

AVR-Tutorial

für

AVR-Assembler

Aus „www.mikrocontroller.net“

**Der Inhalt entspricht dem Stand vom 16.05.2008.
Es erfolgte eine leichte Umformatierung zur besseren
Druckbarkeit.
Keine Gewährleistung irgendwelcher Art!**

Version 3

Für Verbesserungen, Anregungen, etc. (was die Formatierung betrifft), stehe ich unter black-zero@lycos.de oder im mikrocontroller.net-Forum unter dem User „Black“ gerne zur Verfügung.

Inhaltsverzeichnis

0 AVR	9
0.1 Architektur.....	9
0.2 Software	9
0.3 Boards & Starterkits	10
0.4 Kommerzielle Programmiergeräte (* Hardware-Debugger)	10
0.5 Projekte	10
0.6 Tutorials	10
0.7 Tipps & Hinweise	11
1 AVR-Tutorial	12
1.1 Was ist ein Mikrocontroller?	12
1.2 Wozu ist ein Mikrocontroller gut?	12
1.3 Welchen Mikrocontroller soll ich verwenden?	13
1.4 Assembler, Basic oder C?	13
2 AVR-Tutorial: Equipment	14
2.1 Hardware.....	14
2.1.1 Fertige Evaluations-Boards und Starterkits	14
2.1.2 Selbstbau.....	16
2.1.3 Ergänzende Hinweise zur Taktversorgung (kann übersprungen werden)	17
2.1.3.1 interner Takt.....	17
2.1.3.2 externer Takt.....	18
2.1.3.3 Quarz statt Quarzoszillator	18
2.1.3.4 Keramikschwinger/Resonator- statt Quarz/Oszillator	19
2.1.4 Stromversorgung	19
2.1.5 Der ISP-Programmierer	20
2.1.6 Sonstiges	20
2.2 Software	21
2.2.1 Assembler	21
2.2.2 C	21
2.2.3 Pascal	21
2.2.4 Basic	22
2.2.5 Forth	22
2.3 Literatur	22
3 AVR-Tutorial: IO-Grundlagen	23
3.1 Hardware	23
3.2 Zahlensysteme.....	24
3.3 Ausgabe	25
3.3.1 Assembler-Sourcecode	25
3.3.2 Assemblieren	25
3.3.3 Hinweis: Konfigurieren der Taktversorgung des ATmega8	25
3.3.4 Programmierklärung	26
3.4 Eingabe	28
3.4.1 Stolperfalle bei Matrixtastaturen etc.	28
3.5 Pullup-Widerstand.....	29
3.6 Zugriff auf einzelne Bits.....	30
3.7 Zusammenfassung der Portregister.....	31
3.8 Ausgänge benutzen, wenn mehr Strom benötigt wird.....	32

4 AVR-Tutorial: Logik.....	33
4.1 Allgemeines.....	33
4.2 Die Operatoren.....	33
4.2.1 UND.....	33
4.2.1.1 Wahrheitstabelle für 2 einzelne Bits.....	33
4.2.1.2 Verwendung.....	33
4.2.1.3 AVR Befehle.....	33
4.2.2 ODER.....	34
4.2.2.1 Wahrheitstabelle für 2 einzelne Bits.....	34
4.2.2.2 Verwendung.....	34
4.2.2.3 AVR Befehle.....	34
4.2.3 NICHT.....	35
4.2.3.1 Wahrheitstabelle.....	35
4.2.3.2 Verwendung.....	35
4.2.3.3 AVR Befehle.....	35
4.2.4 XOR (Exklusives Oder).....	35
4.2.4.1 Wahrheitstabelle für 2 einzelne Bits.....	35
4.2.4.2 Verwendung.....	36
4.2.4.3 AVR Befehle.....	36
5 AVR-Tutorial: Arithmetik8.....	37
5.1 Hardwareunterstützung	37
5.2 8 Bit versus 16 Bit	37
5.3 8-Bit Arithmetik ohne Berücksichtigung eines Vorzeichens	38
5.4 8-Bit Arithmetik mit Berücksichtigung eines Vorzeichens	39
5.4.1 Problem der Kodierung des Vorzeichens	39
5.4.2 2-er Komplement	39
5.5 spezielle Statusflags	41
5.5.1 Carry	41
5.6 Inkrementieren / Dekrementieren	41
5.6.1 AVR Befehle.....	41
5.7 Addition	42
5.7.1 AVR Befehle	42
5.8 Subtraktion	42
5.8.1 AVR Befehle.....	42
5.9 Multiplikation	43
5.9.1 Hardwaremultiplikation	43
5.9.1.1 AVR Befehl	43
5.9.2 Multiplikation in Software	43
5.10 Division	46
5.10.1 Division in Software	46
5.11 Arithmetik mit mehr als 8 Bit	48
6 AVR-Tutorial: Stack.....	49
6.1 Aufruf von Unterprogrammen	49
6.2 Sichern von Registern	52
6.3 Sprung zu beliebiger Adresse	53
6.4 Weitere Informationen (von Lothar Müller):	53

7 AVR-Tutorial: LCD	54
7.1 Das LCD und sein Controller.....	54
7.2 Anschluss an den Controller	56
7.3 Ansteuerung des LCDs im 4-Bit-Modus	56
7.4 Initialisierung des Displays	58
7.4.1 Initialisierung im 4 Bit Modus	58
7.4.2 Initialisierung im 8 Bit Modus	58
7.5 Routinen zur LCD-Ansteuerung	59
7.6 Anwendung.....	61
7.7 ASCII.....	62
7.8 Welche Befehle versteht das LCD?.....	63
7.8.1 Clear display: 0b00000001.....	63
7.8.2 Cursor home: 0b0000001x.....	64
7.8.3 Entry mode: 0b000001is.....	64
7.8.4 On/off control: 0b00001dcb.....	64
7.8.5 Cursor/Scrollen: 0b0001srxx.....	64
7.8.6 Konfiguration: 0b001dnfxx.....	65
7.8.7 Character RAM Address Set: 0b01aaaaaa.....	65
7.8.8 Display RAM Address Set: 0b1aaaaaaa.....	65
7.9 Einschub: Code aufräumen.....	66
7.9.1 Portnamen aus dem Code herausziehen.....	66
7.9.2 Registerbenutzung.....	68
7.9.3 Lass den Assembler rechnen.....	69
7.10 Ausgabe eines konstanten Textes	71
7.11 Zahlen ausgeben.....	73
7.11.1 Dezimal ausgeben.....	73
7.11.2 Unterdrückung von führenden Nullen.....	75
7.11.3 Hexadezimal ausgeben.....	76
7.11.4 Eine 16-Bit Zahl aus einem Registerpärchen ausgeben.....	76
7.12 Der überarbeitete, komplette Code.....	78
8 AVR-Tutorial: Interrupts	79
8.1 Definition.....	79
8.2 Mögliche Auslöser.....	79
8.3 INT0, INT1 und die zugehörigen Register.....	79
8.4 Interrupts generell zulassen.....	80
8.5 Die Interruptvektoren.....	80
8.6 Beenden eines Interrupthandlers.....	81
8.7 Aufbau der Interruptvektortabelle.....	81
8.8 Beispiel.....	83
8.9 Besonderheiten des Interrupthandlers.....	84
9 AVR-Tutorial: Vergleiche	86
9.1 Flags.....	86
9.1.1 Carry (C).....	86
9.1.2 Zero (Z).....	86
9.1.3 Negative (N).....	86
9.1.4 Overflow (V).....	86
9.1.5 Signed (S).....	86
9.1.6 Half Carry (H).....	87
9.1.7 Transfer (T).....	87
9.1.8 Interrupt (I).....	87

9.2	Vergleiche.....	87
9.2.1	CP - Compare.....	87
9.2.2	CPC - Compare with Carry.....	87
9.2.3	CPI - Compare Immediate.....	87
9.3	Bedingte Sprünge.....	88
9.3.1	Bedingte Sprünge für vorzeichenlose Zahlen	88
9.3.1.1	BRSH - Branch if Same or Higher	88
9.3.1.2	BRLO - Branch if Lower	88
9.3.2	Bedingte Sprünge für vorzeichenbehaftete Zahlen	88
9.3.2.1	BRGE - Branch if Greater or Equal	88
9.3.2.2	BRLT - Branch if Less Than	88
9.3.2.3	BRMI - Branch if Minus.....	88
9.3.2.4	BRPL - Branch if Plus.....	89
9.3.3	Sonstige bedingte Sprünge	89
9.3.3.1	BREQ - Branch if Equal.....	89
9.3.3.2	BRNE - Branch if Not Equal.....	89
9.3.3.3	BRCC - Branch if Carry Flag is Cleared.....	89
9.3.3.4	BRCS - Branch if Carry Flag is Set.....	89
9.3.4	Selten verwendete bedingte Sprünge	89
9.3.4.1	BRHC - Branch if Half Carry Flag is Cleared.....	89
9.3.4.2	BRHS - Branch if Half Carry Flag is Set.....	89
9.3.4.3	BRID - Branch if Global Interrupt is Disabled (Cleared).....	89
9.3.4.4	BRIS - Branch if Global Interrupt is Enabled (Set).....	89
9.3.4.5	BRTC - Branch if T Flag is Cleared.....	90
9.3.4.6	BRTS - Branch if T Flag is Set.....	90
9.3.4.7	BRVC - Branch if Overflow Cleared.....	90
9.3.4.8	BRVS - Branch if Overflow Set.....	90
9.4	Beispiele.....	90
9.4.1	Entscheidungen	90
9.4.2	Schleifenkonstrukte.....	90
10	AVR-Tutorial: Mehrfachverzweigung.....	92
10.1	Einleitung	92
10.2	Einfacher Ansatz	92
10.3	Sprungtabelle	94
10.4	Lange Sprungtabelle	96
10.5	Z-Pointer leicht verständlich	99
11	AVR-Tutorial: UART.....	100
11.1	Hardware	100
11.2	Software	101
11.2.1	UART konfigurieren	101
11.2.2	Senden von Zeichen	103
11.2.3	Senden von Zeichenketten	105
11.2.4	Empfangen von Zeichen per Polling.....	106
11.2.5	Empfangen von Zeichen per Interrupt	107
12	AVR-Tutorial: Speicher.....	111
12.1	Speichertypen	111
12.1.1	Flash-ROM	111
12.1.2	EEPROM	111
12.1.3	RAM	111

12.2 Anwendung	112
12.2.1 Flash-ROM	112
12.2.1.1 Neue Assemblerbefehle	115
12.2.2 EEPROM	116
12.2.2.1 Lesen	116
12.2.2.2 Schreiben	118
12.2.3 SRAM	120
12.3 Siehe auch	120
13 AVR-Tutorial: Timer.....	121
13.1 Was ist ein Timer?.....	121
13.2 Der Vorteiler (Prescaler).....	121
13.3 Erste Tests.....	122
13.4 Simulation im AVR-Studio.....	123
13.5 Wie schnell schaltet denn jetzt der Port?.....	124
13.6 Timer 0.....	125
13.6.1 TCCR0.....	125
13.6.2 TIMSK.....	125
13.7 Timer 1.....	126
13.7.1 TCCR1B.....	126
13.7.2 TCCR1A.....	126
13.7.3 OCR1A.....	126
13.7.4 OCR1B.....	127
13.7.5 ICR1.....	127
13.7.6 TIMSK.....	127
13.8 Timer 2.....	128
13.8.1 TCCR2.....	128
13.8.2 OCR2.....	128
13.8.3 TIMSK.....	128
13.9 Was geht noch mit einem Timer?.....	129
13.10 Weblinks	129
14 AVR-Tutorial: Uhr.....	130
14.1 Aufbau und Funktion	130
14.2 Das erste Programm	131
14.3 Ganggenauigkeit	134
14.4 Der CTC Modus des Timers	135
15 AVR-Tutorial: ADC.....	139
15.1 Was macht der ADC?	139
15.2 Elektronische Grundlagen	139
15.2.1 Beschaltung des ADC-Eingangs	139
15.2.2 Referenzspannung AREF.....	140
15.2.2.1 Interne Referenzspannung	140
15.2.2.2 Externe Referenzspannung	140
15.3 Ein paar ADC-Grundlagen	141
15.4 Umrechnung des ADC Wertes in eine Spannung	142
15.5 Die Steuerregister des ADC	143
15.5.1 ADMUX	143
15.5.2 ADCSRA.....	144
15.6 Die Ergebnisregister ADCL und ADCH	145
15.7 Beispiele	145

15.7.1 Ausgabe als ADC-Wert	145
15.7.2 Ausgabe als Spannungswert	149
16 AVR-Tutorial: Tasten.....	156
16.1 Erkennung von Flanken am Tasteneingang.....	156
16.2 Prellen.....	158
16.3 Entprellung.....	158
16.4 Kombinierte Entprellung und Flankenerkennung.....	160
16.4.1 Einfache Tastenentprellung und Abfrage.....	160
16.4.2 Tastenentprellung, Abfrage und Autorepeat.....	162
16.5 Fallbeispiel.....	164
17 AVR-Tutorial: PWM.....	167
17.1 Was bedeutet PWM?.....	167
17.2 PWM und der Timer.....	168
17.2.1 Fast PWM.....	168
17.2.2 Phasen-korrekte PWM.....	171
17.2.3 Phasen- und Frequenz-korrekte PWM.....	171
17.3 PWM in Software.....	172
17.3.1 Prinzip.....	172
17.3.2 Programm.....	172
17.4 Siehe auch	174
18 AVR-Tutorial: Schieberegister.....	175
18.1 Porterweiterung für Ausgänge	175
18.1.1 Aufbau	176
18.1.2 Funktionsweise.....	177
18.1.3 Ansteuerung per Software.....	178
18.1.4 Ansteuerung per SPI-Modul.....	180
18.1.5 Kaskadieren von Schieberegistern.....	182
18.1.6 Acht LEDs mit je 20mA pro Schieberegister	185
18.2 Porterweiterung für Eingänge	186
18.2.1 Aufbau	186
18.2.2 Funktionsweise	186
18.2.3 Schaltung	187
18.2.4 Ansteuerung per Software	188
18.2.5 Ansteuerung per SPI-Modul	190
18.3 Bekannte Probleme	192
18.4 Weblinks	192
19 AVR-Tutorial: SRAM.....	193
19.1 SRAM - Der Speicher des Controllers.....	193
19.2 Das .DSEG und .BYTE.....	193
19.3 spezielle Befehle.....	194
19.3.1 LDS.....	194
19.3.2 STS.....	194
19.3.3 Beispiel.....	194
19.4 Spezielle Register.....	196
19.4.1 Der Z-Pointer (R30 und R31).....	196
19.4.2 LD.....	196
19.4.3 LDD.....	196
19.4.4 ST.....	197

19.4.5 STD.....	197
19.4.6 Beispiel.....	197
19.4.7 X-Pointer, Y-Pointer.....	199
19.5 Siehe auch	199
20 AVR-Tutorial: 7-Segment-Anzeige.....	200
20.1 Typen von 7-Segment Anzeigen.....	200
20.2 Eine einzelne 7-Segment Anzeige.....	200
20.2.1 Schaltung.....	200
20.2.2 Codetabelle.....	202
20.2.3 Programm.....	203
20.4 Mehrere 7-Segment Anzeigen (Multiplexen).....	205
20.4.1 Schaltung.....	206
20.4.2 Programm.....	206
21 AVR-Artikel.....	212
21.1 AVR Fuses.....	212
21.1.1 Grundsätzliche Vorgehensweise	212
21.1.2 Kompatibilitätsfuses und manchmal lästige Defaults	212
21.1.3 SPIEN, DWEN und RSTDISBL	213
21.1.4 Taktquellen Fuse Einstellung	213
21.1.4.1 Reaktivieren bei fehlerhaften Taktquellen-Fuse-Einstellungen	214
21.2.5 Vergleich der Fuses bei verschiedenen Programmen	214
21.2.5.1 AVR Studio	215
21.2.5.2 Ponyprog2000.....	216
21.2.5.3 AVRDUDE	217
21.2.6 Tipps + Tricks	219
22 Anhang.....	220
22.1 Screenshots.....	220

0 AVR

Die AVR-[Mikrocontroller](#) von [Atmel](#) sind besonders in Deutschland sehr beliebt, da sie meist in DIL-Gehäusen verfügbar sind, per [In-System-Programming](#) programmiert werden können, und eine Vielzahl von kostenlosen Programmen zur Softwareentwicklung (Assembler, Compiler) existiert. Diese Eigenschaften machen den AVR zum perfekten Mikrocontroller für Anfänger.

Über die Bedeutung des Namens "AVR" gibt es verschiedene Ansichten; manche meinen er sei eine Abkürzung für [Advanced Virtual RISC](#), andere vermuten dass der Name aus den Anfangsbuchstaben der Namen der Entwickler ([Alf Egin Bogen](#) und [Vegard Wollan](#)) zusammengesetzt wurde. Laut Atmel ist der Name bedeutungslos.

0.1 Architektur

Die Architektur ist eine 8-Bit-[Harvard-Architektur](#), das heißt es gibt getrennte Speicher für Programmcode ([Flash-ROM](#)) und Daten ([RAM](#)). Bei der Programmierung hat das den Nachteil, dass sich Konstanten aus dem ROM nicht mit dem gleichen Code laden lassen wie Daten aus dem RAM. Abgesehen davon ist der Aufbau des Controllers recht übersichtlich und birgt wenige Fallstricke.

- 32 größtenteils gleichwertige Register
- 3 Pointerregister
- ca. 110 Befehle, die meist 1-2 Taktzyklen dauern
- Taktfrequenz bis 20 MHz
- Betriebsspannung von 1,8-5,5 V
- Speicher
 - 1-256 kB [Flash-ROM](#)
 - 0-4 kB [EEPROM](#)
 - 0-8 kB [RAM](#)
- Peripherie: [AD-Wandler](#), [Timer](#), [SPI](#), [I²C](#) (TWI), [UART](#), [externer SRAM](#)
- [JTAG](#) bei den größeren ATmegas

0.2 Software

- [AVR-Studio](#): Kostenlose Entwicklungsumgebung mit Simulator
- [KontrollerLab](#): Kostenlose Entwicklungsumgebung für KDE
- [AVR-GCC](#): Kostenloser C-Compiler
- [Bascom AVR](#), [FastAVR](#): beliebte Basic-Compiler
- [AVRCo Pascal Compiler](#)
- [amforth](#): interaktives ANS Forth für AVR unter GNU Lizenz (Open Source)

0.3 Boards & Starterkits

- [diverse im Mikrocontroller.net-Shop](#)
- [STK200](#)
- [STK500](#)
- [STK600](#)
- [AVR Butterfly](#)
- [RN-Control](#)
- [C-Control PRO](#)
- [myAVR Board](#)
- [AVR Lehrbuch und -bausatz](#)

0.4 Kommerzielle Programmiergeräte (* Hardware-Debugger)

- [STK500](#)
- AVR-ISP / AVR-ISP mkII
- AVR-Dragon *
- AVR JTAG-ICE *

0.5 Projekte

- [Digitaler Funktionsgenerator](#)
- [Midi Rekorder mit MMC/SD-Karte](#)
- [Schrittmotor-Controller \(Stepper\)](#)
- [Pulsuhrempfänger mit AVR Butterfly](#)
- [DCF77-Funkwecker mit AVR](#)
- [Fahrradcomputer](#)
- [Einfacher und billiger Webserver mit AtMega32](#)
- [AVR RFM12](#)

0.6 Tutorials

- [AVR-Tutorial](#)
- [AVR-GCC-Tutorial](#)
- <http://www.avr-asm-tutorial.net>

0.7 Tipps & Hinweise

- [AVR Typen](#) - Die verschiedenen Typen (AT90S, ATmega, ATTiny)
- [AVR Checkliste](#) - Liste mit Hinweisen zur Lösung üblicher Probleme
- [Fuse-Bits](#) - Das Setzen der Fuse-Bits ist ein berüchtigter Fallstrick bei den AVRs; vor dem Rumspielen damit unbedingt diese Hinweise lesen!
- [AVR In System Programmer](#) - Programmierhardware
- [Pony-Prog Tutorial](#) - Hinweise zur Programmiersoftware PonyProg
- [AVRDUDE](#) - Programmiersoftware für die Kommandozeile
- [AVR-GCC-Codeoptimierung](#) - Wie man mehr aus dem Controller rausholen kann, ohne ein Assembler-Guru sein zu muessen.
- [AVR Softwarepool](#) - Verschiedene Softwaremodule und Codeschnipsel aus der Codesammlung

Weitere Verweise (Links) auf externe Informationen und Projekte finden sich in der [Linksammlung](#).

