1	Reserviert
1	0	Die fallende Flanke an **INT0** erzeugt einen Interrupt.
1	1	Die steigende Flanke an **INT0** erzeugt einen Interrupt.

Allgemeines über die Interrupt-Abarbeitung

Wenn ein Interrupt eintrifft, wird automatisch das **Global Interrupt Enable** Bit im Status Register **SREG** gelöscht und alle weiteren Interrupts unterbunden. Obwohl es möglich ist, zu diesem Zeitpunkt bereits wieder das GIE-bit zu setzen, rate ich dringend davon ab. Dieses wird nämlich automatisch gesetzt, wenn die Interruptroutine beendet wird. Wenn in der Zwischenzeit weitere Interrupts eintreffen, werden die zugehörigen Interrupt-Bits gesetzt und die Interrupts bei Beendigung der laufenden Interrupt-Routine in der Reihenfolge ihrer Priorität ausgeführt. Dies kann eigentlich nur dann zu Problemen führen, wenn ein hoch priorisierter Interrupt ständig und in kurzer Folge auftritt. Dieser sperrt dann möglicherweise alle anderen Interrupts mit niedrigerer Priorität. Dies ist einer der Gründe, weshalb die Interrupt-Routinen sehr kurz gehalten werden sollen.

Interrupts mit dem AVR GCC Compiler (WinAVR)

Funktionen zur Interrupt-Verarbeitung werden in den Includedateien *interrupt.h* der avr-libc zur Verfügung gestellt (bei älterem Quellcode zusätzlich *signal.h*).

```
// fuer sei(), cli() und ISR():
#include <avr/interrupt.h>
```

Das Makro **sei()** schaltet die Interrupts ein. Eigentlich wird nichts anderes gemacht, als das **Global Interrupt Enable** Bit im Status Register gesetzt.

```
    sei();
```

Das Makro **cli()** schaltet die Interrupts aus, oder anders gesagt, das **Global Interrupt Enable** Bit im Status Register wird gelöscht.

```
    cli();
```

Oft steht man vor der Aufgabe, dass eine Codesequenz nicht unterbrochen werden darf. Es liegt dann nahe, zu Beginn dieser Sequenz ein cli() und am Ende ein sei() einzufügen. Dies ist jedoch ungünstig, wenn die Interrupts vor Aufruf der Sequenz deaktiviert waren und danach auch weiterhin deaktiviert bleiben sollen. Ein sei() würde ungeachtet des vorherigen Zustands die Interrups aktivieren, was zu unerwünschten Seiteneffekten führen kann. Die aus dem folgenden Beispiel ersichtliche Vorgehensweise ist in solchen Fällen vorzuziehen:

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <inttypes.h>

//...
```

```
void NichtUnterbrechenBitte(void)
{
   uint8_t tmp_sreg;  // temporaerer Speicher fuer das Statusregister

   tmp_sreg = SREG;   // Statusregister (also auch das I-Flag darin) sichern
   cli();             // Interrupts global deaktivieren

   /* hier "unterbrechnungsfreier" Code */

   /* Beispiel Anfang
     JTAG-Interface eines ATmega16 per Software deaktivieren
     und damit die JTAG-Pins an PORTC für "general I/O" nutzbar machen
     ohne die JTAG-Fuse-Bit zu aendern. Dazu ist eine "timed sequence"
     einzuhalten (vgl Datenblatt ATmega16, Stand 10/04, S. 229):
     Das JTD-Bit muss zweimal innerhalb von 4 Taktzyklen geschrieben
     werden. Ein Interrupt zwischen den beiden Schreibzugriffen wuerde
     die erforderliche Sequenz "brechen", das JTAG-Interface bliebe
     weiterhin aktiv und die IO-Pins weiterhin für JTAG reserviert. */

   MCUCSR |= (1<<JTD);
   MCUCSR |= (1<<JTD); // 2 mal in Folge ,vgl. Datenblatt fuer mehr Information

   /* Beispiel Ende */

   SREG = tmp_sreg;     // Status-Register wieder herstellen
                       // somit auch das I-Flag auf gesicherten Zustand setzen
}

void NichtSoGut(void)
{
   cli();

   /* hier "unterbrechnungsfreier" Code */

   sei();
}


int main(void)
{
   //...

   cli();
   // Interrupts global deaktiviert

   NichtUnterbrechenBitte();
   // auch nach Aufruf der Funktion deaktiviert

   sei();
   // Interrupts global aktiviert

   NichtUnterbrechenBitte();
   // weiterhin aktiviert
   //...

   /* Verdeutlichung der unguenstigen Vorgehensweise mit cli/sei: */
   cli();
   // Interrupts jetzt global deaktiviert

   NichtSoGut();
   // nach Aufruf der Funktion sind Interrupts global aktiviert
   // dies ist mglw. ungewollt!
   //...

}
```

Nachdem nun die Interrupts aktiviert sind, braucht es selbstverständlich noch den auszuführenden Code, der ablaufen soll, wenn ein Interrupt eintrifft. Dazu existiert die Definition (ein Makro) **ISR**. SIGNAL sollte nicht mehr genutzt werden, zur Portierung von SIGNAL nach ISR siehe Abschnitt (TODO: verlinken) im Anhang.

ISR

(*ISR()* ersetzt bei neueren Versionen der avr-libc *SIGNAL()*. vgl. Anhang)

```
#include <avr/interrupt.h>
//...
ISR(Vectorname) /* vormals: SIGNAL(siglabel) dabei Vectorname != siglabel ! */
{
    /* Interrupt Code */
}
```

Mit *ISR* wird eine Funktion für die Bearbeitung eines Interrupts eingeleitet. Als Argument muss dabei die Benennung des entsprechenden Interruptvektors angegeben werden. Diese sind in den jeweiligen Includedateien IOxxxx.h zu finden. Die Bezeichnung entspricht dem Namen aus dem Datenblatt, bei dem die Leerzeichen durch Unterstriche ersetzt sind und ein *_vect* angehängt ist.

Als Beispiel ein Ausschnitt aus der Datei für den ATmega8 (bei WinAVR Standardinstallation in C:\WinAVR\avr\include\avr\iom8.h) in der neben den aktuellen Namen für *ISR* (*_vect) noch die Bezeichnungen für das inzwischen nicht mehr aktuelle *SIGNAL* (SIG_*) enthalten sind.

```
//...
/* $Id: iom8.h,v 1.13 2005/10/30 22:11:23 joerg_wunsch Exp $ */

/* avr/iom8.h - definitions for ATmega8 */
//...

/* Interrupt vectors */

/* External Interrupt Request 0 */
#define INT0_vect                       _VECTOR(1)
#define SIG_INTERRUPT0                  _VECTOR(1)

/* External Interrupt Request 1 */
#define INT1_vect                       _VECTOR(2)
#define SIG_INTERRUPT1                  _VECTOR(2)

/* Timer/Counter2 Compare Match */
#define TIMER2_COMP_vect                _VECTOR(3)
#define SIG_OUTPUT_COMPARE2             _VECTOR(3)

/* Timer/Counter2 Overflow */
#define TIMER2_OVF_vect                 _VECTOR(4)
#define SIG_OVERFLOW2                   _VECTOR(4)

/* Timer/Counter1 Capture Event */
#define TIMER1_CAPT_vect                _VECTOR(5)
#define SIG_INPUT_CAPTURE1              _VECTOR(5)

/* Timer/Counter1 Compare Match A */
#define TIMER1_COMPA_vect               _VECTOR(6)
#define SIG_OUTPUT_COMPARE1A            _VECTOR(6)

/* Timer/Counter1 Compare Match B */
#define TIMER1_COMPB_vect               _VECTOR(7)
#define SIG_OUTPUT_COMPARE1B            _VECTOR(7)

//...
```

Mögliche Funktionsrümpfe für Interruptfunktionen sind zum Beispiel:

```
#include <avr/interrupt.h>
/* veraltet: #include <avr/signal.h> */

ISR(INT0_vect)       /* veraltet: SIGNAL(SIG_INTERRUPT0) */
{
    /* Interrupt Code */
}

ISR(TIMER0_OVF_vect) /* veraltet: SIGNAL(SIG_OVERFLOW0) */
{
    /* Interrupt Code */
}

ISR(USART_RXC_vect) /* veraltet: SIGNAL(SIG_UART_RECV) */
```

```
{
    /* Interrupt Code */
}

// und so weiter und so fort...
```

Auf die korrekte Schreibweise der Vektorbezeichnung ist zu achten. Der gcc-Compiler prüft erst ab Version 4.x, ob ein Signal/Interrupt der angegebenen Bezeichnung tatsächlich in der Includedatei definiert ist und gibt andernfalls eine Warnung aus. Bei WinAVR (ab 2/2005) wurde die Überprüfung auch in den mitgelieferten Compiler der Version 3.x integriert. Aus dem gcc-Quellcode Version 3.x selbst erstellte Compiler enthalten die Prüfung nicht (vgl. AVR-GCC).

Während der Ausführung der Funktion sind alle weiteren Interrupts automatisch gesperrt. Beim Verlassen der Funktion werden die Interrupts wieder zugelassen.

Sollte während der Abarbeitung der Interruptroutine ein weiterer Interrupt (gleiche oder andere Interruptquelle) auftreten, so wird das entsprechende Bit im zugeordneten Interrupt Flag Register gesetzt und die entsprechende Interruptroutine automatisch nach dem Beenden der aktuellen Funktion aufgerufen.

Ein Problem ergibt sich eigentlich nur dann, wenn während der Abarbeitung der aktuellen Interruptroutine mehrere gleichartige Interrupts auftreten. Die entsprechende Interruptroutine wird im Nachhinein zwar aufgerufen jedoch wissen wir nicht, ob nun der entsprechende Interrupt einmal, zweimal oder gar noch öfter aufgetreten ist. Deshalb soll hier noch einmal betont werden, dass Interruptroutinen so schnell wie nur irgend möglich wieder verlassen werden sollten.

Unterbrechbare Interruptroutinen

"Faustregel": im Zweifel **ISR**. Die nachfolgend beschriebene Methode nur dann verwenden, wenn man sich über die unterschiedliche Funktionsweise im Klaren ist.