1 AVR-Tutorial

1.1 Was ist ein Mikrocontroller?

Ein Mikrocontroller ist ein Prozessor. Der Unterschied zu PC-Prozessoren besteht darin, dass bei einem Mikrocontroller Speicher, Digital- und Analog-Ein- und -Ausgänge etc. meist auf einem einzigen Chip integriert sind, so dass eine Mikrocontroller-Anwendung oft mit ein paar wenigen Bauteilen auskommt.

Mikrocontroller werden als erstes an der Bit-Zahl des internen Datenbusses unterschieden: 4bit, 8bit, 16bit und 32bit. Diese Bit-Zahl kann man als die Länge der Daten interpretieren, die der Controller in einem Befehl verarbeiten kann. Die größte in 8 Bit (= 1 Byte) darstellbare Zahl ist die 255, somit kann ein 8bit-Mikrocontroller z.B. in einem Additionsbefehl immer nur Zahlen kleiner-gleich 255 verarbeiten. Zur Bearbeitung von größeren Zahlen werden dann jeweils mehrere Befehle hintereinander benötigt, was natürlich länger dauert.

Ein Mikrocontroller braucht zum Betrieb, wie jeder andere Prozessor auch, eine extern eingespeiste Taktfrequenz. Die maximale Frequenz mit der ein Controller betrieben werden kann, reicht von 1 MHz bei alten Controllern bis hin zu über 100 MHz bei teuren 32-bitern. Diese Taktfrequenz sagt jedoch noch nichts über die tatsächliche Geschwindigkeit eines Prozessors aus. So wird z.B. bei den meisten 8051-Controllern die Frequenz intern durch 12 geteilt, ein mit 24 MHz getakteter 8051 arbeitet also eigentlich nur mit 2 MHz. Benötigt dieser dann für einen Befehl durchschnittlich 2 Taktzyklen, so bleiben "nur" noch 1 Mio. Befehle pro Sekunde übrig - ein AVR, der ungeteilt mit 8MHz arbeitet und für die meisten Befehle nur einen Zyklus braucht, schafft dagegen fast 8 Mio. Befehle pro Sekunde.

1.2 Wozu ist ein Mikrocontroller gut?

Hier ein paar Beispiele, für welche Aufgaben Mikrocontroller verwendet werden (können):

- Ladegeräte
- Motorsteuerungen
- Roboter
- Messwerterfassung (z.B. Drehzahlmessung im Auto)
- Temperaturregler
- MP3-Player
- Schaltuhren
- Alarmanlagen
- ...

1.3 Welchen Mikrocontroller soll ich verwenden?

Ein Mikrocontroller für Hobbyanwender sollte idealerweise folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Gute Beschaffbarkeit und geringer Preis
- Handliche Bauform: Ein Controller mit 20 Pins ist leichter zu handhaben als einer mit 128
- Flash-ROM: Der Controller sollte mindestens 1000 mal neu programmiert werden können
- In-System-Programmierbarkeit (ISP): Man benötigt kein teures Programmiergerät und muss den Controller zur Programmierung nicht aus der Schaltung entfernen
- Kostenlose Software verfügbar: Assembler bekommt man praktisch immer kostenlos, C-Compiler seltener

Am besten werden diese Anforderungen zur Zeit wohl von den 8-bit-AVR-Controllern von Atmel erfüllt. Deshalb werde ich einen AVR, genauer gesagt den ATmega8, in diesem Tutorial einsetzen.

Und damit kein Missverständnis aufkommt: So etwas wie den "besten" Controller gibt es nicht. Es hängt immer von der Aufgabenstellung ab, welcher Controller **gut** dafür geeignet ist. Natürlich haben sich einige Controller als Standardtypen in der Praxis durchgesetzt, mit denen man in vielen Fällen ein gutes Auslangen hat und die mit ihrer Leistungsfähigkeit einen weiten Bereich abdecken können. Der ATmega8 ist z.B. so einer. Aber daneben gibt es noch viele andere.

Der AT90S4433, auf den dieses Tutorial ursprünglich ausgerichtet war, wurde mittlerweile von Atmel abgekündigt, man sollte also wenn möglich einen ATmega8 verwenden.

1.4 Assembler, Basic oder C?

Warum ist dieses Tutorial für Assembler geschrieben, wo es doch einen kostenlosen C-Compiler ([WinAVR](#), [AVR-GCC](#)) und einen billigen Basic-Compiler gibt?

Assembler ist für den Einstieg "von der Pike auf" am besten geeignet. Nur wenn man Assembler anwendet, lernt man den Aufbau eines Mikrocontrollers richtig kennen und kann ihn dadurch besser nutzen; außerdem stößt man bei jedem Compiler irgendwann mal auf Probleme, die sich nur oder besser durch das Verwenden von Assemblercode lösen lassen. Und sei es nur, dass man das vom Compiler generierte Assemblerlisting studiert, um zu entscheiden, ob und wie man eine bestimmte Sequenz im C-Code umschreiben soll, um dem Compiler das Optimieren zu ermöglichen/erleichtern.

Allerdings muss auch erwähnt werden, dass das Programmieren in Assembler besonders fehleranfällig ist und dass es damit besonders lange dauert, bis das Programm erste Ergebnisse liefert. Genau aus diesem Grund wurden "höhere" Programmiersprachen erfunden, weil man damit nicht immer wieder "das Rad neu erfinden" muss. Das gilt besonders, wenn vorbereitete Programmblöcke zur Verfügung stehen, die man miteinander kombinieren kann. Wer regelmäßig programmieren und auch längere Programme schreiben möchte, dem sei deshalb geraten, nach diesem Assembler-Tutorial C zu lernen, zum Beispiel mit dem [AVR-GCC-Tutorial](#).

Wer C schon kann, für den bietet es sich an, das Tutorial parallel in C und Assembler abzuarbeiten. Die meisten hier vorgestellten Assemblerprogramme lassen sich relativ einfach in C umsetzen. Dabei sollte großes Augenmerk darauf gelegt werden, dass die dem Programm zugrundeliegende Idee verstanden wurde. Nur so ist ein vernünftiges Umsetzen von Assembler nach C (oder umgekehrt) möglich. Völlig verkehrt wäre es, nach sich entsprechenden 'Befehlen' zu suchen und zu glauben, damit hätte man dann ein Programm von Assembler nach C übersetzt.

2 AVR-Tutorial: Equipment

2.1 Hardware

Ein Mikrocontroller alleine ist noch zu nichts nützlich. Damit man etwas damit anfangen kann, braucht man eine Schaltung, in die der Controller eingesetzt wird. Dazu werden bei Elektronikhändlern Platinen angeboten, die alles nötige (Taster, LEDs, Steckverbinder...) enthalten. Häufig enthalten diese Platinen nicht nur Platz für den Mikroprozessor, sondern auch einen ISP-Programmierer (Näheres dazu später).

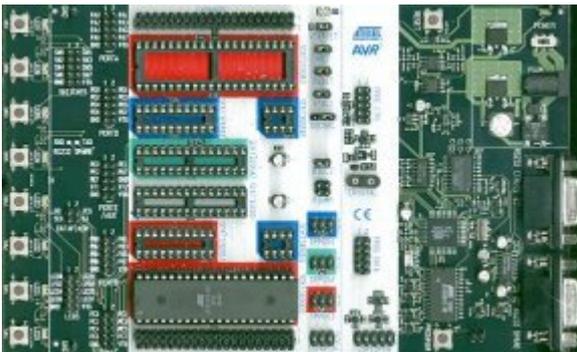
2.1.1 Fertige Evaluations-Boards und Starterkits

AVR Starterkit aus dem Mikrocontroller.net-Shop

Sehr gut für dieses Tutorial geeignet ist das [AVR-Starterkit aus dem Mikrocontroller.net-Shop](#). Das Kit enthält eine Platine mit dem Controller ATmega8, einen USB-ISP-Programmieradapter und ein Steckernetzteil.

STK500

Das STK500 ist das Standard-Board für AVR Entwicklung, direkt von Atmel. Es enthält auch einen ISP-Programmer und ist fertig aufgebaut. Es ist unter Entwicklern sehr beliebt und wird natürlich von Atmel unterstützt. Es gilt allgemein als gute Investition, wenn man ernsthaft in das Thema einsteigen möchte.



Das STK500 kostet bei Reichelt ca. 73 Euro.

Pollin Eval.-Board v2.x

Bei Pollin Elektronik gibt es für 15 Euro ein Evaluation Board zum Selbstlöten (mit Platine und Bauteilen, aber ohne Mikrocontroller). Auch dieses Board enthält einen ISP-Programmer, allerdings der einfacheren Sorte. Im Vergleich zum STK500 ist das Board recht unflexibel und hat weniger Features. Die Beschreibung zum Zusammenlöten des Boards ist ausreichend, zur Benutzung des Boards erfährt man außer dem Schaltplan praktisch nichts. Der Schaltplan und dieses AVR-Tutorial zusammen sind allerdings ausreichend.

Siehe: <http://www.pollin.de>

Pollin Funk-AVR-Evaluationsboard v1.x

Bei diesem Board besteht die Möglichkeit, Funkmodule wie das [RFM12](#), RFM01 oder RFM02 auf dem Board aufzulöten.

Siehe:

- [Pollin Funk-AVR-Evaluationsboard](#)
- <http://www.pollin.de>

ATmega8-Entwicklungsplatine

Eine weitere Möglichkeit ist die [ATmega8-Entwicklungsplatine von shop.mikrocontroller.net](#). Diese enthält eine Fassung für den Controller, einen Spannungswandler, die Beschaltung für die serielle Schnittstelle und einen Anschluss für den Programmieradapter. Die restliche Hardware wie LEDs und Taster kann man sich selber nach Belieben auf das Lochrasterfeld löten.

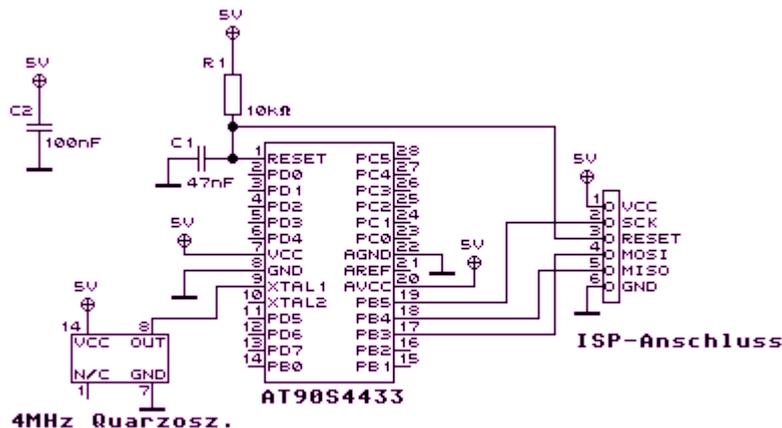
Andere

Das Angebot an AVR-Evaluationboards, -Experimentierplatinen, -Entwicklerplatinen oder wie die jeweiligen Hersteller ihre Produkte auch immer bezeichnen, ist mittlerweile recht groß geworden. Sie alle zu bewerten ist unmöglich geworden.

2.1.2 Selbstbau

Ein fertiges Board ist gar nicht nötig, man kann die benötigte Schaltung auch selbst auf einem kleinen Steckbrett oder einer Lochrasterplatine aufbauen. So kompliziert wie das STK500 wird es nicht, es reichen eine Hand voll Bauteile. Wie man das macht wird im Folgenden beschrieben.

Die folgende Schaltung baut man am besten auf einem **Breadboard** (Steckbrett) auf. Solche Breadboards gibt's z.B. bei [Reichelt](#), [ConeleK](#), [ELV](#) oder [Conrad](#).



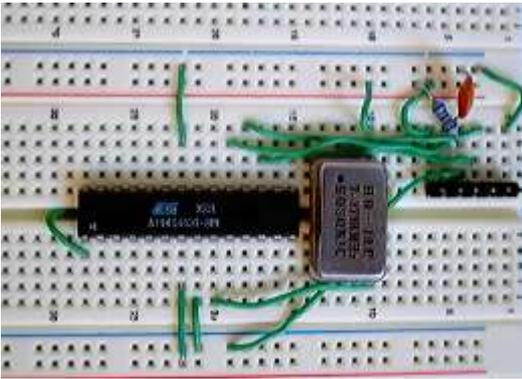
Über den Takteingang **XTAL1** ist der Mikrocontroller mit dem **Quarzoszillator** verbunden, der den benötigten Takt von 4 MHz liefert (siehe unten). Achtung: die Pins werden, wenn man den Oszillator mit der Schrift nach oben vor sich liegen hat, von unten links aus abgezählt. Unten links ist Pin 1, unten rechts Pin 7, oben rechts Pin 8 und oben links Pin 14 (natürlich hat der Oszillator nur 4 Pins. Die Nummerierung kommt daher, dass bei einem normalen IC dieser Größe an den gleichen Positionen die Pins Nr. 1, 7, 8 und 14 wären).

PD0-PD7 und **PB0-PB5** sind die **IO-Ports** des Mikrocontrollers. Hier können Bauteile wie LEDs, Taster oder LCDs angeschlossen werden. Der **Port C (PC0-PC5)** spielt beim Atmega8/AT90S4433 eine Sonderrolle: mit diesem Port können Analog-Spannungen gemessen werden. Aber dazu später mehr! An **Pin 17-19** ist die Stiftleiste zur Verbindung mit dem ISP-Programmer angeschlossen, über den der AVR vom PC programmiert wird (Achtung: PINs in Abbildung entsprechen nicht der Belegung des AVRISP mkII. Die korrekte Pin-Belegung kann im Handbuch des AVRISP mkII eingesehen werden). Die Resetschaltung, bestehend aus **R1** und **C1**, sorgt dafür, dass der Reseteingang des Controllers standardmäßig auf $V_{cc}=5V$ liegt. Zum Programmieren zieht der ISP-Adapter die Resetleitung auf Masse (GND), die Programmausführung wird dadurch unterbrochen und der interne Speicher des Controllers kann neu programmiert werden. Zwischen V_{cc} und GND kommt noch ein 100nF Keramik- oder Folienkondensator, um Störungen in der Versorgungsspannung zu unterdrücken.

Hier die Liste der benötigten Bauteile:

- R1 Widerstand 10 kOhm
- C1 Keramikkondensator 47 nF
- C2 Keramik- oder Folienkondensator 100 nF
- Stiftleiste 6-polig
- Mikrocontroller ATmega8 oder AT90S4433 (kann auf <http://shop.mikrocontroller.net/> bestellt werden)
- Quarzoszillator 4 MHz

Fertig aufgebaut könnte das etwa so aussehen:



Beim Breadboard ist darauf zu achten, dass man die parallel laufenden Schienen für GND (blau) und Vcc (rot) jeweils mit Drähten verbindet (nicht Vcc und GND miteinander!).

Eine Zusammenstellung der benötigten Bauteile befindet sich in der [Bestellliste](#).

2.1.3 Ergänzende Hinweise zur Taktversorgung (kann übersprungen werden)

Ein Mikrocontroller benötigt, wie jeder Computer, eine Taktversorgung. Der Takt ist notwendig, um die internen Abläufe im Prozessor in einer geordneten Reihenfolge ausführen zu können. Die Frequenz des Taktes bestimmt im Wesentlichen, wie schnell ein Computer arbeitet.

Bei einem ATmega8 gibt es 2 Möglichkeiten zur Taktversorgung

- interner Takt
- externer Takt

2.1.3.1 interner Takt

Dies ist der Auslieferungszustand bei einem Mega8. Dabei wird der Takt von einem internen Schwingkreis geliefert.

Vorteil: Keine externe Beschaltung notwendig. Die Pins, an denen ansonsten ein Quarz oder ein Quarzoszillator angeschlossen wird, sind daher als normale Portpins für Ein/Ausgaben verwendbar.

Nachteil: Der Schwingkreis ist nicht sehr genau. Bei Temperaturänderungen verändert er seine Frequenz. Nur 4 Frequenzen (1MHz, 2MHz, 4MHz und 8MHz) sind bei einem Mega8 realisierbar. Es gibt zwar die Möglichkeit, die interne Frequenz in Grenzen noch zu verändern, dies ist aber aufwändig und erfordert mindestens einen Frequenzzähler, wenn man eine bestimmte Frequenz erreichen will.

2.1.3.2 externer Takt

Hier gibt es diesmal drei Möglichkeiten:

- Quarz
- Quarzoszillator
- Keramischwinger/Resonator

Vorteil: Die Taktfrequenz ist so stabil, wie es der Quarz, Oszillator oder Keramischwinger vorgibt. Und das ist wesentlich genauer als der interne Oszillator. Kein Abgleich notwendig, wenn eine bestimmte Frequenz erreicht werden soll, solange es einen Quarz bzw. Oszillator oder Keramischwinger in dieser Frequenz gibt. Ein spezieller Vorteil des Keramischwingers ist, dass dieser keine Kondensatoren nach Masse braucht, weil er die schon eingebaut hat. Es muss lediglich ein dritter Pin mit Masse verbunden werden.

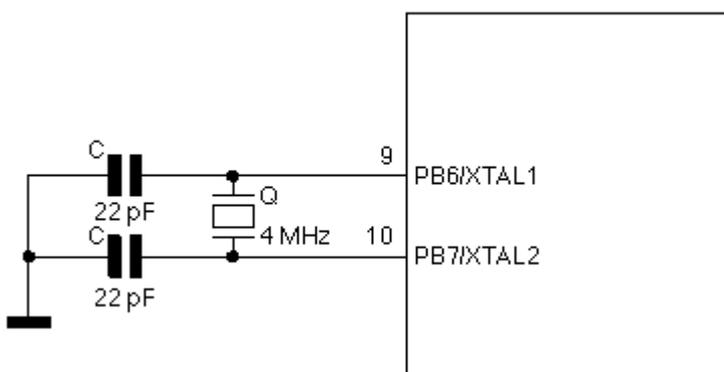
Nachteil: Die Pins an denen der Quarz bzw. Oszillator oder Keramischwinger angeschlossen wird, sind nicht mehr als I/O Pins nutzbar.

Spätestens dann, wenn eine RS232-Verbindung zu einem anderen Computer aufgebaut werden soll, ist eine exakte Taktversorgung einer der Schlüssel, um diese Verbindung auch stabil halten zu können. Aus diesem Grund wird in diesem Tutorial von vorne herein mit einem externen Takt gearbeitet. Es spielt dabei keine Rolle, ob dafür ein Quarzoszillator, ein Quarz oder ein Keramischwinger benutzt wird.

Achtung: Ein ATmega8 wird mit aktiviertem internen Takt ausgeliefert. Um einen Quarzoszillator oder einen Quarz zu aktivieren, müssen die Fuse-Bits des Prozessors verändert werden. Details dazu finden sich [hier](#)

2.1.3.3 Quarz statt Quarzoszillator

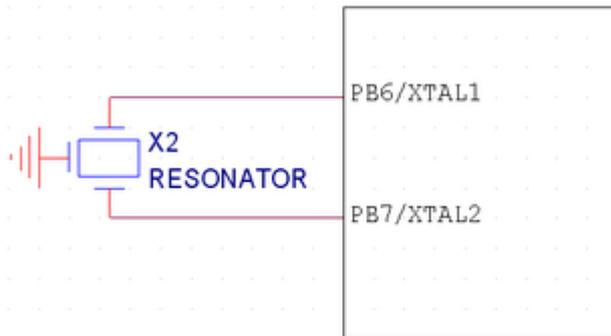
Wird anstelle eines Quarzoszillators ein Quarz eingesetzt, so sieht die Anbindung des Quarzes so aus:



Die beiden Kondensatoren C3 und C4 sind zum Betrieb des Quarzes notwendig. Ihre Größe ist abhängig von den Daten des Quarzes. 22pF sind ein Wert, der bei den meisten Quarzen funktionieren sollte.

2.1.3.4 Keramikschwinger/Resonator- statt Quarz/Oszillator

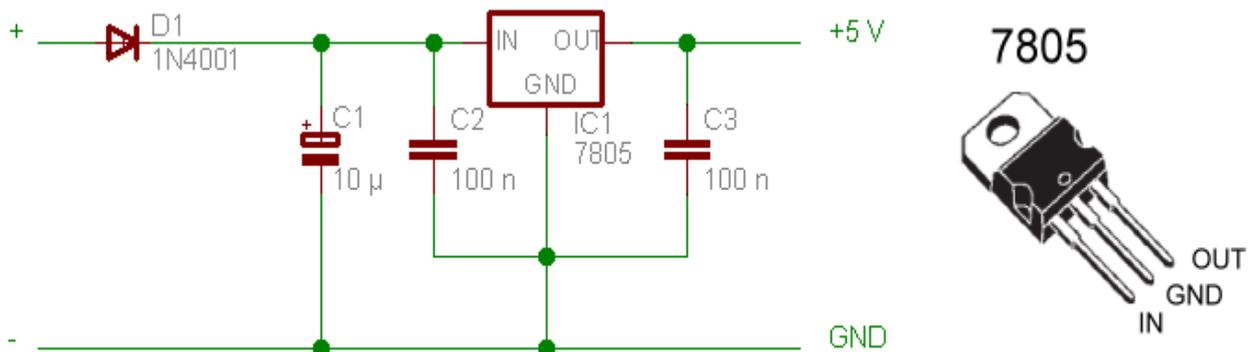
Wird anstelle eines Quarz/Oszillators ein Keramikschwinger eingesetzt, so sieht die Anbindung des Keramikschwingers so aus:



Es werden keine Kondensatoren benötigt, daher ist der Anschluss eines Keramikschwingers kinderleicht.

2.1.4 Stromversorgung

Die Versorgungsspannung V_{cc} beträgt 5V und kann z.B. mit folgender Schaltung erzeugt werden:



- IC1: 5V-Spannungsregler 7805
- C1: Elko 10µF (Polung beachten!)
- C2,C3: 2x Kondensator 100nF (kein Elektrolyt)
- D1: Diode 1N4001

An den Eingang (+ und - im Schaltplan) wird ein Steckernetzteil mit einer Spannung von 9 - 12V angeschlossen.

Eine Stromversorgung mit Batterien ist grundsätzlich auch möglich, wenn die elektrischen Grenzwerte des μC eingehalten werden (max. Spannung, min. Spannung). Bei der geregelten Stromversorgung oben sollte die Batteriespannung ca. 1.5 - 2.5V (Dropout-Spannung des Linearreglers) grösser sein als die Versorgungsspannung des μC . Die [Versorgung aus einer Zelle](#) ist ein Thema für Fortgeschrittene.

2.1.5 Der ISP-Programmierer

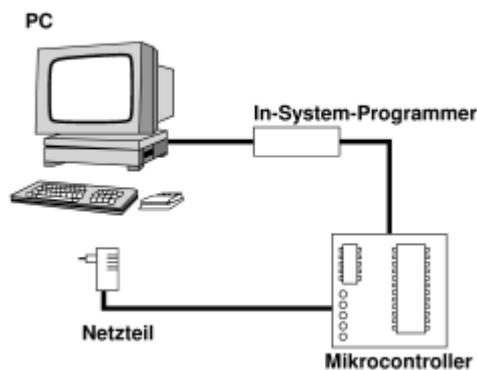
Dann braucht man nur noch den **ISP-Programmieradapter**, über den man die Programme vom PC in den Controller übertragen kann. Eine Übersicht über mögliche ISP-Programmer Varianten findet sich [hier](#).

Fertige ISP-Programmer zum Anschluss an den Parallelport oder USB gibt es z.B. auf <http://shop.mikrocontroller.net/>.

Eine Bauanleitung gibt es u.a. auf <http://rumil.de/hardware/avrisp.html>.

Den ISP-Adapter schließt man an den Parallelport an und verbindet ihn mit der Stiftleiste SV1 über ein 6-adriges Kabel (siehe Schaltplan).

So sieht die Anordnung also aus:



2.1.6 Sonstiges

Wer vorausschauend kauft, kauft mehr als einen Mikrocontroller. Bis der erste Controller defekt ist oder man durch Austauschen sicher gehen möchte, ob der Fehler im Programm oder im Controller ist, vergeht nur wenig Zeit.

Für die anderen Teile des Tutorials sollte man sich noch die folgenden Bauteile besorgen:

Teil 2 (I/O-Grundlagen)

- 5 LEDs 5mm
- 5 Taster
- 5 Widerstände 1k
- 5 Widerstände 10k

Teil 4 (LC-Display)

- 1 Potentiometer 10k
 - 1 HD44780-kompatibles LCD, z.B. 4x20 oder 2x16 Zeichen
-

Teil 6 (Der UART)

- 1 Pegelwandler MAX232, MAX232A oder MAX202
- 5 Kondensatoren
 - Bei einem MAX232: je 1µF Elektrolytkondensator
 - Bei einem MAX202 oder MAX232A: je 100nF Keramik- oder Elektrolytkondensator

Die Kondensatoren dürfen auch grösser sein. Ist man sich nicht sicher, welchen MAX232 man hat (A oder nicht A), dann die grösseren Kondensatoren 1µF nehmen, die funktionieren auch beim MAX232A oder MAX202.

- 1 9-polige SUBD-Buchse (female)
- 1 dazu passendes Modem(nicht Nullmodem!)-Kabel

Für weitere Bauteile, die man als angehender µC Bastler auch des Öfteren mal benötigt, empfiehlt sich ein Blick in die Liste der [Standardbauelemente](#) bzw. in die [Grundausrüstung](#)

2.2 Software

In diesem Tutorial wird nur auf die Programmierung in Assembler eingegangen, da Assembler für das Verständnis der Hardware am besten geeignet ist.

2.2.1 Assembler

Zuerst braucht man einen **Assembler**, der in Assemblersprache geschriebene Programme in Maschinencode übersetzt. Windows-User können das [AVR-Studio](#) von Atmel verwenden, das neben dem Assembler auch einen Simulator enthält, mit dem sich die Programme vor der Übertragung in den Controller testen lassen; für Linux gibt es [tavrasm](#), [avra](#) und [gavrasm](#).

Um die vom Assembler erzeugte ".hex"-Datei über den ISP-Adapter in den Mikrocontroller zu programmieren, kann man unter Windows z.B. das Programm [yaap](#) verwenden, für Linux gibt es [uisp](#), für beide avrdude.

2.2.2 C

Wer in C programmieren möchte, kann den kostenlosen GNU-C-Compiler AVR-GCC (unter Windows "WinAVR") ausprobieren. Dieser C-Compiler kann auch in das für Assembler-Programmierung notwendige AVR-Studio integriert werden. In der Artikelsammlung gibt es ein umfangreiches [Tutorial](#) zu diesem Compiler; Fragen dazu stellt man am besten hier im [GCC-Forum](#).

2.2.3 Pascal

Wer in Pascal programmieren muss, kann [AVRPascal](#) ausprobieren. Dieser Pascalcompiler ist kostenfrei bis 4kb Code und bietet viele ausgereifte Bibliotheken. [E-LAB](#).

2.2.4 Basic

Auch Basic-Fans kommen nicht zu kurz, für die gibt es z.B. [Bascom AVR](#) (\$69, Demo verfügbar).

2.2.5 Forth

Wer einen direkten und interaktiven Zugang zum Controller haben will, sollte sich [Forth](#) anschauen. Voraussetzung ist ein serieller Anschluß (Max232), also etwas mehr als die Minimalbeschaltung.

2.3 Literatur

Bevor man anfängt, sollte man sich die folgenden PDF-Dateien runterladen und zumindest mal reinschauen:

- [Datenblatt des ATmega8 \(4,54 MB\)](#)
- [Befehlssatz der AVR's \(422 kB\)](#)

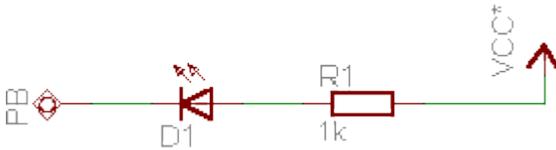
Das Datenblatt eines Controllers ist das wichtigste Dokument für einen Entwickler. Es enthält Informationen über die Pinbelegung, Versorgungsspannung, Beschaltung, Speicher, die Verwendung der IO-Komponenten und vieles mehr.

Im Befehlssatz sind alle Assemblerbefehle der AVR-Controllerfamilie aufgelistet und erklärt.

3 AVR-Tutorial: IO-Grundlagen

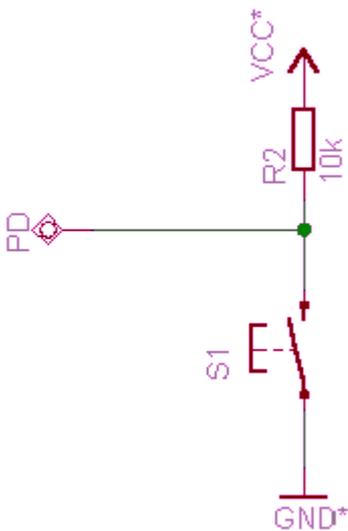
3.1 Hardware

Für die ersten Versuche braucht man nur ein paar Taster und [LEDs](#) an die IO-Ports des AVR angeschlossen. An **PB0-PB5** schließt man 6 LEDs über einen Vorwiderstand von je 1 k Ω gegen Vcc (5V) an. In der Praxis ist es unerheblich, ob der Widerstand vor oder nach der Diode liegt, wichtig ist nur, dass er da ist. Weitere Details zu LEDs und entsprechenden Vorwiderständen findet ihr im Artikel über [LEDs](#) und in diesem [Thread im Forum](#).



Dass die LEDs an den gleichen Pins wie der ISP-Programmer angeschlossen sind, stört übrigens normalerweise nicht. Falls wider Erwarten deshalb Probleme auftreten sollten, kann man versuchen, den Vorwiderstand der LEDs zu vergrößern.

An **PD0-PD3** kommen 4 Taster mit je einem 10 k Ω Pullup-Widerstand:



3.2 Zahlensysteme

Bevor es losgeht, hier noch ein paar Worte zu den verschiedenen Zahlensystemen.

Binärzahlen werden für den Assembler im Format **0b00111010** geschrieben, Hexadezimalzahlen als **0x7F**. Umrechnen kann man die Zahlen z.B. mit dem Windows-Rechner. Hier ein paar Beispiele:

Dezimal	Hexadezimal	Binär
0	0x00	0b00000000
1	0x01	0b00000001
2	0x02	0b00000010
3	0x03	0b00000011
4	0x04	0b00000100
5	0x05	0b00000101
6	0x06	0b00000110
7	0x07	0b00000111
8	0x08	0b00001000
9	0x09	0b00001001
10	0x0A	0b00001010
11	0x0B	0b00001011
12	0x0C	0b00001100
13	0x0D	0b00001101
14	0x0E	0b00001110
15	0x0F	0b00001111
100	0x64	0b01100100
255	0xFF	0b11111111

"0b" und "0x" haben für die Berechnung keine Bedeutung, sie zeigen nur an, dass es sich bei dieser Zahl um eine Binär- bzw. Hexadezimalzahl handelt.

Wichtig dabei ist es, dass Hexadezimal- bzw. Binärzahlen bzw. Dezimalzahlen nur unterschiedliche Schreibweisen für immer das Gleiche sind: Eine Zahl. Welche Schreibweise bevorzugt wird, hängt auch vom Verwendungszweck ab. Je nachdem kann die eine oder die andere Schreibweise klarer sein.

Auch noch sehr wichtig: Computer und μ Cs beginnen immer bei 0 zu zählen, d.h. wenn es 8 Dinge (Bits etc.) gibt hat das erste die Nummer 0, das zweite die Nummer 1, ..., und das letzte (das 8.) die Nummer 7 (!).

3.3 Ausgabe

3.3.1 Assembler-Sourcecode

Unser erstes Assemblerprogramm, das wir auf dem Controller laufen lassen möchten, sieht so aus:

```
.include "m8def.inc"           ; Definitionsdatei für den Prozessortyp einbinden

ldi r16, 0xFF                 ; lade Arbeitsregister r16 mit der Konstanten 0xFF
out DDRB, r16                 ; Inhalt von r16 ins IO-Register DDRB ausgeben

ldi r16, 0b11111100           ; 0b11111100 in r16 laden
out PORTB, r16                ; r16 ins IO-Register PORTB ausgeben

ende:                          rjmp ende           ; Sprung zur Marke "ende" -> Endlosschleife
```

3.3.2 Assemblieren

Das Programm muss mit der Endung ".asm" abgespeichert werden, z.B. als "leds.asm". Diese Datei können wir aber noch nicht direkt auf den Controller programmieren. Zuerst müssen wir sie dem Assembler füttern. Bei wavrasm funktioniert das z.B., indem wir ein neues Fenster öffnen, den Programmtext hineinkopieren, speichern und auf "assemble" klicken. Wichtig ist, dass sich die Datei "m8def.inc" (wird beim Atmel-Assembler mitgeliefert) im gleichen Verzeichnis wie die Assembler-Datei befindet. Der Assembler übersetzt die Klartext-Befehle des Assemblercodes in für den Mikrocontroller verständlichen Binärcode und gibt ihn in Form einer sogenannten "Hex-Datei" aus. Diese Datei kann man dann mit der entsprechenden Software direkt in den Controller programmieren.

3.3.3 Hinweis: Konfigurieren der Taktversorgung des ATmega8

Beim ATmega8 ist standardmäßig der interne 1 MHz-Oszillator aktiviert; weil dieser für viele Anwendungen (z.B. das UART, siehe späteres Kapitel) aber nicht genau genug ist, soll der Mikrocontroller seinen Takt aus dem angeschlossenen 4 MHz-Quarzoszillator beziehen. Dazu müssen ein paar Einstellungen an den Fusebits des Controllers vorgenommen werden. Am besten und sichersten geht das mit dem Programm yaap. Wenn man das Programm gestartet hat und der ATmega8 richtig erkannt wurde, wählt man aus den Menüs den Punkt "Lock Bits & Fuses" und klickt zunächst auf "Read Fuses". Das Ergebnis sollte so aussehen: Screenshot. Nun ändert man die Kreuze so, dass das folgende Bild entsteht: Screenshot und klickt auf "Write Fuses". Vorsicht, wenn die Einstellungen nicht stimmen, kann es sein, dass die ISP-Programmierung deaktiviert wird und man den AVR somit nicht mehr programmieren kann! Die FuseBits bleiben übrigens nach dem Löschen des Controllers aktiv, müssen also nur ein einziges Mal eingestellt werden. Mehr über die Fuse-Bits findet sich im Artikel AVR Fuses.

Nach dem Assemblieren sollte eine neue Datei mit dem Namen "leds.hex" oder "leds.rom" vorhanden sein, die man mit yaap, PonyProg oder AVRISP in den Flash-Speicher des Mikrocontrollers laden kann. Wenn alles geklappt hat, leuchten jetzt die ersten beiden angeschlossenen LEDs.

3.3.4 Programmerklärung

In der ersten Zeile wird die Datei `m8def.inc` eingebunden, welche die prozessortypischen Bezeichnungen für die verschiedenen Register definiert. Wenn diese Datei fehlen würde, wüsste der Assembler nicht, was mit "PORTB", "DDRD" usw. gemeint ist. Für jeden AVR-Mikrocontroller gibt es eine eigene derartige Include-Datei, da zwar die Registerbezeichnungen bei allen Controllern mehr oder weniger gleich sind, die Register aber auf unterschiedlichen Controllern unterschiedlich am Chip angeordnet sind und nicht alle Funktionsregister auf allen Prozessoren existieren. Für einen ATmega8 beispielsweise würde die einzubindende Datei `m8def.inc` heißen. Normalerweise ist also im Namen der Datei der Name des Chips in irgendeiner Form, auch abgekürzt, enthalten. Kennt man den korrekten Namen einmal nicht, so sieht man ganz einfach nach. Alle Include-Dateien wurden von Atmel in einem gemeinsamen Verzeichnis gespeichert. Das Verzeichnis ist bei einer Standardinstallation am PC auf `C:\Programme\Atmel\AVR Tools\AvrAssembler\Appnotes\`. Einige Include-Dateien heißen

```
AT90s2313: 2313def.inc
ATmega8:   m8def.inc
ATmega16: m16def.inc
ATmega32: m32def.inc
ATTiny12:  tn12def.inc
ATTiny2313: tn2313def.inc
```

Um sicher zu gehen, dass man die richtige Include-Datei hat, kann man diese mit einem Texteditor (AVR-Studio oder Notepad) öffnen. Der Name des Prozessors wurde von Atmel immer an den Anfang der Datei geschrieben:

```

;*****
;* A P P L I C A T I O N   N O T E   F O R   T H E   A V R   F A M I L Y
;*
;* Number                :AVR000
;* File Name              : "2313def.inc"
;* Title                  :Register/Bit Definitions for the AT90S2313
;* Date                   :99.01.28
;* Version                :1.30
;* Support E-Mail         :avr@atmel.com
;* Target MCU             :AT90S2313
...

```

Aber jetzt weiter mit dem selbstgeschriebenen Programm.

In der 2. Zeile wird mit dem Befehl `ldi r16, 0xFF` der Wert `0xFF` (entspricht `0b11111111`) in das Register `r16` geladen (mehr Infos unter [Adressierung](#)). Die AVRs besitzen 32 Arbeitsregister, `r0-r31`, die als Zwischenspeicher zwischen den I/O-Registern (z.B. `DDRB`, `PORTB`, `UDR...`) und dem RAM genutzt werden. Zu beachten ist außerdem, dass die ersten 16 Register (`r0-r15`) nicht von jedem Assemblerbefehl genutzt werden können. Ein Register kann man sich als eine Speicherzelle direkt im Mikrocontroller vorstellen. Natürlich besitzt der Controller noch viel mehr Speicherzellen, die werden aber ausschliesslich zum Abspeichern von Daten verwendet. Um diese Daten zu manipulieren, müssen sie zuerst in eines der Register geladen werden. Nur dort ist es möglich, die Daten zu manipulieren und zu verändern. Ein Register ist also vergleichbar mit einer Arbeitsfläche, während der restliche Speicher eher einem Stauraum entspricht. Will man arbeiten, so muss das Werkstück (= die Daten) aus dem Stauraum auf die Arbeitsfläche geholt werden und kann dann dort bearbeitet werden.

Die Erklärungen nach dem Semicolon sind Kommentare und werden vom Assembler nicht beachtet.

Der 3. Befehl gibt den Inhalt von r16 (=0xFF) in das Datenrichtungsregister für Port B aus. Das Datenrichtungsregister legt fest, welche Portpins als Ausgang und welche als Eingang genutzt werden. Steht in diesem Register ein Bit auf 0, wird der entsprechende Pin als Eingang konfiguriert, steht es auf 1, ist der Pin ein Ausgang. In diesem Fall sind also alle 6 Pins von Port B Ausgänge. Datenrichtungsregister können ebenfalls nicht direkt beschrieben werden, daher muss man den Umweg über eines der normalen Register r16 - r31 gehen.

Der nächste Befehl, **ldi r16, 0b11111100** lädt den Wert 0b11111100 in das Arbeitsregister r16, der durch den darauffolgenden Befehl **out PORTB, r16** in das I/O-Register PORTB (und damit an den Port, an dem die LEDs angeschlossen sind) ausgegeben wird. Eine 1 im PORTB-Register bedeutet, dass an dem entsprechenden Anschluss des Controllers die Spannung 5V anliegt, bei einer 0 sind es 0V (Masse).

Schließlich wird mit **rjmp ende** ein Sprung zur Marke **ende:** ausgelöst, also an die gleiche Stelle, wodurch eine Endlosschleife entsteht. Sprungmarken schreibt man gewöhnlich an den Anfang der Zeile, Befehle in die 2. und Kommentare in die 3. Spalte.

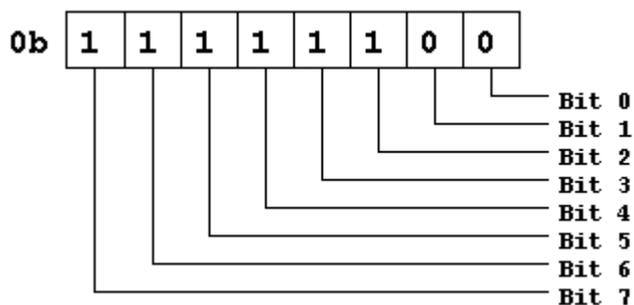
Bei Kopier- und Ladebefehlen (ldi, in, out...) wird immer der 2. Operand in den ersten kopiert:

```
ldi R17, 15      ; das Register R17 wird mit der Konstanten 15
                  ; geladen
mov R16, R17    ; das Register R16 wird mit dem Inhalt
                  ; des Registers R17 geladen
out PORTB, R16  ; das IO-Register "PORTB" wird mit dem Inhalt
                  ; des Registers R16 geladen
in R16, PIND     ; das Register 16 wird mit dem Inhalt
                  ; des IO-Registers "PIND" geladen
```

Wer mehr über die Befehle wissen möchte, sollte sich die PDF-Datei [Instruction Set \(422kB\)](#) runterladen (benötigt [Acrobat Reader](#) oder in der Hilfe von Assembler oder AVR-Studio nachschauen. Achtung: nicht alle Befehle sind auf jedem Controller der AVR-Serie verwendbar!