```
#include <avr/interrupt.h>
//...
void XXX_vect(void) __attribute__((interrupt));
void XXX_vect(void) {
  //...
}
```

Hierbei steht XXX für den oben beschriebenen Namen des Vektors (also z.B. *void TIMER0_OVF_vect(void)*...). Der Unterschied im Vergleich zu ISR ist, dass hier beim Aufrufen der Funktion das **Global Enable Interrupt** Bit automatisch wieder gesetzt und somit weitere Interrupts zugelassen werden. Dies kann zu nicht unerheblichen Problemen von im einfachsten Fall einem Stack overflow bis zu sonstigen unerwarteten Effekten führen und sollte wirklich **nur dann** angewendet werden, wenn man sich absolut sicher ist, das Ganze auch im Griff zu haben.

siehe auch: Hinweise in AVR-GCC

siehe dazu: http://www.nongnu.org/avr-libc/user-manual/group__avr__interrupts.html

Datenaustausch mit Interrupt-Routinen

Variablen die sowohl in Interrupt-Routinen (ISR = Interrupt Service Routine(s)), als auch vom übrigen Programmcode geschrieben oder gelesen werden, müssen mit einem **volatile** deklariert werden. Damit wird dem Compiler mitgeteilt, dass der Inhalt der Variablen vor jedem Lesezugriff aus dem Speicher gelesen und nach jedem Schreibzugriff in den Speicher geschrieben wird. Ansonsten könnte der Compiler den Code so optimieren, dass der Wert der Variablen nur in Prozessorregistern zwischengespeichert wird, die nichts von der Änderung woanders mitbekommen.

Zur Veranschaulichung ein Codefragment für eine Tastenentprellung mit Erkennung einer "lange gedrückten" Taste.

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <stdint.h>
//...

// Schwellwerte
// Entprellung:
```

```
#define CNTDEBOUNCE 10
// "lange gedrueckt:"
#define CNTREPEAT 200

// hier z.B. Taste an Pin2 PortA "active low" = 0 wenn gedrueckt
#define KEY_PIN  PINA
#define KEY_PINNO PA2

// beachte: volatile!
volatile uint8_t gKeyCounter;

// Timer-Compare Interrupt ISR, wird z.B. alle 10ms ausgefuehrt
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
   // hier wird gKeyCounter veraendert. Die übrigen
   // Programmteile müssen diese Aenderung "sehen":
   // volatile -> aktuellen Wert immer in den Speicher schreiben
   if ( !(KEY_PIN & (1<<KEY_PINNO)) ) {
      if (gKeyCounter < CNTREPEAT) gKeyCounter++;
   }
   else {
      gKeyCounter = 0;
   }
}

//...

int main(void)
{
//...
    /* hier: Initialisierung der Ports und des Timer-Interrupts */
//...
   // hier wird auf gKeyCounter zugegriffen. Dazu muss der in der
   // ISR geschriebene Wert bekannt sein:
   // volatile -> aktuellen Wert immer aus dem Speicher lesen
   if ( gKeyCounter > CNTDEBOUNCE ) { // Taste mind. 10*10 ms "prellfrei"
       if (gKeyCounter == CNTREPEAT) {
          /* hier: Code fuer "Taste lange gedrueckt" */
       }
       else {
          /* hier: Code fuer "Taste kurz gedrueckt" */
       }
   }
//...
}
```

Bei Variablen größer ein Byte, auf die in Interrupt-Routinen und im Hauptprogramm zugegriffen wird, muss darauf geachtet werden, dass die Zugriffe auf die einzelnen Bytes außerhalb der ISR nicht durch einen Interrupt unterbrochen werden. (Allgemeinplatz: AVRs sind 8-bit Controller). Zur Veranschaulichung ein Codefragment:

```
//...
volatile uint16_t gMyCounter16bit
//...
ISR(...)
{
//...
   gMyCounter16Bit++;
//...
}

int main(void)
{
   uint16_t tmpCnt;
//...
   // nicht gut: Mglw. hier ein Fehler, wenn ein Byte von MyCounter
   // schon in tmpCnt kopiert ist aber vor dem Kopieren des zweiten Bytes
   // ein Interrupt auftritt, der den Inhalt von MyCounter verändert.
   tmpCnt = gMyCounter16bit;


   // besser: Änderungen "außerhalb" verhindern -> alle "Teilbytes"
   // bleiben konsistent
   cli();  // Interupts deaktivieren
   tmpCnt = gMyCounter16Bit;
   sei();  // wieder aktivieren
```

```
   // oder: vorheriger Status des globalen Interrupt-Flags bleibt erhalten
   uint8_t sreg_tmp;
   sreg_tmp = SREG;    /* Sichern */
   cli()
   tmpCnt = gMyCounter16Bit;
   SREG = sreg_tmp;    /* Wiederherstellen */
//...
}
```

Interrupt-Routinen und Registerzugriffe

Falls Register sowohl im Hauptprogramm als auch in Interrupt-Routinen verändert werden, ist darauf zu achten, dass diese Zugriffe sich nicht überlappen. Nur wenige Anweisungen lassen sich in sogenannte "atomare" Zugriffe übersetzen, die nicht von Interrupt-Routinen unterbrochen werden können.

Zur Veranschaulichung eine Anweisung, bei der ein Bit und im Anschluss drei Bits in einem Register gesetzt werden:

```
#include <avr/io.h>

int main(void)
{
//...
        PORTA |= (1<<PA0);

        PORTA |= (1<<PA2)|(1<<PA3)|(1<<PA4);
//...
}
```

Der Compiler übersetzt diese Anweisungen für einen ATmega128 bei Optimierungsstufe "S" nach:

```
...
        PORTA |= (1<<PA0);
  d2:   d8 9a           sbi     0x1b, 0 ; 27 (a)

        PORTA |= (1<<PA2)|(1<<PA3)|(1<<PA4);
  d4:   8b b3           in      r24, 0x1b       ; 27 (b)
  d6:   8c 61           ori     r24, 0x1C       ; 28 (c)
  d8:   8b bb           out     0x1b, r24       ; 27 (d)
...
```

Das Setzen des einzelnen Bits wird bei eingeschalteter Optimierung für Register im unteren Speicherbereich in eine einzige Assembler-Anweisung (sbi) übersetzt und ist nicht anfällig für Unterbrechnungen durch Interrupts. Die Anweisung zum Setzen von drei Bits wird jedoch in drei abhängige Assembler-Anweisungen übersetzt und bietet damit zwei "Angriffspunkte" für Unterbrechnungen. Eine Interrupt-Routine könnte nach dem Laden des Ausgangszustands in den Zwischenspeicher (hier Register 24) den Wert des Registers ändern, z.B. ein Bit löschen. Damit würde der Zwischenspeicher nicht mehr mit dem tatsächlichen Zustand übereinstimmen aber dennoch nach der Bitoperation (hier ori) in das Register zurückgeschrieben.

Beispiel: PORTA sei anfangs 0b00000000. Die erste Anweisung (a) setzt Bit 0, PORTA ist danach 0b00000001. Nun wird im ersten Teil der zweiten Anweisung der Portzustand in ein Register eingelesen (b). Unmittelbar darauf (vor (c)) "feuert" ein Interrupt, in dessen Interrupt-Routine Bit 0 von PORTA gelöscht wird. Nach Verlassen der Interrupt-Routine hat PORTA den Wert 0b00000000. In den beiden noch folgenden Anweisungen des Hauptprogramms wird nun der zwischengespeicherte "alte" Zustand 0b00000001 mit 0b00011100 logisch-oder-verknüft (c) und das Ergebnis 0b00011101 in PortA geschrieben (d). Obwohl zwischenzeitlich Bit 0 gelöscht wurde, ist es nach (d) wieder gesetzt.

Lösungsmöglichkeiten:

- Register ohne besondere Vorkehrungen nicht in Interruptroutinen *und* im Hauptprogramm verändern.
- Interrupts vor Veränderungen in Registern, die auch in ISRs verändert werden, deaktivieren ("cli").
- Bits einzeln löschen oder setzen. sbi und cbi können nicht unterbrochen werden. Vorsicht: nur Register im unteren Speicherbereich sind mittels sbi/cbi ansprechbar. Der Compiler kann nur für diese sbi/cbi-Anweisungen generieren. Für Register außerhalb dieses Adressbereichs ("Memory-Mapped"-Register) werden auch zur Manipulation einzelner Bits abhängige Anweisungen erzeugt (lds,...,sts).

- siehe auch: Dokumentation der avr-libc Frequently asked Questions/Fragen Nr. 1 und 8 (Stand: avr-libc Vers. 1.0.4)

Was macht das Hauptprogramm?

Im einfachsten (Ausnahme-)Fall gar nichts mehr. Es ist also durchaus denkbar, ein Programm zu schreiben, welches in der main-Funktion lediglich noch die Interrupts aktiviert und dann in einer Endlosschleife verharrt. Sämtliche Funktionen werden dann in den ISRs abgearbeitet. Diese Vorgehensweise ist jedoch bei den meisten Anwendungen schlecht: man verschenkt eine Verarbeitungsebene und hat außerdem möglicherweise Probleme durch Interruptroutinen, die zu viel Verarbeitungszeit benötigen.

Normalerweise wird man in den Interruptroutinen nur die bei Auftreten des jeweiligen Interruptereignisses unbedingt notwendigen Operationen ausführen lassen. Alle weniger kritischen Aufgaben werden dann im Hauptprogramm abgearbeitet.

- siehe auch: Dokumentation der avr-libc Abschnitt Modules/Interrupts and Signals

Speicherzugriffe

Atmel AVR-Controller verfügen typisch über drei Speicher:

- RAM: Im RAM (genauer statisches RAM/SRAM) wird vom gcc-Compiler Platz für Variablen reserviert. Auch der Stack befindet sich im RAM. Dieser Speicher ist "flüchtig", d.h. der Inhalt der Variablen geht beim Ausschalten oder einem Zusammenbruch der Spannungsversorgung verloren.
- Programmspeicher: Ausgeführt als FLASH-Speicher, seitenweise wiederbeschreibbar. Darin ist das Anwendungsprogramm abgelegt.
- EEPROM: Nichtflüchtiger Speicher, d.h. der einmal geschriebene Inhalt bleibt auch ohne Stromversorgung erhalten. Byte-weise schreib/lesbar. Im EEPROM werden typischerweise gerätespezifische Werte wie z.B. Kalibrierungswerte von Sensoren abgelegt.

Einige AVRs besitzen keinen RAM-Speicher, lediglich die Register können als "Arbeitsvariablen" genutzt werden. Da die Anwendung des avr-gcc auf solch "kleinen" Controllern ohnehin selten sinnvoll ist und auch nur bei einigen RAM-losen Typen nach "Bastelarbeiten" möglich ist, werden diese Controller hier nicht weiter berücksichtigt. Auch EEPROM-Speicher ist nicht auf allen Typen verfügbar. Generell sollten die nachfolgenden Erläuterungen auf alle ATmega-Controller und die größeren AT90-Typen übertragbar sein. Für die Typen ATtiny2313, ATtiny26 und viele weitere der "ATtiny-Reihe" gelten die Ausführungen ebenfalls.

RAM

Die Verwaltung des RAM-Speichers erfolgt durch den Compiler, im Regelfall ist beim Zugriff auf Variablen im RAM nichts Besonderes zu beachten. Die Erläuterungen in jedem brauchbaren C-Buch gelten auch für den vom avr-gcc-Compiler erzeugten Code.

Um Speicher dynamisch (während der Laufzeit) zu reservieren, kann **malloc()** verwendet werden. malloc(size) "allokiert" (~reserviert) einen gewissen Speicherblock mit **size** Bytes. Ist kein Platz für den neuen Block, wird NULL (0) zurückgegeben.

Wird der angelegte Block zu klein (groß), kann die Größe mit realloc() verändert werden. Den allokierten Speicherbereich kann man mit free() wieder freigeben. Wenn das Freigeben eines Blocks vergessen wird spricht man von einem "Speicherleck" (memory leak).

malloc() legt Speicherblöcke im **Heap** an, belegt man zuviel Platz, dann wächst der Heap zu weit nach oben und überschreibt den Stack, und der Controller kommt in Teufels Küche. Das kann leider nicht nur passieren wenn man insgesamt zu viel Speicher anfordert, sondern auch wenn man Blöcke unterschiedlicher Größe in ungünstiger Reihenfolge allokiert/freigibt (siehe Artikel Heap-Fragmentierung). Aus diesem Grund sollte man malloc() auf Mikrocontrollern sehr sparsam (am besten gar nicht) verwenden.

Beispiel zur Verwendung von malloc():

```
#include <stdlib.h>
```

```
void foo(void) {
  // neuen speicherbereich anlegen,
  // platz für 10 uint16
  uint16_t* pBuffer = malloc(10 * sizeof(uint16_t));

  // darauf zugreifen, als wärs ein gewohnter Buffer
  pBuffer[2] = 5;

  // Speicher (unbedingt!) wieder freigeben
  free(pBuffer);
}
```

Wenn (wie in obigem Beispiel) dynamischer Speicher nur für die Dauer einer Funktion benötigt und am Ende wieder freigegeben wird, bietet es sich an, statt malloc() **alloca()** zu verwenden. Der Unterschied zu malloc() ist, dass der Speicher auf dem Stack reserviert wird, und beim Verlassen der Funktion automatisch wieder freigegeben wird. Es kann somit kein Speicherleck und keine Fragmentierung entstehen.

siehe auch:

- http://www.nongnu.org/avr-libc/user-manual/malloc.html

Programmspeicher (Flash)

Ein Zugriff auf Konstanten im Programmspeicher ist mittels avr-gcc nicht "transparent" möglich. D.h. es sind besondere Zugriffsfunktionen erforderlich, um Daten aus diesem Speicher zu lesen. Grundsätzlich basieren alle Zugriffsfunktionen auf der Assembler-Anweisung lpm (load program memory, bei AVR Controllern mit mehr als 64kB Flash auch elpm). Die Standard-Laufzeitbibliothek des avr-gcc (die avr-libc) stellt diese Funktionen nach Einbinden der Header-Datei pgmspace.h zur Verfügung. Mit diesen Funktionen können einzelne Bytes, Datenworte (16bit) und Datenblöcke gelesen werden.