Nun sollten die beiden ersten LEDs leuchten, weil die Portpins PB0 und PB1 durch die Ausgabe von 0 (low) auf Masse (0V) gelegt werden und somit ein Strom durch die gegen Vcc (5V) geschalteten LEDs fließen kann. Die 4 anderen LEDs sind aus, da die entsprechenden Pins durch die Ausgabe von 1 (high) auf 5V liegen.

Warum leuchten die beiden ersten LEDs, wo doch die beiden letzten Bits auf 0 gesetzt sind? Das liegt daran, dass man die Bitzahlen von rechts nach links schreibt. Ganz rechts steht das niedrigstwertige Bit ("LSB", Least Significant Bit), das man als Bit 0 bezeichnet, und ganz links das höchstwertige Bit ("MSB", Most Significant Bit), bzw. Bit 7. Das Prefix "0b" gehört nicht zur Zahl, sondern sagt dem Assembler, dass die nachfolgende Zahl in binärer Form interpretiert werden soll.



Das LSB steht für PB0, und das MSB für PB7... aber PB7 gibt es doch beim AT90S4433 gar nicht, es geht doch nur bis PB5? Der Grund ist einfach: Am Gehäuse des AT90S4433 gibt es nicht genug Pins für den kompletten Port B, deshalb existieren die beiden obersten Bits nur intern.

3.4 Eingabe

Im folgenden Programm wird Port B als Ausgang und Port D als Eingang verwendet:

[Download leds+buttons.asm](#)

```
.include "m8def.inc"

ldi r16, 0xFF
out DDRB, r16      ; Alle Pins am Port B durch Ausgabe von 0xFF ins
                  ; Richtungsregister DDRB als Ausgang konfigurieren

ldi r16, 0x00
out DDRD, r16      ; Alle Pins am Port D durch Ausgabe von 0x00 ins
                  ; Richtungsregister DDRD als Eingang konfigurieren

loop:
in r16, PIND       ; an Port D anliegende Werte (Taster) nach
                  ; r16 einlesen
out PORTB, r16     ; Inhalt von r16 an Port B ausgeben
rjmp loop          ; Sprung zu "loop:" -> Endlosschleife
```

Wenn der Port D als Eingang geschaltet ist, können die anliegenden Daten über das IO-Register **PIND** eingelesen werden. Dazu wird der Befehl **in** verwendet, der ein IO-Register (in diesem Fall PIND) in ein Arbeitsregister (z.B. r16) kopiert. Danach wird der Inhalt von r16 mit dem Befehl **out** an Port B ausgegeben. Dieser Umweg ist notwendig, da man nicht direkt von einem IO-Register in ein anderes kopieren kann.

rjmp loop sorgt dafür, dass die Befehle **in r16, PIND** und **out PORTB, r16** andauernd wiederholt werden, so dass immer die zu den gedrückten Tasten passenden LEDs leuchten.

3.4.1 Stolperfalle bei Matrixtastaturen etc.

Vorsicht! In bestimmten Situationen kann es passieren, dass scheinbar Pins nicht richtig gelesen werden.

Speziell bei der Abfrage von Matrixtastaturen kann der Effekt auftreten, dass Tasten scheinbar nicht reagieren. Typische Sequenzen sehen dann so aus.

```
ldi r16, 0x0F
out DDRD, r16      ; oberes Nibble Eingang, unteres Ausgang
ldi r16, 0xFE
out PORTD, r16     ; PD0 auf 0 ziehem, PD4..7 Pull ups aktiv
in r17, PIND       ; Pins lesen schlägt hier fehl!
```

Warum ist das problematisch? Nun, der AVR ist ein RISC Mikrocontroller, welcher die meisten Befehle in einem Takt ausführt. Gleichzeitig werden aber alle Eingangssignale über FlipFlops abgetastet (synchronisiert), damit sie sauber im AVR zur Verfügung stehen. Dadurch ergibt sich eine Verzögerung (Latenz) von bis zu 1,5 Takten, mit der auf externe Signale reagiert werden kann. Die Erklärung dazu findet man im Datenblatt unter der Überschrift "I/O Ports - Reading the Pin Value".

Was tun? Wenn der Wert einer Port-Eingabe von einer unmittelbar vorangehenden Port-Ausgabe abhängt, muss man wenigstens einen weiteren Befehl zwischen beiden einfügen, im einfachsten Fall ein NOP.

```

ldi r16, 0x0F
out DDRD, r16      ; oberes Nibble Eingang, unteres Ausgang
ldi r16, 0xFE
out PORTD, r16    ; PD0 auf 0 ziehem, PD4..7 Pull ups aktiv
NOP               ; Delay der Synchronisations-FlipFlops ausgleichen
in r17, PIND      ; Pins lesen ist hier OK.

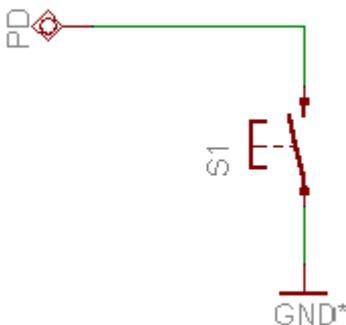
```

Ein weiteres Beispiel für dieses Verhalten bei rasch aufeinanderfolgenden **OUT** und **IN** Anweisungen ist in einem Forenbeitrag zur [Abfrage des Busyflag bei einem LCD](#) angegeben. Dort spielen allerdings weitere, vom **LCD** Controller abhängige Timings eine wesentliche Rolle für den korrekten Programmablauf.

3.5 Pullup-Widerstand

Bei der Besprechung der notwendigen Beschaltung der Ports wurde an einen Eingangspin jeweils ein Taster mit einem Widerstand nach Vcc vorgeschlagen. Diesen Widerstand nennt man einen **Pullup**-Widerstand. Wenn der Taster geöffnet ist, so ist es seine Aufgabe, den Eingangspiegel am Pin auf Vcc zu ziehen. Daher auch der Name: 'pull up' (engl. für hochziehen). Ohne diesen Pullup-Widerstand würde ansonsten der Pin bei geöffnetem Taster in der Luft hängen, also weder mit Vcc noch mit GND verbunden sein. Dieser Zustand ist aber unbedingt zu vermeiden, da bereits elektromagnetische Einstreuungen auf Zuleitungen ausreichen, dem Pin einen Zustand vorzugaukeln, der in Wirklichkeit nicht existiert. Der Pullup-Widerstand sorgt also für einen definierten 1-Pegel bei geöffnetem Taster. Wird der Taster geschlossen, so stellt dieser eine direkte Verbindung zu GND her und der Pegel am Pin fällt auf GND. Durch den Pullup-Widerstand rinnt dann ein kleiner Strom von Vcc nach GND. Da Pullup-Widerstände in der Regel aber relativ hochohmig sind, stört dieser kleine Strom meistens nicht weiter.

Anstelle eines externen Widerstandes wäre es auch möglich, den Widerstand wegzulassen und stattdessen den in den AVR eingebauten Pullup-Widerstand zu aktivieren. Die Beschaltung eines Tasters vereinfacht sich dann zum einfachst möglichen Fall: Der Taster wird direkt an den Eingangspin des μ C angeschlossen und schaltet nach Masse durch:



Das geht allerdings nur dann, wenn der entsprechende Mikroprozessor-Pin auf Eingang geschaltet wurde. Ein Pullup-Widerstand hat nun mal nur bei einem Eingangspin einen Sinn. Bei einem auf Ausgang geschalteten Pin sorgt der Mikroprozessor dafür, dass ein dem Port-Wert entsprechender Spannungspegel ausgegeben wird. Ein Pullup-Widerstand wäre in so einem Fall kontraproduktiv, da der Widerstand versucht, den Pegel am Pin auf Vcc zu ziehen, während eine 0 im Port-Register dafür sorgt, dass der Mikroprozessor versuchen würde, den Pin auf GND zu ziehen.

Ein Pullup-Widerstand an einem Eingangspin wird durch das **PORT**-Register gesteuert. Das **PORT**-Register erfüllt also 2 Aufgaben. Bei einem auf Ausgang geschalteten Port steuert es den Pegel an den Ausgangspins. Bei einem auf Eingang geschalteten Port steuert es, ob die internen Pullup-Widerstände aktiviert werden oder nicht. Ein 1-Bit aktiviert den entsprechenden Pullup-Widerstand.

DDR _x	PORT _x	IO-Pin-Zustand
0	0	Eingang ohne Pull-Up (Resetzustand)
0	1	Eingang mit Pull-Up
1	0	<u>Push-Pull</u> -Ausgang auf LOW
1	1	<u>Push-Pull</u> -Ausgang auf HIGH

```
.include "m8def.inc"

    ldi r16, 0xFF
    out DDRB, r16      ; Alle Pins am Port B durch Ausgabe von 0xFF ins
                       ; Richtungsregister DDRB als Ausgang konfigurieren

    ldi r16, 0x00
    out DDRD, r16      ; Alle Pins am Port D durch Ausgabe von 0x00 ins
                       ; Richtungsregister DDRD als Eingang konfigurieren

    ldi r16, 0xFF
    out PORTD, r16     ; An allen Pins vom Port D die Pullup-Widerstände
                       ; aktivieren. Dies geht deshalb durch eine Ausgabe
                       ; nach PORTD, da ja der Port auf Eingang gestellt
                       ; ist.

loop:
    in r16, PIND       ; an Port D anliegende Werte (Taster) nach
                       ; r16 einlesen
    out PORTB, r16     ; Inhalt von r16 an Port B ausgeben
    rjmp loop          ; Sprung zu "loop:" -> Endlosschleife
```

Werden auf diese Art und Weise die AVR-internen Pullup-Widerstände aktiviert, so sind keine externen Widerstände mehr notwendig und die Beschaltung vereinfacht sich zu einem Taster, der einfach nur den µC-Pin mit GND verbindet.

3.6 Zugriff auf einzelne Bits

Man muss nicht immer ein ganzes Register auf einmal einlesen oder mit einem neuen Wert laden. Es gibt auch Befehle, mit denen man einzelne Bits abfragen und ändern kann:

- Der Befehl **sbi** überspringt den darauffolgenden Befehl, wenn das angegebene Bit 0 (low) ist.
- **sbis** bewirkt das Gleiche, wenn das Bit 1 (high) ist.
- Mit **cbi** ("clear bit") wird das angegebene Bit auf 0 gesetzt.
- **sbi** ("set bit") bewirkt das Gegenteil.

Achtung: Diese Befehle können nur auf die IO-Register angewandt werden!

Am besten verstehen kann man das natürlich an einem Beispiel:

[Download bitaccess.asm](#)

```

.include "m8def.inc"

    ldi r16, 0xFF
    out DDRB, r16      ; Port B ist Ausgang

    ldi r16, 0x00
    out DDRD, r16      ; Port D ist Eingang

    ldi r16, 0xFF
    out PORTB, r16     ; PORTB auf 0xFF setzen -> alle LEDs aus

loop:  sbic PIND, 0      ; "skip if bit cleared", nächsten Befehl
        ; überspringen, wenn Bit 0 im IO-Register PIND = 0
        ; (Taste 0 gedrückt)
    rjmp loop          ; Sprung zu "loop:" -> Endlosschleife

    cbi PORTB, 3       ; Bit 3 im IO-Register PORTB auf 0 setzen
        ; -> 4. LED an

ende:  rjmp ende       ; Endlosschleife

```

Dieses Programm wartet so lange in einer Schleife ("loop:"..."rjmp loop"), bis Bit 0 im Register PIND 0 wird, also die erste Taste gedrückt ist. Durch "sbic" wird dann der Sprungbefehl zu "loop:" übersprungen, die Schleife wird also verlassen und das Programm danach fortgesetzt. Ganz am Ende schließlich wird das Programm durch eine leere Endlosschleife praktisch "angehalten", da es ansonsten wieder von vorne beginnen würde.

3.7 Zusammenfassung der Portregister

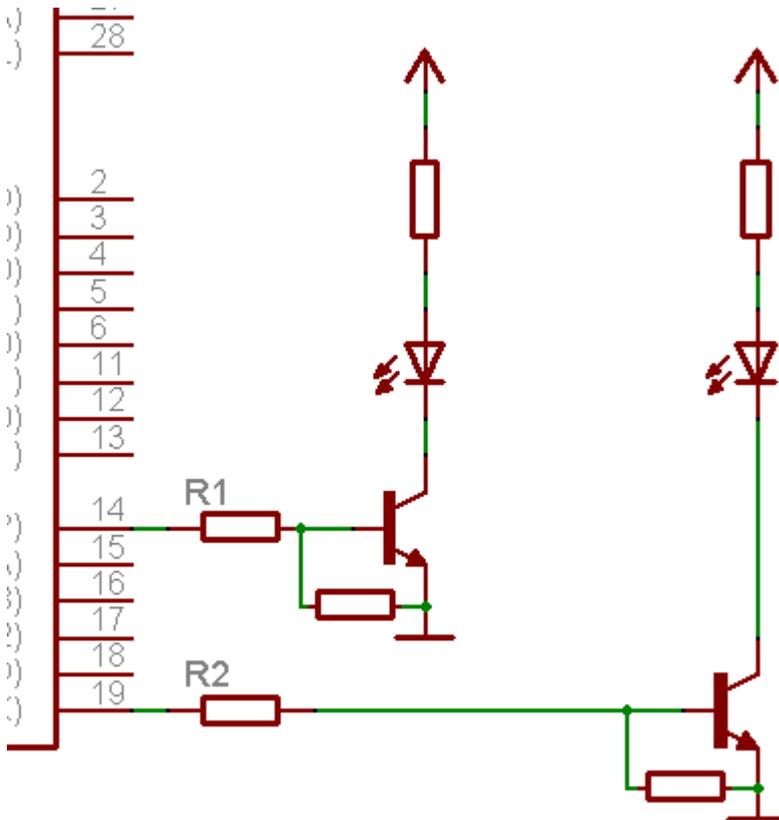
Für jeden Hardwareport gibt es im Mikroprozessor insgesamt 3 Register:

- Das Datenrichtungsregister **DDR_x**. Es wird verwendet um die Richtung jedes einzelnen Mikroprozessor-Pins festzulegen. Eine 1 an der entsprechenden Bit Position steht für Ausgang, eine 0 steht für Eingang.
- Das Einleseregister **PIN_x**. Es wird verwendet um von einem Mikroprozessor-Pin den aktuellen Zustand einzulesen. Dazu muss das entsprechende Datenrichtungsbit auf Eingang geschaltet sein.
- Das Ausgangsregister **PORT_x**. Es erfüllt 2 Funktionen, je nachdem wie das zugehörige Datenrichtungsbit geschaltet ist.
 - Steht es auf Ausgang, so wird bei einer entsprechenden Zuweisung an das **PORT_x** Register der entsprechende Mikroprozessor-Pin auf den angegebenen Wert gesetzt.
 - Steht es auf Eingang, so beeinflusst das **PORT_x**-Bit den internen Pullup-Widerstand an diesem Mikroprozessor-Pin. Bei einer 0 wird der Widerstand abgeschaltet, bei einer 1 wird der Widerstand an den Eingangs-Pin zugeschaltet.
- Bei den neueren AVR (wie z.B. *ATtiny13*, *ATtiny2313*, *ATtiny24/44/84*, *ATtiny25/45/85*, *ATmega48/88/168*, usw.) kann man als Ausgang konfigurierte Pins toggeln (**PORT_x** zwischen 0 und 1 „umschalten“), indem man eine 1 an die entsprechende Bit Position des **PIN_x** Register schreibt.

3.8 Ausgänge benutzen, wenn mehr Strom benötigt wird

Man kann nicht jeden beliebigen Verbraucher nach dem LED-Vorbild von oben an einen μC anschließen. Die Ausgänge des ATmega8 können nur eine begrenzte Menge Strom liefern, so dass der Chip schnell überfordert ist, wenn eine nachgeschaltete Schaltung mehr Strom benötigt. Die Ausgangstreiber des μC würden in solchen Fällen den Dienst quittieren und durchbrennen.

Abhilfe schafft in solchen Fällen eine zusätzliche Treiberstufe, die im einfachsten Fall mit einem [Transistor](#) als Schalter aufgebaut wird.



Die LED samt zugehörigen Widerständen dienen hier lediglich als Sinnbild für den Verbraucher, der vom μC ein und ausgeschaltet werden soll. Welcher Transistor als Schalter benutzt werden kann, hängt vom Stromverbrauch des Verbrauchers ab. Die Widerstände **R1** und **R2** werden als **Basiswiderstände** der Transistoren bezeichnet. Für ihre Berechnung siehe z.B. [hier](#). Um eine sichere Störfestigkeit im Resetfall des Mikrocontrollers zu gewähren, sollte man noch einen Pulldown Widerstand zwischen Basis und Emitter schalten oder einen digitalen Transistor (z.B. BCR135) mit integriertem Basis- und Basisemitterwiderstand benutzen.

Um ein Relais an einen μC Ausgang anzuschließen, siehe [hier](#).

4 AVR-Tutorial: Logik

In weiterer Folge werden immer wieder 4 logische Grundoperationen auftauchen:

- UND
- ODER
- NICHT
- XOR (Exklusiv oder)

Was hat es mit diesen Operationen auf sich?

4.1 Allgemeines

Die logischen Operatoren werden mit einem Register und einem zweiten Argument gebildet. Das zweite Argument kann ebenfalls ein Register oder aber eine direkt angegebene Zahl sein.

Da ein Register aus 8 Bit besteht, werden die logischen Operatoren immer auf alle 8 Bit Paare gleichzeitig angewendet.

Mit den logischen Grundoperationen werden die beiden Argumente miteinander verknüpft und das Ergebnis der Verknüpfung im Register des ersten Argumentes abgelegt.

4.2 Die Operatoren

4.2.1 UND

4.2.1.1 Wahrheitstabelle für 2 einzelne Bits

A	B	Ergebnis
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Das Ergebnis ist genau dann 1, wenn A **und** B 1 sind

4.2.1.2 Verwendung

- gezielt einzelne Bits auf 0 setzen
- dadurch auch die Verwendung um einzelne Bits auszumaskieren

4.1.2.3 AVR Befehle

```
and  r16, r17
andi r16, 0b01011010
```

Die beiden Operanden werden miteinander **UND** verknüpft, wobei jeweils die jeweils gleichwertigen Bits der Operanden laut Wahrheitstabelle unabhängig voneinander verknüpft werden.

Sei der Inhalt des Registers r16 = 0b11001100, so lautet die Verknüpfung **andi r16, 0b01011010**

```

0b11001100
0b01011010   und
-----
0b01001000

```

Das Ergebnis wird im ersten Operanden (r16) abgelegt.

Im Ergebnis haben nur diejenigen Bits denselben Wert den sie im ersten Argument hatten, bei denen im zweiten Argument (in der Maske) eine 1 war. Alle anderen Bits sind auf jeden Fall 0. Da in der Maske

```
0b01011010
```

die Bits 0, 2, 5, 7 eine 0 aufweisen, ist auch im Ergebnis an diesen Stellen mit Sicherheit eine 0. Alle andern Bits (diejenigen bei denen in der Maske eine 1 steht), werden aus der Ursprungszahl so wie sie sind übernommen.

4.2.2 ODER

4.2.2.1 Wahrheitstabelle für 2 einzelne Bits

A B Ergebnis

```

0 0 0
0 1 1
1 0 1
1 1 1

```

Das Ergebnis ist genau dann 1, wenn A **oder** B **oder beide** 1 sind.

4.2.2.2 Verwendung

- gezielt einzelne Bits auf 1 setzen

4.2.2.3 AVR Befehle

```

or   r16, r17
ori  r16, 0b01011010

```

Die beiden Operanden werden miteinander **ODER** verknüpft, wobei jeweils die jeweils gleichwertigen Bits der Operanden laut Wahrheitstabelle unabhängig voneinander verknüpft werden.