Deklarationen von Variablen im Flash-Speicher werden durch das "Attribut" PROGMEM ergänzt. Lokale Variablen (eigentlich Konstanten) innerhalb von Funktionen können ebenfalls im Programmspeicher abgelegt werden. Dazu ist bei der Definition jedoch ein *static* voranzustellen, da solche "Variablen" nicht auf dem Stack bzw. (bei Optimierung) in Registern verwaltet werden können. Der Compiler "wirft" eine Warnung falls static fehlt.

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <inttypes.h>

//...

/* Byte */
const uint8_t pgmFooByte PROGMEM = 123;

/* Wort */
const uint16_t pgmFooWort PROGMEM = 12345;

/* Byte-Feld */
const uint8_t pgmFooByteArray1[] PROGMEM = { 18, 3 ,70 };
const uint8_t pgmFooByteArray2[] PROGMEM = { 30, 7 ,79 };

/* Zeiger */
const uint8_t *pgmPointerToArray1 PROGMEM = pgmFooByteArray1;
const uint8_t *pgmPointerArray[] PROGMEM = { pgmFooByteArray1, pgmFooByteArray2 };
//...

void foo(void)
{
  static /*const*/ uint8_t pgmTestByteLocal PROGMEM = 0x55;
  static /*const*/ char pgmTestStringLocal[] PROGMEM = "im Flash";
  // so nicht (static fehlt): char pgmTestStingLocalFalsch [] PROGMEM = "so nicht";

 // ...

}
```

Byte lesen

Mit der Funktion pgm_read_byte aus pgmspace.h erfolgt der Zugriff auf die Daten. Parameter der Funktion ist die Adresse des Bytes im Flash-Speicher.

```
const uint8_t pgmFooByte PROGMEM = 123;
const uint8_t pgmFooByteArray1[] PROGMEM = { 18, 3 ,70 };


    // Wert der Ram-Variablen myByte auf den Wert von pgmFooByte setzen:
    uint8_t myByte;

    myByte = pgm_read_byte(&pgmFooByte);
    // myByte hat nun den Wert 123

    //...

    // Schleife ueber ein Array aus Byte-Werten im Flash
    uint8_t i;

    for (i=0;i<3;i++) {
        myByte = pgm_read_byte(&pgmFooByteArray1[i]);
        // mach' was mit myByte....
    }
```

Wort lesen

Für "einfache" 16-bit breite Variablen erfolgt der Zugriff analog zum Byte-Beispiel, jedoch mit der Funktion pgm_read_word.

```
const uint16_t pgmFooWort PROGMEM = 12345;

    uint16_t myWord;

    myWord = pgm_read_word(&pgmFooWort);
```

Zeiger auf Werte im Flash sind ebenfalls 16 Bits "groß" (Stand avr-gcc 3.4.x). Damit ist der mögliche Speicherbereich für "Flash-Konstanten" auf 64kB begrenzt.

```
    uint8_t *ptrToArray;

    ptrToArray = (uint8_t*)(pgm_read_word(&pgmPointerToArray1));
    // ptrToArray enthält nun die Startadresse des Byte-Arrays pgmFooByteArray1
    // Allerdings würde ein direkter Zugriff mit diesem Pointer (z.B. temp=*ptrToArray)
    // '''nicht''' den Inhalt von pgmFooByteArray1[0] liefern, sondern von einer Speicherstelle
    // im '''RAM''', die die gleiche Adresse hat wie pgmFooByteArray1[0]
    // Daher muss nun die Funktion pgm_read_byte() benutzt werden, die die in ptrToArray
    // enthaltene Adresse benutzt und auf das Flash zugreift.

    for (i=0;i<3;i++) {
        myByte = pgm_read_byte(ptrToArray+i);
        // mach' was mit myByte... (18, 3, 70)
    }

    ptrToArray = (uint8_t*)(pgm_read_word(&pgmPointerArray[1]));

    // ptrToArray enthält nun die Adresse des ersten Elements des Byte-Arrays pgmFooByteArray2
    // da im zweiten Element des Pointer-Arrays pgmPointerArray die Adresse
    // von pgmFooByteArray2 abgelegt ist

    for (i=0;i<3;i++) {
        myByte = pgm_read_byte(ptrToArray+i);
        // mach' was mit myByte... (30, 7, 79)
    }
```

Floats und Structs lesen

Um komplexe Datentypen (structs), nicht-integer Datentypen (floats) aus dem Flash auszulesen, sind Hilfsfunktionen erforderlich. Einige Beispiele:

```
/* Beispiel float aus Flash */
```

```
float pgmFloatArray[3] PROGMEM = {1.1, 2.2, 3.3};
//...

/* liest float von Flash-Addresse addr und gibt diese als return-value zurueck */
inline float pgm_read_float(const float *addr)
{
        union
        {
                uint16_t i[2];  // 2 16-bit-Worte
                float f;
        } u;

        u.i[0]=pgm_read_word((PGM_P)addr);
        u.i[1]=pgm_read_word((PGM_P)addr+2);

        return u.f;
}
...

void egal(void)
{
   int i;
   float f;

   for (i=0;i<3;i++) {
      f = pgm_read_float(&pgmFloatArray[i]); // entspr. "f = pgmFloatArray[i];"
      // mach' was mit f
   }
}
```

TODO: Beispiele fuer structs und pointer aus flash auf struct im flash (menues, state-machines etc.)

Vereinfachung für Zeichenketten (Strings) im Flash

Zeichenketten können innerhalb des Quellcodes als "Flash-Konstanten" ausgewiesen werden. Dazu dient das Makro PSTR aus pgmspace.h. Dies erspart die getrennte Deklaration mit PROGMEM-Attribut.

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <string.h>

#define MAXLEN 30

char StringImFlash[] PROGMEM = "Erwin Lindemann"; // im "Flash"
char StringImRam[MAXLEN];

//...
    strcpy(StringImRam, "Mueller-Luedenscheidt");

    if (!strncmp_P(StringImRam, StringImFlash, 5)) {
        // mach' was, wenn die ersten 5 Zeichen identisch - hier nicht
    }
    else {
        // der Code hier wuerde ausgefuehrt
    }

    if (!strncmp_P(StringImRam, PSTR("Mueller-Schmitt"), 5)) {
        // der Code hier wuerde ausgefuehrt, die ersten 5 Zeichen stimmen ueberein
    }
    else {
        // wuerde bei nicht-Uebereinstimmung ausgefuehrt
    }
//...
```

Aber Vorsicht: Ersetzt man zum Beispiel

```
const char textImFlashOK[] PROGMEM = "mit[]";
// = Daten im "Flash", textImFlashOK* zeigt auf Flashadresse
```

durch

```
const char* textImFlashProblem PROGMEM = "mit*";
// Konflikt: Daten im BSS (lies: RAM), textImFlashFAIL* zeigt auf Flashadresse
```

dann kann es zu Problemen mit AVR-GCC kommen. Zu erkennen daran, dass der Initialisierungsstring von "textImFlashProblem" zu den Konstanten ans Ende des Programmcodes gelegt wird (BSS), von dem aus er zur Benutzung eigentlich ins RAM kopiert werden sollte (und wird). Da der lesende Code (mittels pgm_read*) trotzdem an einer Stelle vorne im Flash sucht, wird Unsinn gelesen. Dies scheint ein weiters Problem des AVR-GCC (gesehen bei avr-gcc 3.4.1 und 3.4.2) bei der Anpassung an die Harvard-Architektur zu sein (konstanter Pointer auf variable Daten?!). Abhilfe ("Workaround"): Initialisierung bei Zeichenketten mit [] oder gleich im Code PSTR("...") nutzen.

Übergibt man Zeichenketten (genauer: die Adresse des ersten Zeichens), die im Flash abgelegt sind an eine Funktion, muss diese entsprechend programmiert sein. Die Funktion selbst hat keine Möglichkeit zu unterscheiden, ob es sich um eine Adresse im Flash oder im RAM handelt. Die avr-libc und viele andere avr-gcc-Bibliotheken halten sich an die Konvention, dass Namen von Funktionen die Flash-Adressen erwarten mit dem Suffix _p (oder _P) versehen sind.

Eine Funktion, die einen im Flash abgelegten String z.B. an eine UART ausgibt, würde dann so aussehen:

```
void uart_puts_p(const char *text)
{
    char Zeichen;

    while (Zeichen = pgm_read_byte(text))
    {   /* so lange, wie mittels pgm_read_byte ein Zeichen vom Flash gelesen
           werden konnte, welches nicht das "String-Endezeichen" darstellt */

        /* Das gelesene Zeichen über die normalen Kanäle verschicken */
        uart_putc(Zeichen);
        text++;
    }
}
```

Von einigen Bibliotheken werden Makros definiert, die "automatisch" ein PSTR bei Verwendung einer Funktion einfügen. Ein Blick in den Header-File der Bibliothek zeigt, ob dies der Fall ist. Ein Beispiel aus P. Fleurys lcd-Library:

```
// Ausschnitt aus dem Header-File lcd.h der "Fleury-LCD-Lib."
//...
extern void lcd_puts_p(const char *progmem_s);
#define lcd_puts_P(__s) lcd_puts_p(PSTR(__s))
//...

// in einer Anwendung (wieauchimmmer.c)
#include <avr/io.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <string.h>
#include "lcd.h"

char StringImFlash[] PROGMEM = "Erwin Lindemann"; // im "Flash"

//...
    lcd_puts_p(StringImFlash);
    lcd_puts_P("Dr. Kloebner");
    // daraus wird wg. #define lcd_put_P...:  lcd_puts_p( PSTR("Dr. Kloebner") );
//...
```

Flash in der Anwendung schreiben

Bei AVRs mit "self-programming"-Option (auch bekannt als Bootloader-Support) können Teile des Flash-Speichers auch vom Anwendungsprogramm selbst beschrieben werden. Dies ist nur möglich, wenn die Schreibfunktionen in einem besonderen Speicherbereich (boot-section) des Programmspeichers/Flash abgelegt sind. Bei wenigen "kleinen" AVRs gibt es keine gesonderte Boot-Section, bei diesen kann der Flashspeicher von jeder Stelle des Programms geschrieben werden. Für Details sei hier auf das jeweilige Controller-Datenblatt und die Erläuterungen zum Modul boot.h der avr-libc verwiesen. Es existieren auch Application-Notes dazu bei atmel.com, die auf avr-gcc-Code übertragbar sind.

Warum so kompliziert?

Zu dem Thema, warum die Verabeitung von Werten aus dem Flash-Speicher so "kompliziert" ist, sei hier nur kurz erläutert: Die Harvard-Architektur des AVR weist getrennte Adressräume für Programm(Flash)- und Datenspeicher(RAM) auf. Der C-Standard und der gcc-Compiler sehen keine unterschiedlichen Adressräume vor. Hat

man zum Beispiel eine Funktion string_an_uart(const char* s) und übergibt an diese Funktion die Adresse einer Zeichenkette (einen Pointer, z.B. 0x01fe), "weiß" die Funktion nicht, ob die Adresse auf den Flash-Speicher oder den/das RAM zeigt. Allein aus dem Pointer-Wert (der Zahl) kann nicht geschlossen werden, ob ein "einfaches" zeichen_an_uart(s[i]) oder zeichen_an_uart(pgm_read_byte(&s[i]) genutzt werden muss, um das i-te Zeichen auszugeben.

Einige AVR-Compiler "tricksen" etwas, in dem sie für einen Pointer nicht nur die Adresse anlegen, sondern zusätzlich zu jedem Pointer den Ablageort (Flash oder RAM) intern sichern. Bei Aufruf einer Funktion wird dann bei Pointer-Parametern neben der Adresse auch der Speicherbereich, auf den der Pointer zeigt, übergeben. Dies hat jedoch nicht nur Vorteile; Erläuterungen warum dies so ist, führen an dieser Stelle zu weit.

- siehe auch: Dokumentation der avr-libc Abschnitte Modules/Program Space String Utilities und Abschnitt Modules/Bootloader Support Utilities

EEPROM

Man beachte, dass der EEPROM-Speicher nur eine begrenzte Anzahl von Schreibzugriffen zulässt. Beschreibt man eine EEPROM-Zelle öfter als die im Datenblatt zugesicherte Anzahl (typisch 100.000), wird die Funktion der Zelle nicht mehr garantiert. Dies gilt für jede einzelne Zelle. Bei geschickter Programmierung (z.B. Ring-Puffer), bei der die zu beschreibenden Zellen regelmäßig gewechselt werden, kann man eine deutlich höhere Anzahl an Schreibzugriffen, bezogen auf den Gesamtspeicher, erreichen.

Schreib- und Lesezugriffe auf den EEPROM-Speicher erfolgen über die im Modul eeprom.h definierten Funktionen. Mit diesen Funktionen können einzelne Bytes, Datenworte (16bit) und Datenblöcke geschrieben und gelesen werden.

Bei Nutzung des EEPROMs ist zu beachten, dass vor dem Zugriff auf diesen Speicher abgefragt wird, ob der Controller die vorherige EEPROM-Operation abgeschlossen hat. Die avr-libc-Funktionen beinhalten diese Prüfung, man muss sie nicht selbst implementieren. Man sollte auch verhindern, dass der Zugriff durch die Abarbeitung einer Interrupt-Routine unterbrochen wird, da bestimme Befehlsabfolgen vorgegeben sind, die innerhalb weniger Taktzyklen aufeinanderfolgen müssen ("timed sequence"). Auch dies muss bei Nutzung der Funktionen aus der avr-libc/eeprom.h-Datei nicht selbst implementiert werden. Innerhalb der Funktionen werden Interrupts vor der "EEPROM-Sequenz" global deaktiviert und im Anschluss, falls vorher auch schon eingeschaltet, wieder aktiviert.

Bei der Deklaration einer Variable im EEPROM, ist das Attribut für die Section ".eeprom" zu ergänzen. Siehe dazu folgendes Beispiel:

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/eeprom.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <inttypes.h> // wird in aktuellen Versionen der avr-lib mit xx.h eingebunden

// EEMEM wird bei aktuellen Versionen der avr-lib in eeprom.h definiert
// hier: definiere falls noch nicht bekannt ("alte" avr-libc)
#ifndef EEMEM
// alle Textstellen EEMEM im Quellcode durch __attribute__ ... ersetzen
#define EEMEM  __attribute__ ((section (".eeprom")))
#endif

//...

/* Byte */
uint8_t eeFooByte EEMEM = 123;

/* Wort */
uint16_t eeFooWord EEMEM = 12345;

/* float */
float eeFooFloat EEMEM;

/* Byte-Feld */
uint8_t eeFooByteArray1[] EEMEM = { 18, 3 ,70 };
uint8_t eeFooByteArray2[] EEMEM = { 30, 7 ,79 };

/* 16-bit unsigned short feld */
uint16_t eeFooWordArray1[4] EEMEM;
//...
```

Bytes lesen/schreiben

Die avr-libc Funktion zum Lesen eines Bytes heißt eeprom_read_byte. Parameter ist die Adresse des Bytes im EEPROM. Geschrieben wird über die Funktion eeprom_write_byte mit den Parametern Adresse und Inhalt. Anwendungsbeispiel:

```
//...
    uint8_t myByte;

    myByte = eeprom_read_byte(&eeFooByte); // lesen
    // myByte hat nun den Wert 123
//...
    myByte = 99;
    eeprom_write_byte(&eeFooByte, myByte); // schreiben
    // der Wert 99 wird im EEPROM an die Adresse der
    // 'Variablen' eeFooByte geschrieben
//...
    myByte = eeprom_read_byte(&eeFooByteArray1[1]);
    // myByte hat nun den Wert 3
//...

    // Beispiel zur "Sicherung" gegen leeres EEPROM nach "Chip Erase"
    // (z.B. wenn die .eep-Datei nach Programmierung einer neuen Version
    // des Programms nicht in den EEPROM uebertragen wurde und EESAVE
    // deaktiviert ist (unprogrammed/1)
    //
    // Vorsicht: wenn EESAVE "programmed" ist, hilft diese Sicherung nicht
    // weiter, da die Speicheraddressen in einem neuen/erweiterten Programm
    // moeglicherweise verschoben wurden. An der Stelle &eeFooByte steht
    // dann u.U. der Wert einer anderen Variable aus einer "alten" Version.

    #define EEPROM_DEF 0xFF
    uint8_t fooByteDefault = 222;
    if ( ( myByte = eeprom_read_byte(&eeFooByte) ) == EEPROM_DEF ) {
        myByte = fooByteDefault;
    }
```

Wort lesen/schreiben

Schreiben und Lesen von Datenworten erfolgt analog zur Vorgehensweise bei Bytes:

```
//...
    uint16_t myWord;

    myWord = eeprom_read_word(&eeFooWord); // lesen
    // myWord hat nun den Wert 12345
//...
    myWord = 2222;
    eeprom_write_word(&eeFooWord, myWord); // schreiben
//...
```

Block lesen/schreiben

Lesen und Schreiben von Datenblöcken erfolgt über die Funktionen *eeprom_read_block()* bzw. *eeprom_write_block()*. Die Funktionen erwarten drei Parameter: die Adresse der Quell- bzw. Zieldaten im RAM, die EEPROM-Addresse und die Länge des Datenblocks in Bytes (size_t).

TODO: **Vorsicht!** die folgenden Beispiele sind noch nicht geprüft, erstmal nur als Hinweis auf "das Prinzip". Evtl. fehlen "casts" und möglicherweise noch mehr.

```
//...
    uint8_t  myByteBuffer[3];
    uint16_t myWordBuffer[4];

    /* Datenblock aus EEPROM LESEN  */

    /* liest 3 Bytes ab der von eeFooByteArray1 definierten EEPROM-Adresse
       in das RAM-Array myByteBuffer */
    eeprom_read_block(myByteBuffer,eeFooByteArray1,3);

    /* dito etwas anschaulicher aber "unnütze Tipparbeit": */
```

```
    eeprom_read_block(&myByteBuffer[0],&eeFooByteArray[0],3);

    /* dito mit etwas Absicherung betr. der Länge */
    eeprom_read_block(myByteBuffer,eeFooByteArray1,sizeof(myByteBuffer));

    /* und nun mit "16bit" */
    eeprom_read_block(myWordBuffer,eeFooWordArray1,sizeof(myWordBuffer));

    /* Datenlock in EEPROM SCHREIBEN */
    eeprom_write_block(myByteBuffer,eeFooByteArray1,sizeof(myByteBuffer));
    eeprom_write_block(myWordBuffer,eeFooWordArray1,sizeof(myWordBuffer));
//...
```

"Nicht-Integer"-Datentypen wie z.B. Fließkommazahlen lassen sich recht praktisch über eine *union* in "Byte-Arrays" konvertieren und wieder "zurückwandeln". Dies erweist sich hier (aber nicht nur hier) als nützlich.

```
//...
   float myFloat = 12.34;

   union {
      float r;
      uint8_t i[sizeof(float)];
   } u;

   u.r = myFloat;

   /* float in EEPROM */
   eeprom_write_block(&(u.i),&eeFooFloat,sizeof(float));

   /* float aus EEPROM */
   eeprom_read_block(&(u.i),&eeFooFloat,sizeof(float));
   /* u.r wieder 12.34 */
//...
```

Auch zusammengesetzte Typen lassen sich mit den Block-Routinen verarbeiten.

```
//...
typedef struct {
    uint8_t   label[8];
    uint8_t   rom_code[8];
} tMyStruct;

#define MAXSENSORS 3
tMyStruct eeMyStruct[MAXSENSORS] EEMEM;

//...

void egal(void)
{
   tMyStruct work;

   strcpy(work.label,"Flur");
   GetRomCode(work.rom_code);     // Dummy zur Veranschaulichung - setzt rom-code

   /* Sichern von "work" im EEPROM */
   eeprom_write_block(&work,&eeMyStruct[0],sizeof(tMyStruct)); // f. Index 0
   strcpy(work.label,"Bad");
   GetRomCode(work.rom_code);
   eeprom_write_block(&work,&eeMyStruct[1],sizeof(tMyStruct)); // f. Index 1
//...
   /* Lesen der Daten EEPROM Index 0 in "work" */
   eeprom_read_block(&work,&eeMyStruct[0],sizeof(tMyStruct));
   // work.label hat nun den Inhalt "Flur"
//...
}
//...
```

EEPROM-Speicherabbild in .eep-Datei

Mit den zum Compiler gehörenden Werkzeugen kann der aus den Variablendeklaration abgeleiteten EEPROM-Inhalt in eine Datei geschrieben werden (übliche Dateiendung: .eep, Daten im Intel Hex-Format). Damit können recht elegant Standardwerte für den EEPROM-Inhalt im Quellcode definiert werden. Makefiles nach WinAVR/MFile-Vorlage enthalten bereits die notwendigen Einstellungen (siehe dazu die Erläuterungen im Abschnitt Exkurs: Makefiles). Der Inhalt der eep-Datei muss ebenfalls zum Mikrocontroller übertragen werden (Write EEPROM), wenn die

Initialisierungswerte aus der Deklaration vom Programm erwartet werden. Ansonsten enthält der EEPROM-Speicher nach der Übertragung des Programmers mittels ISP abhängig von der Einstellung der EESAVE-Fuse (vgl. Datenblatt Abschnitt Fuse Bits) die vorherigen Daten (EESAVE programmed = 0), deren Position möglicherweise nicht mehr mit der Belegung im aktuellen Programm übereinstimmt oder den Standardwert nach "Chip Erase": 0xFF (EESAVE unprogrammed = 1). Als Sicherung kann man im Programm nochmals die Standardwerte vorhalten, beim Lesen auf 0xFF prüfen und gegebenfalls einen Standardwert nutzen.

EEPROM-Variable auf feste Adressen legen

Gleich zu Beginn möchte ich darauf hinweisen, dass dieses Verfahren nur ein Workaround ist, mit dem man das Problem der anscheinend "zufälligen" Verteilung der EEPROM-Variablen durch den Compiler etwas in den Griff bekommen kann.

Hilfreich kann dies vor allem dann sein, wenn man z.B. über einen Kommandointerpreter (o.ä. Funktionen) direkt bestimmte EEPROM-Adressen manipulieren möchte. Auch wenn man über einen JTAG-Adapter (mk I oder mkII) den Programmablauf manipulieren möchte, indem man die EEPROM-Werte direkt ändert, kann diese Technik hilfreich sein.

Im folgenden nun zwei Sourcelistings mit einem Beispiel:

```
//////////////////////////////////////////////////
// Datei "eeprom.h" eines eigenen Projektes
//////////////////////////////////////////////////

#inlcude <avr/eeprom.h>     // Die EEPROM-Definitionen/Macros der avr-libc einbinden

#define   EESIZE   512      // Maximale Größe des EEPROMS

#define   EE_DUMMY   0x000  // Dummyelement (Adresse 0 sollte nicht genutzt werden)
#define   EE_VALUE1  0x001  // Eine Bytevariable
#define   EE_WORD1L  0x002  // Eine Wordvariable (Lowbyte)
#define   EE_WORD1H  0x003  // Eine Wordvariable (Highbyte)
#define   EE_VALUE2  0x004  // Eine weitere Bytevariable
```

Mit den Macros **#define EE_VALUE1** legt man den Namen und die Adresse der 'Variablen' fest.

WICHTIG:Die Adressen sollten fortlaufend, zumindest aber aufsteigend sortiert sein! Ansonsten besteht die Gefahr, daß man sehr schnell ein Durcheinander im EEPROM Speicher veranstaltet.

WICHTIG:Für den Compiler sind das lediglich Speicher-Adressen, über die auf das EEPROM zugegriffen wird. Der Compiler sieht nichts davon als eine echte Variable an und stößt sich daher auch nicht daran, wenn 2 Makros mit der gleichen Speicheradresse, bzw. überlappenden Speicherbereichen definiert werden. Es liegt einzig und alleine in der Hand des Programmierers, hier keinen Fehler zu machen.