Sei der Inhalt des Registers r16 = 0b11001100, so lautet die Verknüpfung **ori r16, 0b01011010**

```

0b11001100
0b01011010   oder
-----
0b11011110

```

Das Ergebnis wird im ersten Operanden (r16) abgelegt.

Im Ergebnis tauchen an den Bitpositionen an denen in der Maske eine 1 war auf jeden Fall ebenfalls eine 1 auf. In den restlichen Bitpositionen hängt es vom ersten Argument ab, ob im Ergebnis eine 1 auftaucht oder nicht.

Da in der Maske

```
0b01011010
```

an den Bitpositionen 1, 3, 4, 6 eine 1 steht, ist an diesen Bitpositionen im Ergebnis ebenfalls mit Sicherheit eine 1. Alle andern Bits werden so wie sie sind aus der Ursprungszahl übernommen.

4.2.3 NICHT

4.2.3.1 Wahrheitstabelle

A Ergebnis

0 1

1 0

Das Ergebnis ist genau dann 1, wenn A **nicht** 1 ist.

4.2.3.2 Verwendung

- alle Bits eines Bytes umdrehen

4.2.3.3 AVR Befehle

```
com r16
```

Sei der Inhalt des Registers r16 = 0b11001100, so lautet die Verknüpfung **com r16**

```
0b11001100    nicht
-----
0b00110011
```

Das Ergebnis wird im ersten und einzigen Operanden (r16) abgelegt.

4.2.4 XOR (Exklusives Oder)

4.2.4.1 Wahrheitstabelle für 2 einzelne Bits

A B Ergebnis

0 0 0

0 1 1

1 0 1

1 1 0

Das Ergebnis ist genau dann 1, wenn A **oder** B aber **nicht beide** 1 sind.

4.2.4.2 Verwendung

- gezielt einzelne Bits umdrehen

4.2.4.3 AVR Befehle

```
eor r16, r17
```

Die beiden Operanden werden miteinander **XOR** verknüpft, wobei jeweils die jeweils gleichwertigen Bits der Operanden laut Wahrheitstabelle unabhängig voneinander verknüpft werden.

Sei der Inhalt des Registers r16 = 0b11001100 und der Inhalt des Registers r17 = 0b01011010, so lautet die Verknüpfung **eor r16, r17**

```

0b11001100
0b01011010   xor
-----
0b10010110

```

Das Ergebnis wird im ersten Operanden (r16) abgelegt.

Im Ergebnis werden diejenigen Bits umgedreht, an deren Bitposition in der Maske eine 1 vorhanden ist.

Da in der Maske

```
0b01011010
```

an den Bitpositionen 1, 3, 4, 6 jeweils eine 1 steht, enthält das Ergebnis an eben diesen Bitpositionen die umgedrehten Bits aus der Ursprungszahl. Alle anderen Bits werden so wie sie sind aus der Ursprungszahl übernommen.

5 AVR-Tutorial: Arithmetik8

Eine der Hauptaufgaben eines Mikrokontrollers bzw. eines Computers allgemein, ist es, irgendwelche Berechnungen anzustellen. Der Löwenanteil an den meisten Berechnungen entfällt dabei auf einfache Additionen bzw. Subtraktionen. Multiplikationen bzw. Divisionen kommen schon seltener vor, bzw. können oft durch entsprechende Additionen bzw. Subtraktionen ersetzt werden. Weitergehende mathematische Konstrukte werden zwar auch ab und an benötigt, können aber in der Assemblerprogrammierung durch geschickte Umformungen oft vermieden werden.

5.1 Hardwareunterstützung

Praktisch alle Mikroprozessoren unterstützen Addition und Subtraktion direkt in Hardware, das heißt: Sie haben eigene Befehle dafür. Einige bringen auch Unterstützung für eine Hardwaremultiplikation mit (so zum Beispiel der **ATMega8**), während Division in Hardware schon seltener zu finden ist.

5.2 8 Bit versus 16 Bit

In diesem Abschnitt des Tutorials wird gezielt lediglich auf 8 Bit Arithmetik eingegangen, um zunächst mal die Grundlagen des Rechnens mit einem μC zu zeigen. Die Erweiterung von 8 Bit auf 16 Bit Arithmetik ist in einigen Fällen trivial (Addition + Subtraktion), kann sich aber bei Multiplikation und Division schon in einem beträchtlichem Codeumfang niederschlagen.

Der im Tutorial verwendete **ATMega8** besitzt eine sog. 8-Bit Architektur. Das heißt, dass seine Rechenregister (mit Ausnahmen) nur 8 Bit breit sind und sich daher eine 8 Bit Arithmetik als die natürliche Form der Rechnerei auf diesem Prozessor anbietet. Berechnungen, die mehr als 8 Bit erfordern, müssen dann durch Kombinationen von Rechenvorgängen realisiert werden. Eine Analogie wäre z.B. das Rechnen, wie wir alle es in der Grundschule gelernt haben. Auch wenn wir in der Grundschule (in den Anfängen) nur die Additionen mit Zahlen kleiner als 10 auswendig gelernt haben, so können wir doch durch die Kombination von mehreren derartigen Additionen beliebig große Zahlen addieren. Das gleiche gilt für Multiplikationen. In der Grundschule musste wohl jeder von uns das sog. 'kleine Einmaleins' auswendig lernen, um Multiplikationen im Zahlenraum bis 100 quasi 'in Hardware' zu berechnen. Und doch können wir durch Kombinationen solcher Einfachmultiplikationen und zusätzlichen Additionen in beliebig große Zahlenräume vorstoßen.

Die Einschränkung auf 8 Bit ist also keineswegs eine Einschränkung in dem Sinne, dass es eine prinzipielle Obergrenze für Berechnungen gäbe. Sie bedeutet lediglich eine obere Grenze dafür, bis zu welchen Zahlen in einem Rutsch gerechnet werden kann. Alles, was darüber hinausgeht, muss dann mittels Kombinationen von Berechnungen gemacht werden.

5.3 8-Bit Arithmetik ohne Berücksichtigung eines Vorzeichens

Die Bits des Registers besitzen dabei eine Wertigkeit, die sich aus der Stelle des Bits im Byte ergibt. Dies ist völlig analog zu dem uns vertrauten Dezimalsystem. Auch dort besitzt eine Ziffer in einer Zahl eine bestimmte Wertigkeit, je nach dem, an welcher Position diese Ziffer in der Zahl auftaucht. So hat z.B. die Ziffer 1 in der Zahl 12 die Wertigkeit 'Zehn', während sie in der Zahl 134 die Wertigkeit 'Hundert' besitzt. Und so wie im Dezimalsystem die Wertigkeit einer Stelle immer das Zehnfache der Wertigkeit der Stelle unmittelbar rechts von ihr ist, so ist im Binärsystem die Wertigkeit einer Stelle immer das 2-fache der Stelle rechts von ihr.

Die Zahl 4632 im Dezimalsystem kann also so aufgefasst werden:

$$\begin{array}{rcl}
 4632 & = & 4 * 1000 & (1000 = 10 \text{ hoch } 3) \\
 & + & 6 * 100 & (100 = 10 \text{ hoch } 2) \\
 & + & 3 * 10 & (10 = 10 \text{ hoch } 1) \\
 & + & 2 * 1 & (1 = 10 \text{ hoch } 0)
 \end{array}$$

Völlig analog ergibt sich daher folgendes für z.B. die 8 Bit Binärzahl **0b10011011** (um Binärzahlen von Dezimalzahlen zu unterscheiden, wird ein **0b** vorangestellt):

$$\begin{array}{rcl}
 0b10011010 & = & 1 * 128 & (128 = 2 \text{ hoch } 7) \\
 & + & 0 * 64 & (64 = 2 \text{ hoch } 6) \\
 & + & 0 * 32 & (32 = 2 \text{ hoch } 5) \\
 & + & 1 * 16 & (16 = 2 \text{ hoch } 4) \\
 & + & 1 * 8 & (8 = 2 \text{ hoch } 3) \\
 & + & 0 * 4 & (4 = 2 \text{ hoch } 2) \\
 & + & 1 * 2 & (2 = 2 \text{ hoch } 1) \\
 & + & 1 * 1 & (1 = 2 \text{ hoch } 0)
 \end{array}$$

Ausgerechnet (um die entsprechende Dezimalzahl zu erhalten) ergibt das $128 + 16 + 8 + 2 + 1 = 155$. Die Binärzahl **0b10011011** entspricht also der Dezimalzahl **155**. Es ist wichtig, sich klar zu machen, dass es zwischen Binär- und Dezimalzahlen keinen grundsätzlichen Unterschied gibt. Beides sind nur verschiedene Schreibweisen für das Gleiche: Eine Zahl. Während wir Menschen an das Dezimalsystem gewöhnt sind, ist das Binärsystem für einen Computer geeigneter, da es nur aus den 2 Ziffern 0 und 1 besteht, welche sich leicht in einem Computer darstellen lassen (Spannung, keine Spannung).

Welches ist nun die größte Zahl, die mit 8 Bit dargestellt werden kann? Dabei handelt es sich offensichtlich um die Zahl **0b11111111**. In Dezimalschreibweise wäre das die Zahl

$$\begin{array}{rcl}
 0b11111111 & = & 1 * 128 \\
 & + & 1 * 64 \\
 & + & 1 * 32 \\
 & + & 1 * 16 \\
 & + & 1 * 8 \\
 & + & 1 * 4 \\
 & + & 1 * 2 \\
 & + & 1 * 1
 \end{array}$$

oder ausgerechnet: **255**

Wird also mit 8 Bit Arithmetik betrieben, wobei alle 8 Bit als signifikante Ziffern benutzt werden (also kein Vorzeichenbit, dazu später mehr), so kann damit im Zahlenraum **0** bis **255** gerechnet werden.

Binär	Dezimal	Binär	Dezimal
0b00000000	0	0b10000000	128
0b00000001	1	0b10000001	129
0b00000010	2	0b10000010	130
0b00000011	3	0b10000011	131
0b00000100	4	0b10000100	132
0b00000101	5	0b10000101	133
...		...	
0b01111100	124	0b11111100	252
0b01111101	125	0b11111101	253
0b01111110	126	0b11111110	254
0b01111111	127	0b11111111	255

5.4 8-Bit Arithmetik mit Berücksichtigung eines Vorzeichens

Soll mit Vorzeichen (also positiven und negativen Zahlen) gerechnet werden, so erhebt sich die Frage: Wie werden eigentlich positive bzw. negative Zahlen dargestellt? Alles was wir haben sind ja 8 Bit in einem Byte.

5.4.1 Problem der Kodierung des Vorzeichens

Die Lösung des Problems besteht darin, dass ein Bit zur Anzeige des Vorzeichens benutzt wird. Im Regelfall wird dazu das am weitesten links stehende Bit benutzt. Von den verschiedenen Möglichkeiten, die sich hiermit bieten, wird in der Praxis fast ausschließlich mit dem sog. 2-er Komplement gearbeitet, da es Vorteile bei der Addition bzw. Subtraktion von Zahlen bringt. In diesem Fall muß nämlich das Vorzeichen einer Zahl überhaupt nicht berücksichtigt werden. Durch die Art und Weise der Bildung von negativen Zahlen kommt am Ende das Ergebnis mit dem korrekten Vorzeichen heraus.

5.4.2 2-er Komplement

Das 2-er Komplement verwendet das höchstwertige Bit eines Byte, das sog. MSB (= **M**ost **S**ignificant **B**it) zur Anzeige des Vorzeichens. Ist dieses Bit 0, so ist die Zahl positiv. Ist es 1, so handelt es sich um eine negative Zahl. Die 8-Bit Kombination **0b10010011** stellt also eine negative Zahl dar, **wenn und nur wenn diese Bitkombination überhaupt als vorzeichenbehaftete Zahl aufgefasst werden soll**. Anhand der Bitkombination alleine ist es also nicht möglich, eine definitive Aussage zu treffen, ob es sich um eine vorzeichenbehaftete Zahl handelt oder nicht. Erst wenn durch den Zusammenhang klar ist, dass man es mit vorzeichenbehafteten Zahlen zu tun hat, bekommt das MSB die Sonderbedeutung des Vorzeichens.

Um bei einer Zahl das Vorzeichen zu wechseln, geht man wie folgt vor:

- Zunächst wird das 1-er Komplement gebildet, indem alle Bits umgedreht werden. Aus 0 wird 1 und aus 1 wird 0
- Danach wird aus diesem Zwischenergebnis das 2-er Komplement gebildet, indem noch 1 addiert wird.

Diese Vorschrift kann immer dann benutzt werden, wenn das Vorzeichen einer Zahl gewechselt werden soll. Er macht aus positiven Zahlen negative und aus negativen Zahlen positive.

Beispiel: Es soll die Binärdarstellung für -92 gebildet werden. Dazu benötigt man zunächst die Binärdarstellung für +92, welche **0b01011100** lautet. Diese wird jetzt nach der Vorschrift für 2-er Komplemente negiert und damit negativ gemacht.

0b01011100	Ausgangszahl
0b10100011	1-er Komplement, alle Bits umdrehen
0b10100100	noch 1 addieren

Die Binärdarstellung für -92 lautet also **0b10100100**. Das gesetzte MSB weist diese Binärzahl auch tatsächlich als negative Zahl aus.

Beispiel: Gegeben sei die Binärzahl **0b00111000**, welche als vorzeichenbehaftete Zahl anzusehen ist. Welcher Dezimalzahl entspricht diese Binärzahl?

Da das MSB nicht gesetzt ist, handelt es sich um eine positive Zahl und die Umrechnung kann wie im Fall der vorzeichenlosen 8-Bit Zahlen erfolgen. Das Ergebnis lautet also +56 ($= 0 * 128 + 0 * 64 + 1 * 32 + 1 * 16 + 1 * 8 + 0 * 4 + 0 * 2 + 0 * 1$)

Beispiel: Gegeben sei die Binärzahl **0b10011001**, welche als vorzeichenbehaftete Zahl anzusehen ist. Welcher Dezimalzahl entspricht diese Binärzahl?

Da das MSB gesetzt ist, handelt es sich um eine negative Zahl. Daher wird diese Zahl zunächst negiert um dadurch eine positive Zahl zu erhalten.

0b10011001	Originalzahl
0b01100110	1-er Komplement, alle Bits umdrehen
0b01100111	2-er Komplement, noch 1 addiert

Die zu 0b10011001 gehörende positive Binärzahl lautet also 0b01100111. Da es sich um eine positive Zahl handelt, kann sie wiederum ganz normal, wie vorzeichenlose Zahlen, in eine Dezimalzahl umgerechnet werden. Das Ergebnis lautet 103 ($= 0 * 128 + 1 * 64 + 1 * 32 + 0 * 16 + 0 * 8 + 1 * 4 + 1 * 2 + 1 * 1$). Da aber von einer negativen Zahl ausgegangen wurde, ist **0b10011001** die binäre Darstellung der Dezimalzahl -103.

Beispiel: Gegeben sei dieselbe Binärzahl **0b10011001**. Aber diesmal sei sie als vorzeichenlose Zahl aufzufassen. Welcher Dezimalzahl entspricht diese Binärzahl?

Da die Binärzahl als vorzeichenlose Zahl aufzufassen ist, hat das MSB keine spezielle Bedeutung. Die Umrechnung erfolgt also ganz normal: $0b10011001 = 1 * 128 + 0 * 64 + 0 * 32 + 1 * 16 + 1 * 8 + 0 * 4 + 0 * 2 + 1 * 1 = 153$.

5.5 spezielle Statusflags

Im Statusregister des Prozessors gibt es eine Reihe von Flags, die durch Rechenergebnisse beeinflusst werden, bzw. in Berechnungen einfließen können.

5.5.1 Carry

Das Carry-Flag zeigt an ob bei einer Berechnung ein Über- oder Unterlauf erfolgt ist.

Wie das?

Angenommen es müssen 2 8-Bit Zahlen addiert werden.

```
  10100011
+ 11110011
-----
 100010110
```

Das Ergebnis der Addition umfasst 9 Bit. Da aber die Register nur 8 Bit fassen können, würde das bedeuten, dass das MSB (das 9. Bit) verlorengeht. In diesem Fall sagt man: Die Addition ist übergelaufen. Damit man darauf reagieren kann, wird dieses 9. Bit allerdings in das Carry Flag übertragen und es gibt auch spezielle Befehle, die dieses Carry Flag in ihren Berechnungen berücksichtigen können.

5.6 Inkrementieren / Dekrementieren

Erstaunlich viele Operationen in einem Computer-Programm entfallen auf die Operationen 'Zu einer Zahl 1 addieren' bzw. 'Von einer Zahl 1 subtrahieren'. Dementsprechend enthalten die meisten Mikroprozessoren die Operationen **Inkrementieren** (um 1 erhöhen) bzw. **Dekrementieren** (um 1 verringern) als eigenständigen Assemblerbefehl. So auch der **ATMega8**.

5.6.1 AVR Befehle

```
inc r16
```

bzw.

```
dec r16
```

Die Operation ist einfach zu verstehen. Das jeweils angegebene Register (hier wieder am Register r16 gezeigt) wird um 1 erhöht bzw. um 1 verringert. Dabei wird die Zahl im Register als vorzeichenlose Zahl angesehen. Enthält das Register bereits die größtmögliche Zahl (0b11111111 oder dezimal 255), so erzeugt ein weiteres Inkrementieren die kleinstmögliche Zahl (0b00000000 oder dezimal 0) bzw. umgekehrt dekrementiert 0 zu 255.

5.7 Addition

Auf einem Mega8 gibt es nur eine Möglichkeit, um eine Addition durchzuführen: Die beiden zu addierenden Zahl müssen in zwei Registern stehen.

5.7.1 AVR Befehle

```
add r16, r17      ; Addition der Register r16 und r17. Das Ergebnis wird
                  ; im Register r17 abgelegt
adc r16, r17      ; Addition der Register r16 und r17, wobei das
                  ; Carry-Bit noch zusätzlich mit addiert wird.
```

Bei der Addition zweier Register wird ein möglicher Überlauf in allen Fällen im Carry Bit abgelegt. Daraus erklärt sich dann auch das Vorhandensein eines Additionsbefehls, der das Carry-Bit noch zusätzlich mitaddiert: Man benötigt ihn zum Aufbau einer Addition die mehr als 8 Bit umfasst. Die niederwertigsten Bytes werden mit einem **add** addiert und alle weiteren höherwertigen Bytes werden, vom Niederwertigsten zum Höchstwertigsten, mittels **adc** addiert. Dadurch werden eventuelle Überträge automatisch berücksichtigt.

5.8 Subtraktion

Subtraktionen können auf einem AVR in zwei unterschiedlichen Arten ausgeführt werden. Entweder es werden zwei Register voneinander subtrahiert oder es wird von einem Register eine konstante Zahl abgezogen. Beide Varianten gibt es wiederum in den Ausführungen mit und ohne Berücksichtigung des Carry Flags

5.8.1 AVR Befehle

```
sub r16, r17      ; Subtraktion des Registers r17 von r16. Das Ergebnis
                  ; wird im Register r16 abgelegt
sbc r16, r17      ; Subtraktion des Registers r17 von r16, wobei das
                  ; Carry-Bit noch zusätzlich mit subtrahiert wird. Das
                  ; Ergebnis wird im Register r16 abgelegt
subi r16, zahl    ; Die Zahl (als Konstante) wird vom Register r16
                  ; subtrahiert.
                  ; Das Ergebnis wird im Register r16 abgelegt
sbci r16, zahl    ; Subtraktion einer konstanten Zahl vom Register r16,
                  ; wobei zusätzlich noch das Carry-Bit mit subtrahiert
                  ; wird.
                  ; Das Ergebnis wird im Register r16 abgelegt.
```

5.9 Multiplikation

Multiplikation kann auf einem AVR je nach konkretem Typ auf zwei unterschiedliche Arten ausgeführt werden. Während die größeren ATmega Prozessoren über einen Hardwaremultiplizierer verfügen, ist dieser bei den kleineren Tiny Prozessoren nicht vorhanden. Hier muß die Multiplikation quasi zu Fuß durch entsprechende Addition von Teilresultaten erfolgen.

5.9.1 Hardwaremultiplikation

Vorzeichenbehaftete und vorzeichenlose Zahlen werden unterschiedlich multipliziert. Denn im Falle eines Vorzeichens darf ein gesetztes 7. Bit natürlich nicht in die eigentliche Berechnung mit einbezogen werden. Statt dessen steuert dieses Bit (eigentlich die beiden MSB der beiden beteiligten Zahlen) das Vorzeichen des Ergebnisses. Die Hardwaremultiplikation ist auch dahingehend eingeschränkt, dass das Ergebnis einer Multiplikation immer in den Registerpärchen *r0* und *r1* zu finden ist. Dabei steht das LowByte (also die unteren 8 Bit) des Ergebnisses in *r0* und das HighByte in *r1*.