```
//////////////////////////////////////////////////
// Datei "eeprom.c" eines eigenen Projektes
//////////////////////////////////////////////////

#include "eeprom.h"          // Eigene EEPROM-Headerdatei einbinden

uint8_t ee_mem[EESIZE] EEMEM =
{
   [EE_DUMMY]   = 0x00,
   [EE_VALUE1]  = 0x05,
   [EE_WORD1L]  = 0x01,
   [EE_WORD1H]  = 0x00,
   [EE_VALUE2]  = 0xFF
};
```

Durch die Verwendung eines Array, welches das gesammte EEPROM umfasst, bleibt dem Compiler nicht anderes übrig, als das Array so zu platzieren, dass Element 0 des Arrays der Adresse 0 des EEPROMs entspricht. (*Ich hoffe nur, dass die Compilerbauer daran nichts ändern!*)

Wie man in dem obigen Codelisting auch sehen kann, hat das Verfahren einen kleinen Haken. Variablen die größer sind als 1 Byte, müssen etwas umständlicher definiert werden. Benötigt man keine Initialisierung durch das Programm

(was der Normalfall sein dürfte), dann kann man das auch so machen:

Möchte man im EEPROM hintereinander beispielsweise Variablen, mit den Namen **Wert**, **Anzahl**, **Name** und **Wertigkeit** definieren, wobei Wert und Wertigkeit 1 Byte belegen sollen, Anzahl als 1 Wort (also 2 Bytes) und Name mit 10 Bytes reserviert werden soll, so geht auch folgendes:

```
#define EE_DUMMY      0x000
#define EE_WERT       ( 0x000 + sizeof( uint8_t ) )
#define EE_ANZAHL     ( EE_WERT + sizeof( uint8_t ) )
#define EE_NAME       ( EE_ANZAHL + sizeof( uint16_t ) )
#define EE_WERTIGKEIT ( EE_NAME + 10 * sizeof( uint8_t ) )
#define EE_LAST       ( EE_WERTIGKEIT + sizeof( uint8_t ) )
```

Jedes Makro definiert also seine Startadresse durch die Startadresse der unmittelbar vorhergehende 'Variablen' plus der Anzahl der Bytes die von der vorhergehenden 'Variablen' verbraucht werden. Dadurch ist man zumindest etwas auf der sicheren Seite, dass keine 2 'Variablen' im EEPROM überlappend definiert werden. Möchte man eine weitere 'Variable' hinzufügen, so wird deren Name, einfach anstelle der EE_LAST eingesetzt und eine neue Zeile für EE_LAST eingefügt, in der dann die Größe der 'Variablen' festgelegt wird. Zb.

```
#define EE_DUMMY      0x000
#define EE_WERT       ( 0x000 + sizeof( uint8_t ) )
#define EE_ANZAHL     ( EE_WERT + sizeof( uint8_t ) )
#define EE_NAME       ( EE_ANZAHL + sizeof( uint16_t ) )
#define EE_WERTIGKEIT ( EE_NAME + 10 * sizeof( uint8_t ) )
#define EE_PROZENT    ( EE_WERTIGKEIT + sizeof( uint8_t ) )
#define EE_LAST       ( EE_WERTIGKEIT + sizeof( double ) )
```

EE_PROZENT legt die Startadresse für eine neue 'Variable' des Datentyps double fest.

Der Zugriff auf die EEPROM Werte kann dann z.B.so erfolgen:

```
uint8_t   temp1;
uint16_t  temp2;

temp1 = eeprom_read_byte(EE_VALUE1);
temp2 = eeprom_read_word(EE_WORD1L);
```

Ob die in der avr-libc vorhandenen Funktionen dafür verwendet werden können, weiß ich nicht. Aber in einigen Fällen muss man sich sowieso eigene Funktionen bauen, welche die spezifischen Anforderungen (Interrupt - Atom Problem, etc.) erfüllen.

Die oben beschriebene Möglichkeit ist nur eine Möglichkeit, wie man dies realisieren kann. Sie bietet einem eine relativ einfache Art die EEPROM-Werte auf beliebige Adressen zu legen oder Adressen zu ändern. Die Andere Möglichkeit besteht darin, die EEPROM-Werte wie folgt zu belegen:

```
//////////////////////////////////////////////////
// Datei "eeprom.c" eines eigenen Projektes
//////////////////////////////////////////////////

#include "eeprom.h"          // Eigene EEPROM-Headerdatei einbinden

uint8_t ee_mem[EESIZE] EEMEM =
{
  0x00,                     //  ee_dummy
  0x05,                     //  ee_value1
  0x01,                     //  ee_word1L
  0x00,                     // (ee_word1H)
  0xFF                      //  ee_value2
};
```

Hierbei kann man Variablen, die größer sind als 1 Byte einfacher definieren und man muss nur die Highbyte- oder Lowbyte-Adresse in der "eeprom.h" definieren. Allerdings muss man hier höllisch aufpassen, dass man nicht um eine oder mehrere Positionen verrutscht!

Welche der beiden Möglichkeiten man einsetzt, hängt vor allem davon ab, wieviele Byte, Word und sonstige Variablen man benutzt. Gewöhnen sollte man sich an beide Varianten können ;)

Kleine Schlussbemerkung:

- Der avr-gcc unterstützt die Variante 1 und die Variante 2
- Der icc-avr Compiler unterstützt nur die Variante 2!

Bekannte Probleme bei den EEPROM-Funktionen

Vorsicht: Bei alten Versionen der avr-libc wurden nicht alle AVR Controller untersützt. Z.B. bei der avr-libc Version 1.2.3 insbesondere bei AVRs "der neuen Generation" (ATmega48/88/168/169) funktionieren die Funktionen nicht korrekt (Ursache: unterschiedliche Speicheradressen der EEPROM-Register). In neueren Versionen (z.B. avr-libc 1.4.3 aus WinAVR 20050125) wurde die Zahl der unterstüzten Controller deutlich erweitert und eine Methode zur leichten Anpassung an zukünftige Controller eingeführt.

In jedem Datenblatt zu AVR-Controllern mit EEPROM sind kurze Beispielecodes für den Schreib- und Lesezugriff enthalten. Will oder kann man nicht auf die neue Version aktualisieren, kann der dort gezeigte Code auch mit dem avr-gcc (ohne avr-libc/eeprom.h) genutzt werden ("copy/paste", gegebenfalls Schutz vor Unterbrechnung/Interrupt ergänzen *uint8_t sreg; sreg=SREG; cli(); [EEPROM-Code] ; SREG=sreg; return;*, siehe Abschnitt Interrupts). Im Zweifel hilft ein Blick in den vom Compiler erzeugten Assembler-Code (lst/lss-Dateien).

- siehe auch: Dokumentation der avr-libc Abschnitt Modules/EEPROM handling

Die Nutzung von printf

Um komfortabel Ausgaben auf ein Display oder die serielle Schnittstelle zu tätigen, bietet sich printf/sprintf an.

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>


// ...
// nicht dargestellt: Implementierung von uart_puts (vgl. Abschnitt UART)
// ...

uint16_t counter;

void uart_puti( uint16_t value )
{
    uint8_t s[20];

    sprintf( s, "Zählerstand: %d", value );
    uart_puts( s );
}

int main()
{
  counter = 5;

  uart_puti( counter );
  uart_puti( 42 );
}
```

Eine weitere elegante Möglichkeit besteht darin, die Ausgabe stdout auf eigene Ausgabefunktionen umzuleiten. Dazu wird dem Ausgabemechanismus eine neue Ausgabefunktion bekannt gemacht, deren Aufgabe es ist, ein einzelnes Zeichen auszugeben (wie auch immer die Ausgabe stattfindet). Alle anderen, höheren, Funktionen greifen letztendlich auf diese eine Ausgabefunktion zurück, die die Ausgabe eines einzelnen Zeichens vornimmt.

```
#include <avr/io.h>
#include <stdio.h>

void uart_init(void);
int uart_putchar(char c, FILE *stream);

static FILE mystdout = FDEV_SETUP_STREAM( uart_putchar, NULL, _FDEV_SETUP_WRITE );

void uart_init(void)
{
    /* hier µC spezifischen Code zur Initialisierung */
    /* des UART einfügen... s.o. im AVR-GCC-Tutorial */

    // Beispiel:
```

```
    //
    // myAVR Board 1.5 mit externem Quarz Q1 3,6864 MHz
    // 9600 Baud 8N1

#ifndef F_CPU
#define F_CPU 3686400
#endif
#define UART_BAUD_RATE 9600

// Hilfsmakro zur UBRR-Berechnung ("Formel" laut Datenblatt)
#define UART_UBRR_CALC(BAUD_,FREQ_) ((FREQ_)/((BAUD_)*16L)-1)

    UCSRB |= (1<<TXEN) | (1<<RXEN);    // UART TX und RX einschalten
    UCSRC |= (1<<URSEL)|(3<<UCSZ0);    // Asynchron 8N1

    UBRRH = (uint8_t)( UART_UBRR_CALC( UART_BAUD_RATE, F_CPU ) >> 8 );
    UBRRL = (uint8_t)UART_UBRR_CALC( UART_BAUD_RATE, F_CPU );
}

int uart_putchar( char c, FILE *stream )
{
    if( c == '\n' )
        uart_putchar( '\r', stream );

    loop_until_bit_is_set( UCSRA, UDRE );
    UDR = c;
    return 0;
}

int main(void)
{
    uart_init();
    stdout = &mystdout;
    printf( "Hello, world!\n" );
    return 0;
}

// Quelle: avr-libc-user-manual-1.4.3.pdf, S.74
//         + Ergänzungen
```

Sollen Fließkommazahlen ausgegeben werden, muss im Makefile eine andere (größere) Version der printflib eingebunden werden.

Der Nachteil aller printf-Varianten: Sie sind recht speicherintensiv.

Assembler und Inline-Assembler

Gelegentlich erweist es sich als nützlich, C- und Assembler-Code in einer Anwendung zu nutzen. Typischerweise wird das Hauptprogramm in C verfasst und wenige, extrem zeitkritische oder hardwarenahe Operationen in Assembler.

Die "gnu-Toolchain" bietet dazu zwei Möglichkeiten:

- Inline-Assembler: Die Assembleranweisungen werden direkt in den C-Code integriert. Eine Quellcode-Datei enthält somit C- und Assembleranweisungen
- Assembler-Dateien: Der Assembler-Codecode befindet sich in eigenen Quellcodedateien. Diese werden vom gnu-Assembler (avr-as) zu Object-Dateien assembliert ("compiliert") und mit den aus dem C-Code erstellten Object-Dateien zusammengebunden (gelinkt).

Inline-Assembler

Inline-Assembler bietet sich an, wenn nur wenig Assembleranweisungen benötigt werden. Typische Anwendung sind kurze Codesequenzen für zeitkritische Operationen in Interrupt-Routinen oder sehr präzise Warteschleifen (z.B. 1-Wire). Inline-Assembler wird mit **asm volatile** eingeleitet, die Assembler-Anweisungen werden in einer Zeichenkette zusammengefasst, die als "Parameter" übergeben wird. Durch Doppelpunkte getrennt werden die Ein- und Ausgaben sowie die "Clobber-Liste" angegeben.