5.9.1.1 AVR Befehl

```
mul    r16, r17    ; multipliziert r16 mit r17. Beide Registerinhalte
                ; werden als vorzeichenlose Zahlen aufgefasst.
                ; Das Ergebnis der Multiplikation ist in den Registern
                ; r0 und r1 zu finden.

muls   r16, r17    ; multipliziert r16 mit r17. Beide Registerinhalte
                ; werden als vorzeichenbehaftete Zahlen aufgefasst.
                ; Das Ergebnis der Multiplikation ist in den Registern
                ; r0 und r1 zu finden und stellt ebenfalls eine
                ; vorzeichenbehaftete Zahl dar.

mulsu  r16, r17    ; multipliziert r16 mit r17, wobei r16 als
                ; vorzeichenbehaftete Zahl aufgefasst wird und r17 als
                ; vorzeichenlose Zahl. Das Ergebnis der Multiplikation
                ; ist in den Registern r0 und r1 zu finden und stellt
                ; eine vorzeichenbehaftete Zahl dar.
```

5.9.2 Multiplikation in Software

Multiplikation in Software ist nicht weiter schwierig. Man erinnere sich daran, wie Multiplikationen in der Grundschule gelehrt wurden: Zunächst stand da das kleine Einmal-Eins, welches auswendig gelernt wurde. Mit diesen Kenntnissen konnten dann auch größere Multiplikationen angegangen werden, indem der Multiplikand mit jeweils einer Stelle des Multiplikators multipliziert wurde und die Zwischenergebnisse, geeignet verschoben, addiert wurden. Die Verschiebung um eine Stelle entspricht dabei einer Multiplikation mit 10.

Beispiel: Zu multiplizieren sei $3456 * 7812$

```

      3456      * 7812
      -----
      24192     <-+|||
+     27648     <--+||
+       3456     <----+|
+        6912     <-----+
      -----
      26998272
  
```

Im Binärsystem funktioniert Multiplikation völlig analog. Nur ist hier das kleine Einmaleins sehr viel einfacher! Es gibt nur 4 Multiplikationen (anstatt 100 im Dezimalsystem):

```

0 * 0 = 0
0 * 1 = 0
1 * 0 = 0
1 * 1 = 1
  
```

Es gibt lediglich einen kleinen Unterschied gegenüber dem Dezimalsystem: Anstatt zunächst alle Zwischenergebnisse aufzulisten und erst danach die Summe zu bestimmen, werden wir ein neues Zwischenergebnis gleich in die Summe einrechnen. Dies deshalb, da Additionen von mehreren Zahlen im Binärsystem im Kopf sehr leicht zu Flüchtigkeitsfehlern führen (durch die vielen 0-en und 1-en). Weiters wird eine einfache Tatsache benutzt: 1 mal eine Zahl ergibt wieder die Zahl, während 0 mal eine Zahl immer 0 ergibt. Dadurch braucht man im Grunde bei einer Multiplikation überhaupt nicht zu multiplizieren, sondern eigentlich nur die Entscheidung treffen: Muss die Zahl geeignet verschoben addiert werden oder nicht?

```

0b00100011      * 0b10001001
      -----
      00100011     <--+|||||||
+     00000000     <----+|||||
      -----
      001000110    |||||
+     00000000     <-----+|||||
      -----
      0010001100   |||||
+     00000000     <-----+|||
      -----
      00100011000  ||||
+     00100011     <-----+||
      -----
      001001010011 |||
+     00000000     <-----+|
      -----
      0010010100110 ||
+     00000000     <-----+|
      -----
      00100101001100 |
+     00100011     <-----+
      -----
      001001010111011
  
```

Man sieht auch, wie bei der Multiplikation zweier 8 Bit Zahlen sehr schnell ein 16 Bit Ergebnis entsteht. Dies ist auch der Grund, warum die Hardwaremultiplikation immer 2 Register zur Aufnahme des Ergebnisses benötigt.

Ein Assembler Code, der diese Strategie im wesentlichen verwirklicht, sieht z.B. so aus. Dieser Code wurde nicht auf optimale Laufzeit getrimmt, sondern es soll im Wesentlichen eine 1:1 Umsetzung des oben gezeigten Schemas sein. Einige der verwendeten Befehle wurden im Rahmen dieses Tutorials an dieser Stelle noch nicht besprochen. Speziell die Schiebe- (**lsl**) und Rotier- (**rol**) Befehle sollten in der AVR Befehlsübersicht genau studiert werden, um ihr Zusammenspiel mit dem Carry Flag zu verstehen. Nur soviel als Hinweis: Das Carry Flag dient in der **lsl** / **rol** Sequenz als eine Art Zwischenspeicher, um das höherwertigste Bit aus dem Register r0 beim Verschieben in das Register r1 verschieben zu können. Der **lsl** verschiebt alle Bits des Registers um 1 Stelle nach links, wobei das vorhergehende MSB ins Carry Bit wandert und rechts ein 0-Bit nachrückt. Der **rol** verschiebt ebenfalls alle Stellen eines Registers um 1 Stelle nach links. Diesmal wird aber rechts nicht mit einem 0-Bit aufgefüllt, sondern an dieser Stelle wird der momentane Inhalt des Carry Bits eingesetzt.

```

ldi r16, 0b00100011 ; Multiplikator
ldi r17, 0b10001001 ; Multiplikand
                          ; Berechne r16 * r17

ldi r18, 8              ; 8 mal verschieben und gegebenenfalls addieren
clr r19                ; 0 wird für die 16 Bit Addition benötigt
clr r0                 ; Ergebnis Low Byte auf 0 setzen
clr r1                 ; Ergebnis High Byte auf 0 setzen

mult:
lsl r0                 ; r1:r0 einmal nach links verschieben
rol r1
lsl r17                ; Das MSB von r17 ins Carry schieben
brcc noadd            ; Ist dieses MSB (jetzt im Carry) eine 1?
add r0,r16             ; Wenn ja, dann r16 zum Ergebnis addieren
adc r1,r19

noadd:
dec r18                ; Wurden alle 8 Bit von r17 abgearbeitet?
brne mult              ; Wenn nicht, dann ein erneuter Verschiebe/Addier
                          ; Zyklus

                          ; r0 enthält an dieser Stelle den Wert 0b10111011
                          ; r1 enthält 0b00010010
                          ; Gemeinsam bilden r1 und r0 also die Zahl
                          ; 0b0001001010111011

```

5.10 Division

Anders als bei der Multiplikation, gibt es auch auf einem ATmega-Prozessor keine hardwaremässige Divisionseinheit. Divisionen müssen also in jedem Fall mit einer speziellen Routine, die im wesentlichen auf Subtraktionen beruht, erledigt werden.

5.10.1 Division in Software

Um die Vorgangsweise bei der binären Division zu verstehen, wollen wir wieder zunächst anhand der gewohnten dezimalen Division untersuchen wie sowas abläuft.

Angenommen es soll dividiert werden: $92 / 5$ (92 ist der Dividend, 5 ist der Divisor)

Wie haben Sie es in der Grundschule gelernt? Wahrscheinlich so wie der Autor auch:

```
  938 : 4 = 234
  ---
 -8
  ---
   1
   13
  -12
   ---
    1
    18
   -16
    --
     2 Rest
```

Der Vorgang war: Man nimmt die erste Stelle des Dividenden (9) und ruft seine gespeicherte Einmaleins Tabelle ab, um festzustellen, wie oft der Divisor in dieser Stelle enthalten ist. In diesem konkreten Fall ist die erste Stelle 9 und der Divisor 4. 4 ist in 9 zweimal enthalten. Also ist 2 die erste Ziffer des Ergebnisses. 2 mal 4 ergibt aber 8 und diese 8 werden von den 9 abgezogen, übrig bleibt 1. Aus dem Dividenden wird die nächste Ziffer (3) heruntergezogen und man erhält mit der 1 aus dem vorhergehenden Schritt 13. Wieder dasselbe Spiel: Wie oft ist 4 in 13 enthalten? 3 mal (3 ist die nächste Ziffer des Ergebnisses) und $3 * 4$ ergibt 12. Diese 12 von den 13 abgezogen macht 1. Zu dieser 1 gesellt sich wieder die nächste Ziffer des Dividenden, 8, um so 18 zu bilden. Wie oft ist 4 in 18 enthalten? 4 mal (4 ist die nächste Ziffer des Ergebnisses), denn 4 mal 4 macht 16, und das von den 18 abgezogen ergibt 2. Da es keine nächste Ziffer im Dividenden mehr gibt, lautet also das Resultat: $938 : 4$ ergibt 234 und es bleiben 2 Rest.

Die binäre Division funktioniert dazu völlig analog. Es gibt nur einen kleinen Unterschied, der einem sogar das Leben leichter macht. Es geht um den Schritt: Wie oft ist x in y enthalten? Dieser Schritt ist in der binären Division besonders einfach, da das Ergebnis dieser Fragestellung nur 0 oder 1 sein kann. Das bedeutet aber auch: Entweder ist der Divisor in der zu untersuchenden Zahl enthalten, oder er ist es nicht. Das kann aber ganz leicht entschieden werden: Ist die Zahl größer oder gleich dem Divisor, dann ist der Divisor enthalten und zum Ergebnis kann eine 1 hinzugefügt werden. Ist die Zahl kleiner als der Divisor, dann ist der Divisor nicht enthalten und die nächste Ziffer des Ergebnisses ist eine 0.

Beispiel: Es soll die Division $0b01101100 : 0b00001001$ ausgeführt werden.

Es wird wieder mit der ersten Stelle begonnen und die oben ausgeführte Vorschrift angewandt.

0b01101101 : 0b00001001 = 0b00001100

```

                                ^^^^^^^^
                                |||||||
0                                -----+||| 1001 ist in 0 0-mal enthalten
-0                               |||||||
--                               |||||||
0                                |||||||
01                               -----+||| 1001 ist in 1 0-mal enthalten
- 0                              |||||||
--                               |||||||
01                               |||||||
011                              -----+||| 1001 ist in 11 0-mal enthalten
- 0                              |||||||
---                             |||||||
011                              |||||||
0110                             -----+||| 1001 ist in 110 0-mal enthalten
- 0                              |||||
----                             |||||
0110                             |||||
01101                            -----+|| 1001 ist in 1101 1-mal enthalten
- 1001                            |||
-----                            |||
0100                              |||
01001                             -----+| 1001 ist in 1001 1-mal enthalten
- 1001                             ||
-----                             ||
00000                              ||
000000                             -----+ 1001 ist in 0 0-mal enthalten
- 0                                |
-----                             |
0000001                            -----+ 1001 ist in 1 0-mal enthalten
- 0                                |
-----
1 Rest

```

Die Division liefert also das Ergebnis 0b00001100, wobei ein Rest von 1 bleibt. Der Dividend 0b01101101 entspricht der Dezimalzahl 109, der Divisor 0b00001001 der Dezimalzahl 9. Und wie man sich mit einem Taschenrechner leicht überzeugen kann, ergibt die Division von 109 durch 9 einen Wert von 12, wobei 1 Rest bleibt. Die Binärzahl für 12 lautet 0b00001100, das Ergebnis stimmt also.

```

ldi r16, 109 ; Dividend
ldi r17, 9 ; Divisor

; Division r16 : r17

ldi r18, 8 ; 8 Bit Division
clr r19 ; Register für die Zwischenergebnisse / Rest
clr r20 ; Ergebnis

divloop:
lsl r16 ; Zwischenergebnis mal 2 nehmen und das
rol r19 ; nächste Bit des Dividenden anhängen

lsl r20 ; das Ergebnis auf jeden Fall mal 2 nehmen,
; das hängt effektiv eine 0 an das Ergebnis an.
; Sollte das nächste Ergebnis-Bit 1 sein, dann wird
; diese 0 in Folge durch eine 1 ausgetauscht

cp r19, r17 ; ist der Divisor größer?
brlo div_zero ; wenn nein, dann bleibt die 0
sbr r20, 1 ; wenn ja, dann jetzt die 0 durch eine 1 austauschen ...
sub r19, r17 ; ... und den Divisor abziehen

```

```
div_zero:
    dec r18      ; das Ganze 8 mal wiederholen
    brne divloop

                ; in r20 steht das Ergebnis der Division
                ; in r19 steht der bei der Division entstehende Rest
```

5.11 Arithmetik mit mehr als 8 Bit

Eine Sammlung von Algorithmen zur Arithmetik mit mehr als 8 Bit findet sich [hier](#). Die Grundprinzipien sind im wesentlichen identisch zu den in diesem Teil detailliert ausgeführten Prinzipien.

6 AVR-Tutorial: Stack

"Stack" bedeutet übersetzt soviel wie Stapel. Damit ist ein Speicher nach dem LIFO-Prinzip ("last in first out") gemeint. Das bedeutet, dass das zuletzt auf den Stapel gelegte Element auch zuerst wieder heruntergenommen wird. Es ist nicht möglich, Elemente irgendwo in der Mitte des Stapels herauszuziehen oder hineinzuschieben.

Bei allen aktuellen AVR-Controllern wird der Stack im RAM angelegt. Der Stack wächst dabei von oben nach unten: Am Anfang wird der Stackpointer (Adresse der aktuellen Stapelposition) auf das Ende des RAMs gesetzt. Wird nun ein Element hinzugefügt, wird dieses an der momentanen Stackpointerposition abgespeichert und der Stackpointer um 1 erniedrigt. Soll ein Element vom Stack heruntergenommen werden, wird zuerst der Stackpointer um 1 erhöht und dann das Byte von der vom Stackpointer angezeigten Position gelesen.

6.1 Aufruf von Unterprogrammen

Dem Prozessor dient der Stack hauptsächlich dazu, Rücksprungadressen beim Aufruf von Unterprogrammen zu speichern, damit er später noch weiß, an welche Stelle zurückgekehrt werden muss, wenn das Unterprogramm mit **ret** oder die Interruptroutine mit **iret** beendet wird.

Das folgende Beispielprogramm (AT90S4433) zeigt, wie der Stack dabei beeinflusst wird:

[Download stack.asm](#)

```
.include "4433def.inc"      ; bzw. 2333def.inc

.def temp = r16

    ldi temp, RAMEND      ; Stackpointer initialisieren
    out SPL, temp

    rcall sub1           ; sub1 aufrufen

loop:    rjmp loop

sub1:

    rcall sub2           ; hier könnten ein paar Befehle stehen
                    ; sub2 aufrufen
    ret                 ; hier könnten auch ein paar Befehle stehen
                    ; wieder zurück

sub2:

                    ; hier stehen normalerweise die Befehle,
                    ; die in sub2 ausgeführt werden sollen
    ret                 ; wieder zurück
```

.def temp = r16 ist eine Assemblerdirektive. Diese sagt dem Assembler, dass er überall, wo er "temp" findet, stattdessen "r16" einsetzen soll. Das ist oft praktisch, damit man nicht mit den Registernamen durcheinander kommt. Eine Übersicht über die Assemblerdirektiven findet man [hier](#).

Bei Controllern, die mehr als 256 Byte RAM besitzen (z.B. ATmega8), passt die Adresse nicht mehr in ein Byte. Deswegen gibt es bei diesen Controllern noch ein Register mit dem Namen **SPH**, in dem das High-Byte der Adresse gespeichert wird. Damit es funktioniert, muss das Programm dann folgendermaßen geändert werden:

[Download stack-bigmem.asm](#)

```
.include "m8def.inc"

.def temp = r16

    ldi temp, LOW(RAMEND)           ; LOW-Byte der obersten RAM-Adresse
    out SPL, temp
    ldi temp, HIGH(RAMEND)         ; HIGH-Byte der obersten RAM-Adresse
    out SPH, temp

    rcall sub1                     ; sub1 aufrufen

loop:    rjmp loop

sub1:

    rcall sub2                     ; hier könnten ein paar Befehle
    ret                            ; stehen
    ; sub2 aufrufen
    ; hier könnten auch Befehle stehen
    ; wieder zurück

sub2:

    ret                            ; hier stehen normalerweise die
    ; Befehle, die in sub2 ausgeführt
    ; werden sollen
    ; wieder zurück
```

Natürlich macht es keinen Sinn, dieses Programm in einen Controller zu programmieren. Stattdessen sollte man es mal mit dem AVR-Studio simulieren, um die Funktion des Stacks zu verstehen.

Als erstes wird mit **Project/New** ein neues Projekt erstellt, zu dem man dann mit **Project/Add File** eine Datei mit dem oben gezeigten Programm hinzufügt. Nachdem man unter **Project/Project Settings** das **Object Format for AVR-Studio** ausgewählt hat, kann man das Programm mit Strg+F7 assemblieren und den Debug-Modus starten.

Danach sollte man im Menu **View** die Fenster **Processor** und **Memory** öffnen und im Memory-Fenster **Data** auswählen.

Das Fenster **Processor**

- *Program Counter*: Adresse im Programmspeicher (ROM), die gerade abgearbeitet wird
- *Stack Pointer*: Adresse im Datenspeicher (RAM), auf die der Stackpointer gerade zeigt
- *Cycle Counter*: Anzahl der Taktzyklen seit Beginn der Simulation
- *Time Elapsed*: Zeit, die seit dem Beginn der Simulation vergangen ist

Im Fenster **Memory** wird der Inhalt des RAMs angezeigt.

Sind alle 3 Fenster gut auf einmal sichtbar, kann man anfangen, das Programm mit der Taste F11 langsam Befehl für Befehl zu simulieren.

Wenn der gelbe Pfeil in der Zeile **out SPL, temp** vorbeikommt, kann man im Prozessor-Fenster sehen, wie der Stackpointer auf 0xDF (*ATmega8*: 0x45F) gesetzt wird. Wie man im Memory-Fenster sieht, ist das die letzte RAM-Adresse.

Wenn der Pfeil auf dem Befehl **rcall sub1** steht, sollte man sich den Program Counter anschauen:
Er steht auf 0x02.

Drückt man jetzt nochmal auf F11, springt der Pfeil zum Unterprogramm sub1. Im RAM erscheint an der Stelle, auf die der Stackpointer vorher zeigte, die Zahl 0x03. Das ist die Adresse im ROM, an der das Hauptprogramm nach dem Abarbeiten des Unterprogramms fortgesetzt wird. Doch warum wurde der Stackpointer um 2 verkleinert? Das liegt daran, dass eine Programmspeicheradresse bis zu 2 Byte breit sein kann, und somit auch 2 Byte auf dem Stack benötigt werden, um die Adresse zu speichern.

Das gleiche passiert beim Aufruf von sub2.

Zur Rückkehr aus dem mit rcall aufgerufenen Unterprogramm gibt es den Befehl **ret**. Dieser Befehl sorgt dafür, dass der Stackpointer wieder um 2 erhöht wird und die dabei eingelesene Adresse in den "Program Counter" kopiert wird, so dass das Programm dort fortgesetzt wird.

Apropos Program Counter: Wer sehen will, wie so ein Programm aussieht, wenn es assembliert ist, sollte mal die Datei mit der Endung ".lst" im Projektverzeichnis öffnen. Die Datei sollte ungefähr so aussehen:

```

        .def temp = r16
;Stackpointer initialisieren
000000  ed0f      ldi temp, RAMEND
000001  bf0d      out SPL, temp
000002  d001      rcall sub1
        loop:
000003  cfff      rjmp loop
        sub1:
000004  d001      rcall sub2
000005  9508      ret
        sub2:
000006  0000      nop
000007  9508      ret

```

Im blau umrahmten Bereich steht die Adresse des Befehls im Programmspeicher. Das ist auch die Zahl, die im Program Counter angezeigt wird, und die beim Aufruf eines Unterprogramms auf den Stack gelegt wird. Der grüne Bereich rechts daneben ist der OP-Code des Befehls, so wie er in den Programmspeicher des Controllers programmiert wird, und im roten Kasten stehen die "mnemonics": Das sind die Befehle, die man im Assembler eingibt. Der nicht eingerahmte Rest besteht aus Assemblerdirektiven, Labels (Sprungmarkierungen) und Kommentaren, die nicht direkt in OP-Code umgewandelt werden.

6.2 Sichern von Registern

Eine weitere Anwendung des Stacks ist das "Sichern" von Registern. Wenn man z.B. im Hauptprogramm die Register R16, R17 und R18 verwendet, dann ist es i.d.R. erwünscht, dass diese Register durch aufgerufene Unterprogramme nicht beeinflusst werden. Man muss also nun entweder auf die Verwendung dieser Register innerhalb von Unterprogrammen verzichten, oder man sorgt dafür, dass am Ende jedes Unterprogramms der ursprüngliche Zustand der Register wiederhergestellt wird. Wie man sich leicht vorstellen kann ist ein "Stapelspeicher" dafür ideal: Zu Beginn des Unterprogramms legt man die Daten aus den zu sichernden Registern oben auf den Stapel, und am Ende holt man sie wieder (in der umgekehrten Reihenfolge) in die entsprechenden Register zurück. Das Hauptprogramm bekommt also wenn es fortgesetzt wird überhaupt nichts davon mit, dass die Register inzwischen anderweitig verwendet wurden.

[Download stack-saveregs.asm](#)

```
.include "4433def.inc"           ; bzw. 2333def.inc

.def temp = R16

    ldi temp, RAMEND             ; Stackpointer initialisieren
    out SPL, temp

    ldi temp, 0xFF              ; Port B = Ausgang
    out DDRB, temp

    ldi R17, 0b10101010        ; einen Wert ins Register R17 laden

    rcall sub                   ; Unterprogramm "sub" aufrufen

    out PORTB, R17             ; Wert von R17 an den Port B ausgeben

loop:    rjmp loop              ; Endlosschleife

sub:
    push R17                    ; Inhalt von R17 auf dem Stack speichern

                                ; hier kann nach belieben mit R17 gearbeitet
                                ; werden, als Beispiel wird es hier auf 0
                                ; gesetzt

    ldi R17, 0

    pop R17                     ; R17 zurückholen
    ret                         ; wieder zurück zum Hauptprogramm
```

Wenn man dieses Programm assembliert und in den Controller lädt, dann wird man feststellen, dass jede zweite LED an Port B leuchtet. Der ursprüngliche Wert von R17 blieb also erhalten, obwohl dazwischen ein Unterprogramm aufgerufen wurde, das R17 geändert hat.

Auch in diesem Fall kann man bei der Simulation des Programms im AVR-Studio die Beeinflussung des Stacks durch die Befehle **push** und **pop** genau nachvollziehen.

6.3 Sprung zu beliebiger Adresse

Der AVR besitzt keinen Befehl, um direkt zu einer Adresse zu springen, die in einem Registerpaar gespeichert ist. Man kann dies aber mit etwas Stack-Akrobatik erreichen. Dazu einfach zuerst den niederen Teil der Adresse, dann den höheren Teil der Adresse mit **push** auf den Stack legen und ein **ret** ausführen:

```

    ldi ZH, high(testRoutine)
    ldi ZL, low(testRoutine)

    push ZL
    push ZH
    ret

    ...
testRoutine:
    rjmp testRoutine

```

Auf diese Art und Weise kann man auch Unterprogrammaufrufe durchführen:

```

    ldi ZH, high(testRoutine)
    ldi ZL, low(testRoutine)
    rcall indirectZCall
    ...

indirectZCall:
    push ZL
    push ZH
    ret

testRoutine:
    ...
    ret

```

6.4 Weitere Informationen (von Lothar Müller):

- [Der Stack - Funktion und Nutzen \(pdf\)](#)
- [Der Stack - Parameterübergabe an Unterprogramme \(pdf\)](#)
- [Der Stack - Unterprogramme mit variabler Parameteranzahl \(pdf\)](#)

(Der in dieser Abhandlung angegebene Befehl *MOV ZLow*, *SPL* muss für einen ATmega8 *IN ZL*, *SPL* heißen, da hier SPL und SPH ein I/O-Register sind. Ggf ist auch SPH zu berücksichtigen --> 2byte Stack-Pointer)

7 AVR-Tutorial: LCD

Kaum ein elektronisches Gerät kommt heutzutage noch ohne ein LCD daher. Ist doch auch praktisch, Informationen im Klartext anzeigen zu können, ohne irgendwelche LEDs blinken zu lassen. Kein Wunder also, dass die häufigste Frage in Mikrocontroller-Foren ist: "Wie kann ich ein LCD anschließen?"

7.1 Das LCD und sein Controller

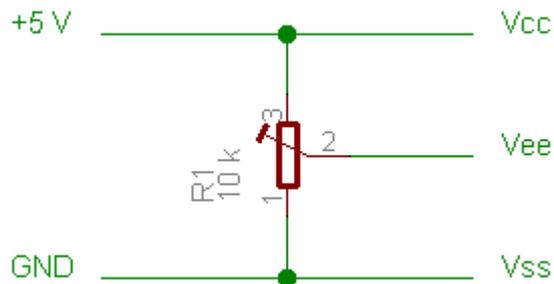
Die meisten Text-LCDs verwenden den Controller [HD44780](#) oder einen kompatiblen (z.B. KS0070) und haben 14 oder 16 Pins. Die Pinbelegung ist praktisch immer gleich:

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.

V_{ss} wird ganz einfach an GND angeschlossen und V_{cc} an 5V. V_{ee} 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 V_{ee}:



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 4 Bit 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 verarbeitet 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.

7.2 Anschluss an den Controller

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

Pinnummer LCD	Bezeichnung	Anschluss
1	Vss	GND
2	Vcc	5V
3	Vee	GND oder Poti
4	RS	PD4 am AVR
5	RW	GND
6	E	PD5 am AVR
7	DB0	nicht angeschlossen
8	DB1	nicht angeschlossen
9	DB2	nicht angeschlossen
10	DB3	nicht angeschlossen
11	DB4	PD0 am AVR
12	DB5	PD1 am AVR
13	DB6	PD2 am AVR
14	DB7	PD3 am AVR
15	A	Vorsicht! Meistens nicht direkt an +5V anschließbar, nur über einen Vorwiderstand (z.B. 33Ω)!
16	K	GND

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?

7.3 Ansteuerung des LCDs im 4-Bit-Modus

Um ein Byte zu übertragen, muss man es erstmal in die beiden Nibbles zerlegen, die getrennt übertragen werden. Da das obere Nibble (Bit 4 - Bit 7) als erstes übertragen wird, die 4 Datenleitungen jedoch an die vier unteren Bits des Port D angeschlossen sind, muss man die beiden Nibbles des zu übertragenden Bytes erstmal vertauschen. Der AVR kennt dazu praktischerweise einen eigenen Befehl:

```
swap r16 ; vertauscht die beiden Nibbles von r16
```

Aus 0b00100101 wird so z.B. 0b01010010.

Jetzt sind die Bits für die erste Phase der Übertragung an der richtigen Stelle. Trotzdem wollen wir das Ergebnis nicht einfach so mit **out PORTB, r16** an den Port geben. Um die Hälfte des Bytes, die jetzt nicht an die Datenleitungen des LCDs gegeben wird auf null zu setzen, verwendet man folgenden Befehl:

```
andi r16, 0b00001111 ; Nur die vier unteren (mit 1 markierten)
                       ; Bits werden übernommen, alle anderen werden
                       ; null
```

Also: Das obere Nibble wird erst mit dem unteren vertauscht, damit es unten ist. Dann wird das obere (das wir jetzt noch nicht brauchen) auf null gesetzt.

Jetzt müssen wir dem LCD noch mitteilen, ob wir Daten oder Befehle senden wollen. Das machen wir, indem wir das Bit, an dem RS angeschlossen ist (PD4), auf 0 (Befehl senden) oder auf 1 (Daten senden) setzen. Um ein Bit in einem normalen Register zu setzen, gibt es den Befehl sbr (Set Bit in Register). Dieser Befehl unterscheidet sich jedoch von sbi (das nur für IO-Register gilt) dadurch, dass man nicht die Nummer des zu setzenden Bits angibt, sondern eine Bitmaske. Das geht so:

```
sbr r16, 0b00010000 ; Bit 4 setzen, alle anderen Bits bleiben
                    ; gleich
```

RS ist an PD4 angeschlossen. Wenn wir r16 an den Port D ausgeben, ist RS jetzt also high und das LCD erwartet Daten anstatt von Befehlen.

Das Ergebnis können wir jetzt endlich direkt an den Port D übergeben:

```
out PORTD, r16
```

Natürlich muss vorher der Port D auf Ausgang geschaltet werden, indem man 0xFF ins Datenrichtungsregister DDRD schreibt.

Um dem LCD zu signalisieren, dass es das an den Datenleitungen anliegende Nibble übernehmen kann, wird die E-Leitung (Enable, an PD5 angeschlossen) auf high und kurz darauf wieder auf low gesetzt:

```
sbi PORTD, 5 ; Enable high
nop ; 3 Taktzyklen warten ("nop" = nichts tun)
nop
nop
cbi PORTD, 5 ; Enable wieder low
```

Die eine Hälfte des Bytes wäre damit geschafft! Die andere Hälfte kommt direkt hinterher: Alles, was an der obenstehenden Vorgehensweise geändert werden muss, ist, das "swap" (Vertauschen der beiden Nibbles) wegzulassen.

7.4 Initialisierung des Displays

Allerdings gibt es noch ein Problem. Wenn ein LCD eingeschaltet wird, dann läuft es zunächst im 8 Bit Modus. Irgendwie muss das Display initialisiert und auf den 4 Bit Modus umgeschaltet werden, und zwar nur mit den 4 zur Verfügung stehenden Datenleitungen.

Wenn es Probleme gibt, dann meistens an diesem Punkt. Die "kompatiblen" Controller sind gelegentlich doch nicht 100% identisch. Es lohnt sich, das Datenblatt (siehe Weblinks im Artikel [LCD](#)) genau zu lesen, in welcher Reihenfolge und mit welchen Abständen (Delays) die Initialisierungsbefehle gesendet werden. Eine weitere Hilfe können Ansteuerungsbeispiele in Forenbeiträgen geben z.B.

- [\(A\) KS0066U oder Ähnliche --- LCD Treiber](#)

7.4.1 Initialisierung im 4 Bit Modus

Achtung: Im Folgenden sind alle Bytes aus Sicht des LCD-Kontrollers angegeben! Da LCD-seitig nur die Leitungen DB4 - DB7 verwendet werden, ist daher immer nur das höherwertige Nibble gültig. Durch die Art der Verschaltung (DB4 - DB7 wurde auf dem PORT an PD0 bis PD3 angeschlossen) ergibt sich eine Verschiebung, so dass das am Controller auszugebende Byte nibblemässig vertauscht ist!

Die Sequenz, aus Sicht des Kontrollers, sieht so aus:

- Nach dem Anlegen der Betriebsspannung muss eine Zeit von mindestens ca. 15ms gewartet werden, um dem LCD-Kontroller Zeit für seine eigene Initialisierung zu geben
- \$3 ins Steuerregister schreiben (RS = 0)
- Mindestens 4.1ms warten
- \$3 ins Steuerregister schreiben (RS = 0)
- Mindestens 100µs warten
- \$3 ins Steuerregister schreiben (RS = 0)
- \$2 ins Steuerregister schreiben (RS = 0), dadurch wird auf 4 Bit Daten umgestellt
- Ab jetzt muss für die Übertragung eines Bytes jeweils zuerst das höherwertige Nibble und dann das niederwertige Nibble übertragen werden, wie oben beschrieben
- Mit dem Konfigurier-Befehl \$20 das Display konfigurieren (4-Bit, 1 oder 2 Zeilen, 5x7 Format)
- Mit den restlichen Konfigurierbefehlen die Konfiguration vervollständigen: Display ein/aus, Cursor ein/aus, etc.

7.4.2 Initialisierung im 8 Bit Modus

Der Vollständigkeit halber hier noch die notwendige Initialisierungssequenz für den 8 Bit Modus. Da hier die Daten komplett als 1 Byte übertragen werden können, sind einige Klimmzüge wie im 4 Bit Modus nicht notwendig.

- Nach dem Anlegen der Betriebsspannung muss eine Zeit von mindestens ca. 15ms gewartet werden, um dem LCD-Kontroller Zeit für seine eigene Initialisierung zu geben
- \$30 ins Steuerregister schreiben (RS = 0)
- Mindestens 4.1ms warten
- \$30 ins Steuerregister schreiben (RS = 0)
- Mindestens 100µs warten
- \$30 ins Steuerregister schreiben (RS = 0)
- Mit dem Konfigurier-Befehl 0x30 das Display konfigurieren (8-Bit, 1 oder 2 Zeilen, 5x7 Format)
- Mit den restlichen Konfigurierbefehlen die Konfiguration vervollständigen: Display ein/aus, Cursor ein/aus, etc.

7.5 Routinen zur LCD-Ansteuerung

Die Routinen zur Kommunikation mit dem LCD sehen also so aus:

```

////////////////////////////////////
;;                LCD-Routinen                ;;
;;                =====                ;;
;;                (c) andreas-s@web.de        ;;
;;                ;;                          ;;
;; 4bit-Interface ;;                          ;;
;; DB4-DB7:      PD0-PD3                      ;;
;; RS:           PD4                          ;;
;; E:           PD5                          ;;
////////////////////////////////////

;sendet ein Datenbyte an das LCD
lcd_data:
    mov temp2, temp1                ; "Sicherungskopie" für
    swap temp1                      ; die Übertragung des 2.Nibbles
    andi temp1, 0b00001111          ; Vertauschen
    sbr temp1, 1<<4                 ; oberes Nibble auf Null setzen
    out PORTD, temp1                ; entspricht 0b00010000 (Anm.1)
    rcall lcd_enable                ; ausgeben
    rcall lcd_enable                ; Enable-Routine aufrufen
    rcall delay50us                 ; 2. Nibble, kein swap da es schon
    andi temp2, 0b00001111          ; an der richtigen stelle ist
    sbr temp2, 1<<4                 ; obere Hälfte auf Null setzen
    out PORTD, temp2                ; entspricht 0b00010000
    rcall lcd_enable                ; ausgeben
    rcall lcd_enable                ; Enable-Routine aufrufen
    rcall delay50us                 ; Delay-Routine aufrufen
    ret                             ; zurück zum Hauptprogramm

; sendet einen Befehl an das LCD
lcd_command:
    mov temp2, temp1                ; wie lcd_data, nur RS=0
    swap temp1
    andi temp1, 0b00001111
    out PORTD, temp1
    rcall lcd_enable
    andi temp2, 0b00001111
    out PORTD, temp2
    rcall lcd_enable
    rcall delay50us
    ret

```

```

; erzeugt den Enable-Puls
;
; Bei höherem Takt (>= 8 MHz) kann es notwendig sein, vor dem Enable High
; 1-2 Wartetakte (nop) einzufügen.
; Siehe dazu http://www.mikrocontroller.net/topic/81974#685882

lcd_enable:
    sbi PORTD, 5          ; Enable high
    nop                  ; 3 Taktzyklen warten
    nop
    nop
    cbi PORTD, 5          ; Enable wieder low
    ret                  ; Und wieder zurück

; Pause nach jeder Übertragung
delay50us:                ; 50us Pause
    ldi temp1, $42
delay50us_:dec temp1
    brne delay50us_
    ret                  ; wieder zurück

; Längere Pause für manche Befehle
delay5ms:                 ; 5ms Pause
    ldi temp1, $21
WGLOOP0: ldi temp2, $C9
WGLOOP1: dec temp2
    brne WGLOOP1
    dec temp1
    brne WGLOOP0
    ret                  ; wieder zurück

; Initialisierung: muss ganz am Anfang des Programms aufgerufen werden
lcd_init:
    ldi temp3, 50
powerupwait:
    rcall delay5ms
    dec temp3
    brne powerupwait
    ldi temp1, 0b00000011 ; muss 3mal hintereinander gesendet
    out PORTD, temp1      ; werden zur Initialisierung
    rcall lcd_enable      ; 1
    rcall delay5ms
    rcall lcd_enable      ; 2
    rcall delay5ms
    rcall lcd_enable      ; und 3!
    rcall delay5ms
    ldi temp1, 0b00000010 ; 4bit-Modus einstellen
    out PORTD, temp1
    rcall lcd_enable
    rcall delay5ms
    ldi temp1, 0b00101000 ; 4Bit / 2 Zeilen / 5x8
    rcall lcd_command
    ldi temp1, 0b00001100 ; Display ein / Cursor aus / kein
    rcall lcd_command    ; Blinken

    rcall lcd_command
    ldi temp1, 0b00000100 ; inkrement / kein Scrollen
    rcall lcd_command
    ret

; Sendet den Befehl zur Löschung des Displays
lcd_clear:
    ldi temp1, 0b00000001 ; Display löschen
    rcall lcd_command

```

```

rcall delay5ms
ret

                                ; Sendet den Befehl: Cursor Home
lcd_home:
ldi temp1, 0b00000010 ; Cursor Home
rcall lcd_command
rcall delay5ms
ret

```

Anm.1: Siehe [Bitmanipulation](#)

Weitere Funktionen (wie z.B. Cursorposition verändern) sollten mit Hilfe der [Befehlsodelist](#)e nicht schwer zu realisieren sein. Einfach den Code in temp laden, lcd_command aufrufen und ggf. eine Pause einfügen.

Natürlich kann man die LCD-Ansteuerung auch an einen anderen Port des Mikrocontrollers "verschieben": Wenn das LCD z.B. an Port B angeschlossen ist, dann reicht es, im Programm alle "PORTD" durch "PORTB" und "DDRD" durch "DDRB" zu ersetzen.

Wer eine höhere Taktfrequenz als 4 MHz verwendet, der sollte daran denken, die Dauer der Verzögerungsschleifen anzupassen.

7.6 Anwendung

Ein Programm, das diese Routinen zur Anzeige von Text verwendet, kann z.B. so aussehen (die Datei lcd-routines.asm muss sich im gleichen Verzeichnis befinden). Nach der Initialisierung wird zuerst der Displayinhalt gelöscht. Um dem LCD ein Zeichen zu schicken, lädt man es in temp1 und ruft die Routine "lcd_data" auf. Das folgende Beispiel zeigt das Wort "Test" auf dem LCD an.

[Download lcd-test.asm](#)

```

#include "m8def.inc"

.def temp1 = r16
.def temp2 = r17
.def temp3 = r18

ldi temp1, LOW(RAMEND) ; LOW-Byte der obersten RAM-Adresse
out SPL, temp1
ldi temp1, HIGH(RAMEND) ; HIGH-Byte der obersten RAM-Adresse
out SPH, temp1

ldi temp1, 0xFF ; Port D = Ausgang
out DDRD, temp1

rcall lcd_init ; Display initialisieren
rcall lcd_clear ; Display löschen

ldi temp1, 'T' ; Zeichen anzeigen
rcall lcd_data

ldi temp1, 'e' ; Zeichen anzeigen
rcall lcd_data

ldi temp1, 's' ; Zeichen anzeigen
rcall lcd_data

ldi temp1, 't' ; Zeichen anzeigen

```

```

rcall lcd_data

loop:
    rjmp loop

.include "lcd-routines.asm"           ; LCD-Routinen werden hier eingefügt

```

Für längere Texte ist die Methode, jedes Zeichen einzeln in das Register zu laden und "lcd_data" aufzurufen natürlich nicht sehr praktisch. Dazu später aber mehr.

Bisher wurden in Register immer irgendwelche Zahlenwerte geladen, aber in diesem Programm kommt plötzlich die Anweisung

```
ldi temp1, 'T'
```

vor. Wie ist diese zu verstehen? Passiert hier etwas grundlegend anderes als beim Laden einer Zahl in ein Register?

Die Antwort darauf lautet: Nein. Auch hier wird letztendlich nur eine Zahl in ein Register geladen. Der Schlüssel zum Verständnis beruht darauf, dass zum LCD, so wie zu allen Ausgabegeräten, für die Ausgabe von Texten immer nur Zahlen übertragen werden, sog. Codes. Zum Beispiel könnte man vereinbaren, dass ein LCD, wenn es den Ausgabecode 65 erhält, ein 'A' anzeigt, bei einem Ausgabecode von 66 ein 'B' usw. Naturgemäß gibt es daher viele verschiedene Code-Buchstaben Zuordnungen. Damit hier etwas Ordnung in das potentielle Chaos kommt, hat man sich bereits in der Steinzeit der Programmierung auf bestimmte Codetabellen geeinigt, von denen die verbreitetste sicherlich die ASCII-Zuordnung ist.