Ein einfaches Beispiel für Inline-Assembler ist das Einfügen einer NOP-Anweisung (NOP steht für No Operation).

Dieser Assembler-Befehl benötigt genau einen Taktzyklus, ansonsten "tut sich nichts". Sinnvolle Anwendungen für NOP sind genaue Delay(=Warte)-Funktionen.

```
    ...
   /* Verzögern der weiteren Programmausführung um
      genau 3 Taktzyklen */
    asm volatile ("nop");
    asm volatile ("nop");
    asm volatile ("nop");
    ...
```

Weiterhin kann mit einem NOP verhindert werden, dass leere Schleifen, die als Warteschleifen gedacht sind, wegoptimiert werden. Der Compiler erkennt ansonsten die vermeintlich nutzlose Schleife und erzeugt dafür keinen Code im ausführbaren Programm.

```
    ...
    uint16_t i;

    /* leere Schleife - wird bei eingeschalteter Compiler-Optimierung   wegoptimiert */
    for (i = 0; i < 1000; i++)
      ;

    ...

    /* Schleife erzwingen (keine Optimierung): "NOP-Methode" */
    for (i = 0; i < 1000; i++)
      asm volatile("NOP");

    ...

    /* alternative Methode (keine Optimierung): */
    volatile uint16_t j;
    for (j = 0; j < 1000; j++)
      ;
```

Ein weiterer nützlicher "Assembler-Einzeiler" ist der Aufruf von sleep (*asm volatile ("sleep");*), da hierzu in älteren Versionen der avr-libc keine eigene Funktion existiert (in neueren Versionen *sleep_cpu()* aus sleep.h).

Als Beispiel für mehrzeiligen Inline-Assembler eine präzise Delay-Funktion. Die Funktion erhält ein 16-bit Wort als Parameter, prüft den Parameter auf 0 und beendet die Funktion in diesem Fall oder durchläuft die folgende Schleife sooft wie im Wert des Parameters angegeben. Inline-Assembler hat hier den Vorteil, dass die Laufzeit unabhängig von der Optimierungsstufe (Parameter -O, vgl. makefile) und der Compiler-Version ist.

```
static inline void delayloop16 (uint16_t count)
{
    asm volatile ("cp  %A0, __zero_reg__ \n\t"
                  "cpc %B0, __zero_reg__ \n\t"
                  "breq 2f               \n\t"
                  "1:                    \n\t"
                  "sbiw %0,1             \n\t"
                  "brne 1b               \n\t"
                  "2:                    "
                  : "=w" (count)
                  : "0"  (count)
    );
}
```

- Jede Anweisung wird mit **\n\t** abgeschlossen. Der Zeilenumbruch teilt dem Assembler mit, dass ein neuer Befehl beginnt.
- Als Sprung-Marken (Labels) werden Ziffern verwendet. Diese speziellen Labels sind mehrfach im Code verwendbar. Gesprungen wird jeweils zurück (b) oder vorwärts (f) zum nächsten ausffindbaren Label.

Das Resultat zeigt ein Blick in die Assembler-Datei, die der Compiler mit der option `-save-temps` nicht löscht:

```
        cp  r24, __zero_reg__    ;  count
        cpc r25, __zero_reg__    ;  count
        breq 2f
        1:
        sbiw r24,1               ;  count
        brne 1b
        2:
```

Detaillierte Ausführungen zum Thema Inline-Assembler finden sich in der Dokumentation der avr-libc im Abschnitt Related Pages/Inline Asm.

Siehe auch:

- AVR Assembler-Anweisungsliste
- Deutsche Einführung in Inline-Assembler

Assembler-Dateien

Assembler-Dateien erhalten die Endung .S (*grosses* S) und werden im makefile nach WinAVR/mfile-Vorlage hinter *ASRC*= durch Leerzeichen getrennt aufgelistet.

Im Beispiel eine Funktion *superFunc*, die alle Pins des Ports D auf "Ausgang" schaltet, eine Funktion *ultraFunc*, die die Ausgänge entsprechend des übergebenen Parameters schaltet, eine Funktion *gigaFunc*, die den Status von Port A zurückgibt und eine Funktion *addFunc*, die zwei Bytes zu einem 16-bit-Wort addiert. Die Zuweisungen im C-Code (PORTx = ...) verhindern, dass der Compiler die Aufrufe wegoptimiert und dienen nur zur Veranschaulichung der Parameterübergaben.

Zuerst der Assembler-Code. Der Dateiname sei useful.S:

```
#include "avr/io.h"

//; Arbeitsregister (ohne "r")
workreg  = 16
workreg2 = 17

//; Konstante:
ALLOUT = 0xff

//; ** Setze alle Pins von PortD auf Ausgang **
//; keine Parameter, keine Rückgabe
.global superFunc
.func superFunc
superFunc:
   push workreg
   ldi workreg, ALLOUT
   out  _SFR_IO_ADDR(DDRD), workreg  // beachte: _SFR_IO_ADDR()
   pop workreg
   ret
.endfunc


//; ** Setze PORTD auf übergebenen Wert **
//; Parameter in r24 (LSB immer bei "graden" Nummern)
.global ultraFunc
.func ultraFunc
ultraFunc:
   out  _SFR_IO_ADDR(PORTD), 24
   ret
.endfunc


//; ** Zustand von PINA zurückgeben **
//; Rückgabewerte in r24:r25 (LSB:MSB), hier nur LSB genutzt
.global gigaFunc
.func gigaFunc
gigaFunc:
   in 24, _SFR_IO_ADDR(PINA)
   ret
.endfunc


//; ** Zwei Bytes addieren und 16-bit-Wort zurückgeben **
//; Parameter in r24 (Summand1) und r22 (Summand2) -
//;  Parameter sind Word-"aligned" d.h. LSB immer auf "graden"
//;  Registernummern. Bei 8-Bit und 16-Bit Paramtern somit
//;  beginnend bei r24 dann r22 dann r20 etc.
//; Rückgabewert in r24:r25
.global addFunc
.func addFunc
```

```
addFunc:
   push workreg
   push workreg2
   clr workreg2
   mov workreg, 22
   add workreg, 24
   adc workreg2, 1    // r1 - assumed to be always zero ...
   movw r24, workreg
   pop workreg2
   pop workreg
   ret
.endfunc

//; oh je - sorry - Mein AVR-Assembler ist eingerostet, hoffe das stimmt so...

.end
```

Im Makefile ist der Name der Assembler-Quellcodedatei einzutragen:

```
ASRC = useful.S
```

Der Aufruf erfolgt dann im C-Code so:

```
extern void superFunc(void);
extern void ultraFunc(uint8_t setVal);
extern uint8_t gigaFunc(void);
extern uint16_t addFunc(uint8_t w1, uint8_t w2);

int main(void)
{
[...]
  superFunc();

  ultraFunc(0x55);

  PORTD = gigaFunc();

  PORTA = (addFunc(0xF0, 0x11) & 0xff);
  PORTB = (addFunc(0xF0, 0x11) >> 8);
[...]
}
```

Das Ergebnis wird wieder in der lss-Datei ersichtlich:

```
[...]
   superFunc();
 148:   0e 94 f6 00     call    0x1ec

  ultraFunc(0x55);
 14c:   85 e5           ldi     r24, 0x55       ; 85
 14e:   0e 94 fb 00     call    0x1f6

  PORTD = gigaFunc();
 152:   0e 94 fd 00     call    0x1fa
 156:   82 bb           out     0x12, r24       ; 18

  PORTA = (addFunc(0xF0, 0x11) & 0xff);
 158:   61 e1           ldi     r22, 0x11       ; 17
 15a:   80 ef           ldi     r24, 0xF0       ; 240
 15c:   0e 94 ff 00     call    0x1fe
 160:   8b bb           out     0x1b, r24       ; 27
  PORTB = (addFunc(0xF0, 0x11) >> 8);
 162:   61 e1           ldi     r22, 0x11       ; 17
 164:   80 ef           ldi     r24, 0xF0       ; 240
 166:   0e 94 fc 00     call    0x1f8
 16a:   89 2f           mov     r24, r25
 16c:   99 27           eor     r25, r25
 16e:   88 bb           out     0x18, r24       ; 24

[...]
000001ec <superFunc>:
// setze alle Pins von PortD auf Ausgang
.global superFunc
.func superFunc
superFunc:
   push workreg
 1ec:   0f 93           push    r16
```

```
   ldi workreg, ALLOUT
 1ee:   0f ef           ldi     r16, 0xFF       ; 255
   out  _SFR_IO_ADDR(DDRD), workreg
 1f0:   01 bb           out     0x11, r16       ; 17
   pop workreg
 1f2:   0f 91           pop     r16
   ret
 1f4:   08 95           ret

000001f6 <ultraFunc>:
.endfunc


// setze PORTD auf übergebenen Wert
.global ultraFunc
.func ultraFunc
ultraFunc:
   out  _SFR_IO_ADDR(PORTD), 24
 1f6:   82 bb           out     0x12, r24       ; 18
   ret
 1f8:   08 95           ret

000001fa <gigaFunc>:
.endfunc


// Zustand von PINA zurückgeben
.global gigaFunc
.func gigaFunc
gigaFunc:
   in 24, _SFR_IO_ADDR(PINA)
 1fa:   89 b3           in      r24, 0x19       ; 25
   ret
 1fc:   08 95           ret

000001fe <addFunc>:
.endfunc


// zwei Bytes addieren und 16-bit-Wort zurückgeben
.global addFunc
.func addFunc
addFunc:
   push workreg
 1fe:   0f 93           push    r16
   push workreg2
 200:   1f 93           push    r17
   clr workreg2
 202:   11 27           eor     r17, r17
   mov workreg, 22
 204:   06 2f           mov     r16, r22
   add workreg, 24
 206:   08 0f           add     r16, r24
   adc workreg2, 1    // r1 - assumed to be always zero ...
 208:   11 1d           adc     r17, r1
   movw r24, workreg
 20a:   c8 01           movw    r24, r16
   pop workreg2
 20c:   1f 91           pop     r17
   pop workreg
 20e:   0f 91           pop     r16
   ret
 210:   08 95           ret

[...]
```

Die Zuweisung von Registern zu Parameternummer und die Register für die Rückgabewerte sind in den "Register Usage Guidelines" der avr-libc-Dokumentation erläutert.

Siehe auch:

- avr-libc-Dokumentation: Related Pages/avr-libc and assembler programs
- avr-libc-Dokumentation: Related Pages/FAQ/"What registers are used by the C compiler?"

Globale Variablen für Datenaustausch

Oftmals kommt man um globale Variablen nicht herum, z.B. um den Datenaustausch zwischen Hauptprogramm und Interrupt-Routinen zu realisieren. Hierzu muss man im Assembler wissen, wo genau die Variable vom C-Compiler abgespeichert wird.

Hierzu muss die Variable, hier "zaehler" genannt, zuerst im C-Code als Global definiert werden, z.B. so:

```
#include <avr/io.h>

volatile uint8_t zaehler;

int16_t main (void)
{
    // irgendein Code, in dem zaehler benutzt werden kann

}
```

Im foldenden Assembler-Beispiel wird der Externe Interrupt0 verwendet, um den Zähler hochzuzählen. Es fehlen die Initialisierungen des Interrupts und die Interrupt-Freigabe, so richtig sinnvoll ist der Code auch nicht, aber er zeigt (hoffentlich) wie es geht.

Im Umgang mit Interrupt-Vektoren gilt beim GCC-Assembler das Gleiche, wie bei C: Man muss die exakte Schreibweise beachten, ansonsten wird nicht der Interrupt-Vektor angelegt, sondern eine neue Funktion - und man wundert sich, dass nichts funktionert (vgl. das AVR-GCC-Handbuch).

```
#include "avr/io.h"

temp = 16

.extern zaehler

.global INT0_vect
INT0_vect:

     push temp                      //; wichtig: Benutzte Register und das
     in temp,_SFR_IO_ADDR(SREG)     //; Status-Register (SREG) sichern!
     push temp

     lds temp,zaehler               //; Wert aus dem Speicher lesen
     inc temp                       //; bearbeiten
     sts zaehler,temp               //; und wieder zurückschreiben

     pop temp                       //; die benutzten Register wiederherstellen
     out _SFR_IO_ADDR(SREG),temp
     pop temp
     reti

.end
```

Globale Variablen im Assemblerfile anlegen

Alternativ können Variablen aber auch im Assemblerfile angelegt werden. Dadurch kann auf eine .c-Datei verzichtet werden. Für das obige Beispiel könnte der Quelltext dann die Dateien zaehl_asm.S und zaehl_asm.h abgelegt werden, so dass nur noch zaehl_asm.S mit kompiliert werden müsste.

Anstatt im Assemblerfile über das Schlüsselwort *.extern* auf eine vorhandene Variable zu verweisen, wird dazu mit dem Schlüsselwort *.comm* die benötigte Anzahl von Bytes für eine Variable reserviert.

zaehl_asm.S

```
#include "avr/io.h"

temp = 16

//; 1 Byte im RAM für den Zähler reservieren
.comm zaehler, 1

.global INT0_vect
INT0_vect:

...
```

In der Headerdatei wird dann auf die Variable nur noch verwiesen (Schlüsselwort *extern*):

zaehl_asm.h

```
#ifndef ZAEHL_ASM_H
#define ZAEHL_ASM_H

extern volatile uint8_t zaehler;

#endif
```

Im Gegensatz zu globalen Variablen in C werden so angelegte Variablen nicht automatisch mit dem Wert 0 initialisiert.

Variablen größer als 1 Byte

Variablen, die größer als **ein** Byte sind, können in Assembler auf ähnliche Art angesprochen werden. Hierzu müssen nur genug Bytes angefordert werden, um die Variable aufzunehmen. Soll z.B. für den Zähler eine Variable vom Typ *unsigned long*, also *uint32_t* verwendet werden, so müssen 4 Bytes reserviert werden:

```
...
// 4 Byte im RAM für den Zähler reservieren
.comm zaehler, 4
...
```

Die dazugehörige Deklaration im Headerfile wäre dann:

```
...
extern volatile uint32_t zaehler;
...
```

Bei Variablen, die größer als ein Byte sind, werden die Werte beginnend mit dem niederwertigsten Byte im RAM abgelegt. Das folgende Codeschnippsel zeigt, wie unter Assembler auf die einzelnen Bytes zugegriffen werden kann. Dazu wird im Interrupt nun ein 32-Bit Zähler erhöht:

```
#include "avr/io.h"

temp = 16

// 4 Byte im RAM für den Zähler reservieren
.comm zaehler, 4

.global INT0_vect
INT0_vect:

     push temp                      // wichtig: Benutzte Register und das
     in temp,_SFR_IO_ADDR(SREG)     // Status-Register (SREG) sichern !
     push temp

     // 32-Bit-Zähler incrementieren
     lds temp, (zaehler + 0)        // 0. Byte (niederwertigstes Byte)
     inc temp
     sts (zaehler + 0), temp
     brne RAUS

     lds temp, (zaehler + 1)        // 1. Byte
     inc temp
     sts (zaehler + 1), temp
     brne RAUS

     lds temp, (zaehler + 2)        // 2. Byte
     inc temp
     sts (zaehler + 2), temp
     brne RAUS

     lds temp, (zaehler + 3)        // 3. Byte (höchstwertigstes Byte)
     inc temp
     sts (zaehler + 3), temp
     brne RAUS

RAUS:
     pop temp                       // die benutzten Register wiederherstellen
```

```
    out _SFR_IO_ADDR(SREG),temp
    pop temp
    reti

.end
```

TODO: 16-Bit / 32-Bit Variablen, Zugriff auf Arrays (Strings)

Anhang

Besonderheiten bei der Anpassung bestehenden Quellcodes

Einige Funktionen, die in frühren Versionen der avr-libc vorhanden waren, werden inzwischen als veraltet angesehen. Sie sind nicht mehr vorhanden oder als *deprecated* (missbilligt) ausgewiesen und Definitionen in <compat/deprected.h> verschoben. Es empfiehlt sich, vorhandenen Code zu portieren und die alten Funktionen nicht mehr zu nutzen, auch wenn diese noch zur Verfügung stehen.

Veraltete Funktionen zur Deklaration von Interrupt-Routinen

Die Funktionen (eigentlich Makros) *SIGNAL* und *INTERRUPT* zur Deklaration von Interruptroutinen sollten nicht mehr genutzt werden.

In aktuellen Versionen der avr-libc (z.B. avr-libc 1.4.3 aus WinAVR 20060125) werden Interruptroutinen, die **nicht** durch andere Interrupts **unterbrechbar** sind, mit ISR deklariert (siehe Abschnitt im Hauptteil). Auch die Benennung wurden vereinheitlicht und an die üblichen Bezeichnungen in den AVR Datenblättern angepasst. In der Dokumentation der avr-libc sind alte und neue Bezeichnungen in der Tabelle gegenübergestellt. Die erforderlichen Schritte zur Portierung:

- #include von avr/signal.h entfernen
- SIGNAL duch ISR ersetzen
- Name des Interrupt-Vektors anpassen (SIG_* durch entsprechendes *_vect)

Als Beispiel für die Anpassung zuerst ein "alter" Code:

```
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/signal.h>

...

/* Timer2 Output Compare bei einem ATmega8 */
SIGNAL(SIG_OUTPUT_COMPARE2)
{
   ...
}
```

Im Datenblatt wird der Vektor mit TIMER2 COMP bezeichnet. Die Bezeichnung in der avr-libc entspricht dem Namen im Datenblatt, Leerzeichen werden durch Unterstriche (_) ersetzt und ein _vect angehängt.

Der neue Code sieht dann so aus:

```
#include <avr/interrupt.h>
/* signal.h entfällt */

ISR(TIMER2_COMP_vect)
{
   ...
}
```

Bei Unklarheiten bezüglich der neuen Vektorlabels hilft (noch) ein Blick in die Headerdatei des entsprechenden Controllers. Für das vorherige Beispiel also der Blick in die Datei iom8.h für den ATmega8, dort findet man die veraltete Bezeichnung unterhalb der aktuellen.

```
...
/* $Id: iom8.h,v 1.13 2005/10/30 22:11:23 joerg_wunsch Exp $ */
/* avr/iom8.h - definitions for ATmega8 */
```

```
...

/* Timer/Counter2 Compare Match */
#define TIMER2_COMP_vect                _VECTOR(3)
#define SIG_OUTPUT_COMPARE2             _VECTOR(3)
...
```

Für **unterbrechbare** Interruptroutinen, die mittels *INTERRUPT* deklariert sind, gibt es keinen direkten Ersatz in Form eines Makros. Solche Routinen sind laut Dokumentation der avr-libc in folgender Form zu deklarieren:

```
void XXX_vect(void) __attribute__((interrupt));
void XXX_vect(void) {
  ...
}
```

Beispiel:

```
/* ** alt ** */
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>

//...

INTERRUPT(SIG_OVERFLOW0)
{
   ...
}

/* ** neu: ** */
#include <avr/io.h>

//...

void TIMER0_OVF_vect(void) __attribute__((interrupt));
void TIMER0_OVF_vect(void)
{
   ...
}
```

Will oder kann man den Code nicht portieren, ist zur weiteren Verwendung von *INTERRUPT* die Header-Datei *compat/deprecated.h* einzubinden. Man sollte bei dieser Gelegenheit jedoch nochmals überprüfen, ob die Funktionalität von *INTERRUPT* tatsächlich gewollt ist. In vielen Fällen wurde *INTERRUPT* dort genutzt, wo eigentlich *SIGNAL* (nunmehr *ISR*) hätte genutzt werden sollen.

Veraltete Funktionen zum Portzugriff

inp und *outp* zum Einlesen bzw. Schreiben von Registern sind nicht mehr erforderlich, der Compiler unterstützt dies ohne diesen Umweg.

```
unsigned char i, j;

// alt:
  i = inp(PINA);
  j = 0xff;
  outp(PORTB, j);

// neu (nicht mehr wirklich neu...):
  i = PINA
  j = 0xff;
  PORTB = j;
```

Will oder kann man den Code nicht portieren, ist zur weiteren Verwendung von inp und outp die Header-Datei **compat/deprecated.h** einzubinden.

Veraltete Funktionen zum Zugriff auf Bits in Registern

cbi und *sbi* zum Löschen und Setzen von Bits sind nicht mehr erforderlich, der Compiler unterstützt dies ohne diesen Umweg. Die Bezeichnung ist ohnehin irreführend da die Funktionen nur für Register mit Adressen im unteren Speicherbereich tatsächlich in die Assembleranweisungen cbi und sbi übersetzt werden.

```
// alt:
  sbi(PORTB, PB2);
  cbi(PORTC, PC1);

// neu (auch nicht mehr wirklich neu...):
  PORTB |=  (1<<PB2);
  PORTC &= ~(1<<PC1);
```

Will oder kann man den Code nicht portieren, ist zur weiteren Verwendung von sbi und cbi die Header-Datei **compat/deprecated.h** einzubinden. Wer unbedingt will, kann sich natürlich eigene Makros mit aussagekräftigeren Namen definieren. Zum Beispiel:

```
#define SET_BIT(PORT, BITNUM)    ((PORT) |=  (1<<(BITNUM)))
#define CLEAR_BIT(PORT, BITNUM)  ((PORT) &= ~(1<<(BITNUM)))
#define TOGGLE_BIT(PORT, BITNUM) ((PORT) ^=  (1<<(BITNUM)))
```

Selbstdefinierte (nicht-standardisierte) ganzzahlige Datentypen

Bei den im Folgenden genannten Typdefinitionen ist zu beachten, dass die Bezeichnungen für "Worte" teilweise je nach Prozessorplattform unterschiedlich verwendet werden. Die angegebenen Definitionen beziehen sich auf die im Zusammenhang mit AVR/8-bit-Controllern üblichen "Bit-Breiten" (In Erläuterungen zum ARM7TDMI z.B. werden oft 32-bit Integer mit "Wort" ohne weitere Ergänzung bezeichnet). Es empfiehlt sich, bei der Überarbeitung von altem Code die im Abschnitt *standardisierten ganzzahligen Datentypen* beschriebenen Datentypen zu nutzen (stdint.h) und damit "Missverständnissen" vorzubeugen, die z.B. bei der Portierung von C-Code zwischen verschiedenen Plattformen auftreten können.

```
typedef unsigned char      BYTE;       // besser: uint8_t  aus <stdint.h>
typedef unsigned short     WORD;       // besser: uint16_t aus <stdint.h>
typedef unsigned long      DWORD;      // besser: uint32_t aus <stdint.h>
typedef unsigned long long QWORD;      // besser: uint64_t aus <stdint.h>
```

BYTE
: Der Datentyp BYTE definiert eine Variable mit 8 Bit Breite zur Darstellung von ganzen Zahlen im Bereich zwischen 0 ... 255.

WORD
: Der Datentyp WORD definiert eine Variable mit 16 Bit Breite zur Darstellung von ganzen Zahlen im Bereich zwischen 0 ... 65535.

DWORD
: Der Datentyp DWORD (gesprochen: Double-Word) definiert eine Variable mit 32 Bit Breite zur Darstellung von ganzen Zahlen im Bereich zwischen 0 ... 4294967295.

QWORD
: Der Datentyp QWORD (gesprochen: Quad-Word) definiert eine Variable mit 64 Bit Breite zur Darstellung von ganzen Zahlen im Bereich zwischen 0 ... 18446744073709551615.

Zusätzliche Funktionen im Makefile

Bibliotheken (Libraries/.a-Dateien) hinzufügen

Um Funktionen aus Bibliotheken ("echte" Libraries, *.a-Dateien) zu nutzen, sind dem Linker die Namen der Bibliotheken als Parameter zu übergeben. Dazu ist die Option -l (kleines L) vorgesehen, an die der Name der Library angehängt wird.

Dabei ist zu beachten, dass der Name der Library und der Dateiname der Library nicht identisch sind. Der hinter -l angegebene Name entspricht dem Dateinamen der Library ohne die Zeichenfolge *lib* am Anfang des Dateinamens und ohne die Endung *.a*. Sollen z.B. Funktionen aus einer Library mit dem Dateinamen *libefsl.a* eingebunden (gelinkt) werden, lautet der entsprechende Parameter -lefsl (vergl. auch -lm zum Anbinden von libm.a).

In Makefiles wird traditonell eine make-Variable LDLIBS genutzt, in die "l-Parameter" abgelegt werden. Die WinAVR-makefile-Vorlage enthält diese Variable zwar nicht, dies stellt jedoch keine Einschränkung dar, da alle in der make-Variable LDFLAGS abgelegten Parameter an den Linker weitergereicht werden.

Beispiele:

```
# Einbinden von Funktionen aus einer Library efsl (Dateiname libefsl.a)
LDFLAGS += -lefsl
# Einbinden von Funktionen aus einer Library xyz (Dateiname libxyz.a)
LDFLAGS += -lxyz
```

Liegen die Library-Dateien nicht im Standard Library-Suchpfad, sind die Pfade mittels Parameter *-L* ebenfalls anzugeben. (Der vordefinierte Suchpfad kann mittels *avr-gcc --print-search-dirs* angezeigt werden.)

Als Beispiel ein Projekt ("superapp2"), in dem der Quellcode von zwei Libraries (efsl und xyz) und der Quellcode der eigentlichen Anwendung in verschiedenen Verzeichnissen mit der folgenden "Baumstruktur" abgelegt sind:

```
superapp2
|
+----- efslsource (darin libefsl.a)
|
+----- xyzsource (darin libxyz.a)
|
+----- firmware (darin Anwendungs-Quellcode und Makefile)
```

Daraus folgt, dass im Makefile die Verzeichnis efslsource und xyzsource in den Library-Suchpfad aufzunehmen sind:

```
LDFLAGS += -L../efslsource/ -L../xyzsource/
```

Fuse-Bits

Zur Berechnung der Fuse-Bits bietet sich neben dem Studium des Datenblattes auch der AVR Fuse Calculator an. Gewarnt werden muss vor der Benutzung von PonyProg, weil dort durch die negierte Darstellung gern Fehler gemacht werden.

Soll die Programmierung von Fuse- und Lockbits automatisiert werden, kann man dies ebenfalls durch Einträge im Makefile vornehmen, die beim Aufruf von "make program" an die genutzte Programmiersoftware übergeben werden. In der makefile-Vorlage von WinAVR (und mfile) gibt es dafuer jedoch keine "Ausfüllhilfe" (Stand 9/2006). Die folgenden Ausführungen gelten für die Programmiersoftware AVRDUDE (Standard in der WinAVR-Vorlage), können jedoch sinngemäß auf andere Programmiersoftware übertragen werden, die die Angabe der Fuse- und Lockbits-Einstellungen per Kommandozeilenparameter unterstützt (z.B. stk500.exe). Im einfachsten Fall ergänzt man im Makefile einige Variablen, deren Werte natürlich vom verwendeten Controller und den gewünschten Einstellungen abhängen (vgl. Datenblatt Fuse-/Lockbits):

```
#---------------- Programming Options (avrdude) ----------------

#...
#Beispiel! f. ATmega16 - nicht einfach uebernehmen! Zahlenwerte anhand
#--------- des Datenblatts nachvollziehen und gegebenenfalls aendern.
#
AVRDUDE_WRITE_LFUSE = -U lfuse:w:0xff:m
AVRDUDE_WRITE_HFUSE = -U hfuse:w:0xd8:m
AVRDUDE_WRITE_LOCK  = -U lock:w:0x2f:m
#...
```

Damit diese Variablen auch genutzt werden, ist der Aufruf von avrdude im Makefile entsprechend zu ergänzen:

```
# Program the device.
program: $(TARGET).hex $(TARGET).eep
# ohne Fuse-/Lock-Einstellungen (nach WinAVR Vorlage Stand 4/2006)
#       $(AVRDUDE) $(AVRDUDE_FLAGS) $(AVRDUDE_WRITE_FLASH) \
#        $(AVRDUDE_WRITE_EEPROM)
# mit Fuse-/Lock-Einstellungen
        $(AVRDUDE) $(AVRDUDE_FLAGS) $(AVRDUDE_WRITE_LFUSE) \
        $(AVRDUDE_WRITE_HFUSE) $(AVRDUDE_WRITE_FLASH) \
        $(AVRDUDE_WRITE_EEPROM) $(AVRDUDE_WRITE_LOCK)
```

Eine weiter Möglichkeit besteht darin, die Fuse- und Lockbit-Einstellungen vom Preprozessor/Compiler generieren zu lassen. Die Fuse-Bits werden dann bei Verwendung von AVRDUDE in eigene Hex-Files geschrieben. Hierzu kann man z.B. folgendes Konstrukt verwenden:

In eine der C-Sourcen wird eine Variable je Fuse-Byte vom Typ *unsigned char* deklariert und in eine extra Section gepackt. Dies kann entweder in einem vorhandenen File passieren oder in ein neues (z.B. fuses.c) geschrieben werden.

Das File muss im Makefile aber auf jeden Fall mit kompiliert und gelinkt werden.

```
// tiny 2313 fuses low byte
#define CKDIV8  7
#define CKOUT   6
#define SUT1    5
#define SUT0    4
#define CKSEL3  3
#define CKSEL2  2
#define CKSEL1  1
#define CKSEL0  0

// tiny2313 fuses high byte
#define DWEN       7
#define EESAVE     6
#define SPIEN      5
#define WDTON      4
#define BODLEVEL2  3
#define BODLEVEL1  2
#define BODLEVEL0  1
#define RSTDISBL   0

// tiny2313 fuses extended byte
#define SELFPRGEN  0

#define LFUSE         __attribute__ ((section ("lfuses")))
#define HFUSE         __attribute__ ((section ("hfuses")))
#define EFUSE         __attribute__ ((section ("efuses")))


// select ext crystal 3-8Mhz
unsigned char lfuse LFUSE =
    ( (1<<CKDIV8) | (1<<CKOUT) | (1<<CKSEL3) | (1<<CKSEL2) |
      (0<<CKSEL1) | (1<<CKSEL0) | (0<<SUT1) | (1<<SUT0) );
unsigned char hfuse HFUSE =
    ( (1<<DWEN) | (1<<EESAVE) | (0<<SPIEN) | (1<<WDTON) |
      (1<<BODLEVEL2) | (1<<BODLEVEL1) | (0<<BODLEVEL0) | (1<<RSTDISBL) );
unsigned char efuse EFUSE =
    ((0<<SELFPRGEN));
```

ACHTUNG: Die Bitpositionen wurden nicht vollständig getestet!

Eine "1" bedeutet hier, dass das Fuse-Bit *nicht* programmiert wird - die Funktion also i.A. nicht aktiviert ist. Eine "0" hingegen aktiviert die meisten Funktionen. Dies ist wie im Datenblatt (1 = unprogrammed, 0 = programmed).

Das Makefile muss nun noch um folgende Targets erweitert werden (mit Tabulator einrücken - nicht mit Leerzeichen):

```
lfuses: build
        -$(OBJCOPY) -j lfuses --change-section-address lfuses=0 \
          -O ihex $(TARGET).elf $(TARGET)-lfuse.hex
        @if [ -f $(TARGET)-lfuse.hex ]; then \
         $(AVRDUDE) $(AVRDUDE_FLAGS) -U lfuse:w:$(TARGET)-lfuse.hex; \
        fi;

hfuses: build
        -$(OBJCOPY) -j hfuses --change-section-address hfuses=0 \
          -O ihex $(TARGET).elf $(TARGET)-hfuse.hex
        @if [ -f $(TARGET)-hfuse.hex ]; then \
         $(AVRDUDE) $(AVRDUDE_FLAGS) -U hfuse:w:$(TARGET)-hfuse.hex; \
        fi;

efuses: build
        -$(OBJCOPY) -j efuses --change-section-address efuses=0 \
         -O ihex $(TARGET).elf $(TARGET)-efuse.hex
        @if [ -f $(TARGET)-efuse.hex ]; then \
         $(AVRDUDE) $(AVRDUDE_FLAGS) -U efuse:w:$(TARGET)-efuse.hex;
        fi;
```

Das Target "clean" muss noch um die Zeilen

```
        $(REMOVE) $(TARGET)-lfuse.hex
        $(REMOVE) $(TARGET)-hfuse.hex
        $(REMOVE) $(TARGET)-efuse.hex
```

erweitert werden, wenn auch die Fuse-Dateien gelöscht werden sollen.

Um nun die Fusebits des angeschlossenen Controllers zu programmieren muss lediglichein "make lfuses", "make hfuses" oder "make efuses" gestartet werden. Bei den Fuse-Bits ist besondere Vorsicht geboten, da diese das Programmieren des Controllers unmöglich machen können. Also erst programmieren, wenn man einen HV-Programmierer hat oder ein paar Reserve-AVRs zur Hand ;-)

Um weiterhin den "normalen" Flash beschreiben zu können, ist es wichtig, für das Target "*.hex" im Makefile nicht nur "-R .eeprom" als Parameter zu übergeben sondern zusätzlich noch "-R lfuses -R efuses -R hfuses". Sonst bekommt AVRDUDE Probleme diese Sections in den Flash (wo sie ja nicht hingehören) zu schreiben.

Siehe auch: Vergleich der Fuses bei verschiedenen Programmen

Externe Referenzspannung des internen Analog-Digital-Wandlers

Die minimale (externe) Referenzspannung des ADC darf nicht beliebig niedrig sein, vgl. dazu das (aktuellste) Datenblatt des verwendeten Controllers. z.B. beim ATMEGA8 darf sie laut Datenblatt (S.245, Tabelle 103, Zeile "VREF") 2,0V nicht unterschreiten. HINWEIS: diese Information findet sich erst in der letzten Revision (Rev. 2486O-10/04) des Datenblatts.

Meiner eigenen Erfahrung nach kann man aber (auf eigene Gefahr und natürlich nicht für Seriengeräte) durchaus noch ein klein wenig weiter heruntergehen, bei dem von mir unter die Lupe genommenen ATMEGA8L (also die Low-Voltage-Variante) funktioniert der ADC bei 5V Betriebsspannung mit bis zu VREF=1,15V hinunter korrekt, ab 1,1V und darunter digitalisiert er jedoch nur noch Blödsinn). Ich würde sicherheitshalber nicht unter 1,5V gehen und bei niedrigeren Betriebsspannungen mag sich die Untergrenze für VREF am Pin AREF ggf. nach oben**(!)** verschieben.

In der letzten Revision des Datenblatts ist außerdem korrigiert, dass ADC4 und ADC5 sehr wohl 10 Bit Genauigkeit bieten (und nicht bloß 8 Bit, wie in älteren Revisionen irrtümlich angegeben.)

TODO

- Aktualisierung Register- und Bitbeschreibungen an aktuelle AVR
- stdio.h, malloc()
- Code-Optimierungen ("tricks"), siehe auch Application Note AVR035: Efficient C Coding for AVR
- "naked"-Functionen
- SPI siehe SPI Bus mit Atmel AVR
- I²C Bus
- Bootloader (bez. auf boot.h)
- CAN-Bus
- Einsatz von einfachen Betriebssystemen auf dem AVR

Von "http://www.mikrocontroller.net/articles/AVR-GCC-Tutorial"

Kategorie: AVR