7.7 ASCII

ASCII steht für *American Standard Code for Information Interchange* und ist ein standardisierter Code zur Zeichenumsetzung. Die Codetabelle sieht hexadezimal dabei wie folgt aus:

	.0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	xA	xB	xC	xD	xE	xF
0x	NUL	SOH	STX	ETX	EOT	ENQ	ACK	BEL	BS	HT	LF	VT	FF	CR	SO	SI
1x	DLE	DC1	DC2	DC3	DC4	NAK	SYN	ETB	CAN	EM	SUB	ESC	FS	GS	RS	US
2x	SP	!	"	#	\$	%	&	'	()	*	+	,	-	.	/
3x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	:	;	<	=	>	?
4x	@	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
5x	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	[\]	^	_
6x	`	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
7x	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	{		}	~	DEL

Die ersten beiden Zeilen enthalten die Codes für einige Steuerzeichen, ihre vollständige Beschreibung würde hier zu weit führen. Das Zeichen **SP** steht für ein *Space*, also ein Leerzeichen. **BS** steht für *Backspace*, also ein Zeichen zurück. **DEL** steht für *Delete*, also das Löschen eines Zeichens. **CR** steht für *Carriage Return*, also wörtlich: der Wagenrücklauf (einer Schreibmaschine), während **LF** für *Line feed*, also einen Zeilenvorschub steht.

Der Assembler kennt diese Codetabelle und ersetzt die Zeile

```
ldi temp1, 'T'
```

durch

```
ldi temp1, $54
```

was letztendlich auch der Lesbarkeit des Programmes zugute kommt. Funktional besteht kein Unterschied zwischen den beiden Anweisungen. Beide bewirken, dass das Register temp1 mit dem Bitmuster 01010100 (= hexadezimal 54, = dezimal 84 oder eben der ASCII Code für **T**) geladen wird.

Das LCD wiederum kennt diese Code-Tabelle ebenfalls und wenn es über den Datenbus die Codezahl \$54 zur Anzeige empfängt, dann schreibt es ein **T** an die aktuelle Cursorposition. Genauer gesagt, weiss das LCD nichts von einem **T**. Es sieht einfach in seinen internen Tabellen nach, welche Pixel beim Empfang der Codezahl \$54 auf schwarz zu setzen sind. 'Zufällig' sind das genau jene Pixel, die für uns Menschen ein **T** ergeben.

7.8 Welche Befehle versteht das LCD?

Auf dem LCD arbeitet ein Kontroller vom Typ HD44780. Dieser Kontroller versteht eine Reihe von Befehlen, die allesamt mittels lcd_command gesendet werden können. Ein Kommando ist dabei nichts anderes als ein Befehlsbyte, in dem die verschiedenen Bits verschiedene Bedeutungen haben:

0	dieses Bit muss 0 sein
1	dieses Bit muss 1 sein
x	der Zustand dieses Bits ist egal
sonstige Buchstaben	das Bit muss je nach gewünschter Funktionalität gesetzt werden. Die mögliche Funktionalität des jeweiligen Bits geht aus der Befehlsbeschreibung hervor

Beispiel: Das Kommando 'ON/OFF Control' soll benutzt werden, um das Display einzuschalten, der Cursor soll eingeschaltet werden und der Cursor soll blinken. Das Befehlsbyte ist so aufgebaut:

```
0b00001dcb
```

Aus der Befehlsbeschreibung entnimmt man:

- Display ein bedeutet, dass an der Bitposition d eine 1 stehen muss.
- Cursor ein bedeutet, dass an der Bitposition c ein 1 stehen muss.
- Cursor blinken bedeutet, dass an der Bitposition b eine 1 stehen muss.

Das dafür zu übertragende Befehlsbyte hat also die Gestalt 0b00001111 oder in hexadezimaler Schreibweise \$0F.

7.8.1 Clear display: 0b00000001

Die Anzeige wird gelöscht und der Ausgabecursor kehrt an die Home Position (links, erste Zeile) zurück.

Ausführungszeit: 1.64ms

7.8.2 Cursor home: 0b0000001x

Der Cursor kehrt an die Home Position (links, erste Zeile) zurück. Ein verschobenes Display wird auf die Grundeinstellung zurückgesetzt.

Ausführungszeit: 40µs bis 1.64ms

7.8.3 Entry mode: 0b000001is

Legt die Cursor Richtung sowie eine mögliche Verschiebung des Displays fest

- $i = 1$, Cursorposition bei Ausgabe eines Zeichens erhöhen
- $i = 0$, Cursorposition bei Ausgabe eines Zeichens vermindern
- $s = 1$, Display wird gescrollt, wenn der Cursor das Ende/Anfang, je nach Einstellung von i , erreicht hat.

Ausführungszeit: 40µs

7.8.4 On/off control: 0b00001dcb

Display insgesamt ein/ausschalten; den Cursor ein/ausschalten; den Cursor auf blinken schalten/blinken aus. Wenn das Display ausgeschaltet wird, geht der Inhalt des Displays nicht verloren. Der vorher angezeigte Text wird nach Wiedereinschalten erneut angezeigt. Ist der Cursor eingeschaltet, aber Blinken ausgeschaltet, so wird der Cursor als Cursorzeile in Pixelzeile 8 dargestellt. Ist Blinken eingeschaltet, wird der Cursor als blinkendes ausgefülltes Rechteck dargestellt, welches abwechselnd mit dem Buchstaben an dieser Stelle angezeigt wird.

- $d = 0$, Display aus
- $d = 1$, Display ein
- $c = 0$, Cursor aus
- $c = 1$, Cursor ein
- $b = 0$, Cursor blinken aus
- $b = 1$, Cursor blinken ein

Ausführungszeit: 40µs

7.8.5 Cursor/Scrollen: 0b0001srxx

Bewegt den Cursor oder scrollt das Display um eine Position entweder nach rechts oder nach links.

- $s = 1$, Display scrollen
- $s = 0$, Cursor bewegen
- $r = 1$, nach rechts
- $r = 0$, nach links

Ausführungszeit: 40µs

7.8.6 Konfiguration: 0b001dnfxx

Einstellen der Interface Art, Modus, Font

- d = 0, 4-Bit Interface
- d = 1, 8-Bit Interface
- n = 0, 1 zeilig
- n = 1, 2 zeilig
- f = 0, 5x7 Pixel
- f = 1, 5x11 Pixel

Ausführungszeit: 40µs

7.8.7 Character RAM Address Set: 0b01aaaaaa

Mit diesem Kommando werden maximal 8 selbst definierte Zeichen definiert. Dazu wird der Character RAM Zeiger auf den Anfang des Character Generator (CG) RAM gesetzt und das Zeichen durch die Ausgabe von 8 Byte definiert. Der Adresszeiger wird nach Ausgabe jeder Pixelzeile (8 Bit) vom LCD selbst erhöht. Nach Beendigung der Zeichendefinition muss die Schreibposition explizit mit dem Kommando "Display RAM Address Set" wieder in den DD-RAM Bereich gesetzt werden.

aaaaaa 6-bit CG RAM Adresse

Ausführungszeit: 40µs

7.8.8 Display RAM Address Set: 0b1aaaaaaa

Den Cursor neu positionieren. Display Data (DD) Ram ist vom Character Generator (CG) Ram unabhängig. Der Adresszeiger wird bei Ausgabe eines Zeichens ins DD Ram automatisch erhöht. Das Display verhält sich so, als ob eine Zeile immer aus 32 logischen Zeichen besteht, von der, je nach konkretem Displaytyp (16 Zeichen, 20 Zeichen) immer nur ein Teil sichtbar ist.

aaaaaaa 7-bit DD RAM Adresse. Auf 2-zeiligen Displays (und den meisten 16x1 Displays), kann die Adressangabe wie folgt interpretiert werden:

1aaaaaa

- 1 = Zeilennummer (0 oder 1)
- a = 6-Bit Spaltennummer

Ausführungszeit: 40µs

7.9 Einschub: Code aufräumen

Es wird Zeit, sich einmal etwas kritisch mit den bisher geschriebenen Funktionen auseinander zu setzen.

7.9.1 Portnamen aus dem Code herausziehen

Wenn wir die LCD-Funktionen einmal genauer betrachten, dann fällt sofort auf, dass über die Funktionen verstreut immer wieder das **PORTD** sowie einzelne Zahlen für die Pins an diesem Port auftauchen. Wenn das LCD an einem anderen Port betrieben werden soll, oder sich die Pin-Belegung ändert, dann muss an all diesen Stellen eine Anpassung vorgenommen werden. Dabei darf keine einzige Stelle übersehen werden, ansonsten würden die LCD-Funktionen nicht oder nicht vollständig funktionieren.

Eine Möglichkeit, dem vorzubeugen, ist es, diese immer gleichbleibenden Dinge an den Anfang der LCD-Funktionen vorzuziehen:

```

////////////////////////////////////
;;          LCD-Routinen          ;;
;;          =====          ;;
;;          (c) andreas-s@web.de  ;;
;;                               ;;
;; 4bit-Interface                ;;
;; DB4-DB7:      PD0-PD3        ;;
;; RS:           PD4            ;;
;; E:            PD5            ;;
////////////////////////////////////

.equ LCD_PORT = PORTD
.equ LCD_DDR  = DDRD
.equ PIN_E    = 5
.equ PIN_RS   = 4

lcd_data:                                ; sendet ein Datenbyte an das LCD
    mov temp2, temp1                    ; "Sicherungskopie" für
    swap temp1                          ; die Übertragung des 2.Nibbles
    andi temp1, 0b00001111              ; Vertauschen
    sbr temp1, 1<<PIN_RS                 ; oberes Nibble auf Null setzen
    out LCD_PORT, temp1                 ; entspricht 0b00010000
    rcall lcd_enable                    ; ausgeben
    rcall lcd_enable                    ; Enable-Routine aufrufen
    rcall lcd_enable                    ; 2. Nibble, kein swap da es schon
    rcall lcd_enable                    ; an der richtigen stelle ist
    andi temp2, 0b00001111              ; obere Hälfte auf Null setzen
    sbr temp2, 1<<PIN_RS                 ; entspricht 0b00010000
    out LCD_PORT, temp2                 ; ausgeben
    rcall lcd_enable                    ; Enable-Routine aufrufen
    rcall delay50us                     ; Delay-Routine aufrufen
    ret                                  ; zurück zum Hauptprogramm

; sendet einen Befehl an das LCD

lcd_command:                             ; wie lcd_data, nur RS=0
    mov temp2, temp1

```

```

        swap temp1
        andi temp1, 0b00001111
        out LCD_PORT, temp1
        rcall lcd_enable
        andi temp2, 0b00001111
        out LCD_PORT, temp2
        rcall lcd_enable
        rcall delay50us
        ret

; erzeugt den Enable-Puls
lcd_enable:
        sbi LCD_PORT, PIN_E           ; Enable high
        nop                           ; 3 Taktzyklen warten
        nop
        nop
        cbi LCD_PORT, PIN_E           ; Enable wieder low
        ret                           ; Und wieder zurück

; Pause nach jeder Übertragung
delay50us:                               ; 50us Pause
        ldi temp1, $42
delay50us_: dec temp1
        brne delay50us_
        ret                           ; wieder zurück

; Längere Pause für manche Befehle
delay5ms:                               ; 5ms Pause
        ldi temp1, $21
WGLOOP0: ldi temp2, $C9
WGLOOP1: dec temp2
        brne WGLOOP1
        dec temp1
        brne WGLOOP0
        ret                           ; wieder zurück

; Initialisierung: muss ganz am Anfang des Programms aufgerufen werden
lcd_init:
        ldi temp1, 0xFF               ; alle Pins am Ausgabeport auf Ausgang
        out LCD_DDR, temp1

        ldi temp3, 6
powerupwait:
        rcall delay5ms
        dec temp3
        brne powerupwait
        ldi temp1, 0b00000011         ; muss 3mal hintereinander gesendet
        out LCD_PORT, temp1           ; werden zur Initialisierung
        rcall lcd_enable               ; 1
        rcall delay5ms
        rcall lcd_enable               ; 2
        rcall delay5ms
        rcall lcd_enable               ; und 3!
        rcall delay5ms
        ldi temp1, 0b00000010         ; 4bit-Modus einstellen
        out LCD_PORT, temp1
        rcall lcd_enable
        rcall delay5ms
        ldi temp1, 0b00101000         ; 4 Bot, 2 Zeilen
        rcall lcd_command
        ldi temp1, 0b00001100         ; Display on, Cursor off
        rcall lcd_command
        ldi temp1, 0b00000100         ; endlich fertig
        rcall lcd_command

```

```

        ret

; Sendet den Befehl zur Löschung des Displays
lcd_clear:
        ldi    temp1, 0b00000001    ; Display löschen
        rcall  lcd_command
        rcall  delay5ms
        ret

; Sendet den Befehl: Cursor Home
lcd_home:
        ldi    temp1, 0b00000010    ; Cursor Home
        rcall  lcd_command
        rcall  delay5ms
        ret

```

Mittels **.equ** werden mit dem Assembler Textersetzungen vereinbart. Der Assembler ersetzt alle Vorkommnisse des Quelltextes durch den zu ersetzenden Text. Dadurch ist es z.B. möglich, alle Vorkommnisse von **PORTD** durch **LCD_PORT** auszutauschen. Wird das LCD an einen anderen Port, z.B. **PORTB** gelegt, dann genügt es, die Zeilen

```

.equ LCD_PORT = PORTD
.equ LCD_DDR  = DDRD

```

durch

```

.equ LCD_PORT = PORTB
.equ LCD_DDR  = DDRB

```

zu ersetzen. Der Assembler sorgt dann dafür, dass diese Portänderung an den relevanten Stellen im Code über die Textersetzungen einfließt. Selbiges natürlich mit der Pin-Zuordnung.

7.9.2 Registerbenutzung

Bei diesen Funktionen mussten einige Register des Prozessors benutzt werden, um darin Zwischenergebnisse zu speichern bzw. zu bearbeiten.

Beachtet werden muss dabei natürlich, dass es zu keinen Überschneidungen kommt. Solange nur jede Funktion jeweils für sich betrachtet wird, ist das kein Problem. In 20 oder 30 Code-Zeilen kann man gut verfolgen, welches Register wofür benutzt wird. Schwieriger wird es, wenn Funktionen wiederum andere Funktionen aufrufen, die ihrerseits wieder Funktionen aufrufen usw. Jede dieser Funktionen benutzt einige Register und mit zunehmender Programmgröße wird es immer schwieriger, zu verfolgen, welches Register zu welchem Zeitpunkt wofür benutzt wird.

Speziell bei Basisfunktionen wie diesen LCD-Funktionen, ist es daher oft ratsam, dafür zu sorgen, dass jede Funktion die Register wieder in dem Zustand hinterlässt, indem sie sie auch vorgefunden hat. Wir benötigen dazu wieder den Stack, auf dem die Registerinhalte bei Betreten einer Funktion zwischengespeichert werden und von dem die Register bei Verlassen einer Funktion wiederhergestellt werden.

Nehmen wir die Funktion

```
; Sendet den Befehl zur Löschung des Displays
lcd_clear:
    ldi    temp1, 0b00000001    ; Display löschen
    rcall lcd_command
    rcall delay5ms
    ret
```

Diese Funktion verändert das Register temp1. Um das Register abzusichern, schreiben wir die Funktion um:

```
; Sendet den Befehl zur Löschung des Displays
lcd_clear:
    push  temp1                ; temp1 auf dem Stack sichern
    ldi    temp1, 0b00000001    ; Display löschen
    rcall lcd_command
    rcall delay5ms
    pop    temp1                ; temp1 vom Stack wiederherstellen
    ret
```

Am besten hält man sich an die Regel: Jede Funktion ist dafür zuständig, die Register zu sichern und wieder herzustellen, die sie auch selbst verändert. **lcd_clear** ruft die Funktionen **lcd_command** und **delay5ms** auf. Wenn diese Funktionen selbst wieder Register verändern (und das tun sie), so ist es die Aufgabe dieser Funktionen, sich um die Sicherung und das Wiederherstellen der entsprechenden Register zu kümmern. **lcd_clear** sollte sich nicht darum kümmern müssen. Auf diese Weise ist das Schlimmste, das einem passieren kann, dass ein paar Register unnützlich gesichert und wiederhergestellt werden. Das kostet zwar etwas Rechenzeit und etwas Speicherplatz auf dem Stack, ist aber immer noch besser als das andere Extrem: Nach einem Funktionsaufruf haben einige Register nicht mehr den Wert, den sie haben sollten, und das Programm rechnet mit falschen Zahlen weiter.

7.9.3 Lass den Assembler rechnen

Betrachtet man den Code genauer, so fallen einige konstante Zahlenwerte auf (Das vorangestellte \$ kennzeichnet die Zahl als Hexadezimalzahl):

```
delay50us:                                ; 50us Pause
    ldi    temp1, $42
delay50us_:
    dec    temp1
    brne  delay50us_
    ret                                ; wieder zurück
```

Der Code benötigt eine Warteschleife, die mindestens 50µs dauert. Die beiden Befehle innerhalb der Schleife benötigen 3 Takte: 1 Takt für den **dec** und der **brne** benötigt 2 Takte, wenn die Bedingung zutrifft, der Branch also genommen wird. Bei 4 Mhz werden also $4000000 / 3 * 50 / 1000000 = 66.6$ Durchläufe durch die Schleife benötigt, um eine Verzögerungszeit von 50µs (0.000050 Sekunden) zu erreichen, hexadezimal ausgedrückt: \$42.

Der springende Punkt ist: Bei anderen Taktfrequenzen müsste man nun jedesmal diese Berechnung machen und den entsprechenden Zahlenwert einsetzen. Das kann aber der Assembler genauso gut erledigen. Am Anfang des Codes wird ein Eintrag definiert, der die Taktfrequenz festlegt. Traditionell heißt dieser Eintrag *XTAL*:

```
.equ XTAL = 4000000

...

delay50us:                ; 50us Pause
    ldi temp1, ( XTAL * 50 / 3 ) / 1000000
delay50us_:
    dec temp1
    brne delay50us_
    ret                    ; wieder zurück
```

An einer anderen Codestelle gibt es weitere derartige magische Zahlen:

```
    ; Längere Pause für manche Befehle
delay5ms:                  ; 5ms Pause
    ldi temp1, $21
WGLOOP0: ldi temp2, $C9
WGLOOP1: dec temp2
    brne WGLOOP1
    dec temp1
    brne WGLOOP0
    ret                    ; wieder zurück
```

Was geht hier vor? Die innere Schleife benötigt wieder 3 Takte pro Durchlauf. Bei $\$C9 = 201$ Durchläufen werden also $201 * 3 = 603$ Takte verbraucht. In der äußeren Schleife werden pro Durchlauf also $1 + 603 + 1 + 2 = 607$ Takte verbraucht. Da die äußere Schleife $\$21 = 33$ mal wiederholt wird, werden 20031 Takte verbraucht. Bei 4Mhz benötigt der Prozessor $20031 / 4000000 = 0.005007$ Sekunden, also 5 ms . Wird der Wiederholwert für die innere Schleife bei $\$C9$ belassen, so werden $4000000 / 607 * 5 / 1000$ Wiederholungen der äusseren Schleife benötigt. Auch diese Berechnung kann wieder der Assembler übernehmen:

```
    ; Längere Pause für manche Befehle
delay5ms:                  ; 5ms Pause
    ldi temp1, ( XTAL * 5 / 607 ) / 1000
WGLOOP0: ldi temp2, $C9
WGLOOP1: dec temp2
    brne WGLOOP1
    dec temp1
    brne WGLOOP0
    ret                    ; wieder zurück
```

Ein kleines Problem kann bei der Verwendung dieses Verfahrens entstehen: Bei hohen Taktfrequenzen und großen Wartezeiten kann der berechnete Wert größer als 255 werden und man bekommt die Fehlermeldung "Operand(s) out of range" beim Assemblieren. Dieser Fall tritt zum Beispiel für obige Konstruktion bei einer Taktfrequenz von 16 MHz ein (genauer gesagt ab $15,3\text{ MHz}$), während darunter *XTAL* beliebig geändert werden kann. Als einfachste Lösung bietet es sich an, die Zahl der Takte pro Schleifendurchlauf durch das Einfügen von **nop** zu erhöhen und die Berechnungsvorschrift anzupassen.

7.10 Ausgabe eines konstanten Textes

Weiter oben wurde schon einmal ein Text ausgegeben. Dies geschah durch Ausgabe von einzelnen Zeichen. Das können wir auch anders machen. Wir können den Text im Speicher ablegen und eine Funktion schreiben, die die einzelnen Zeichen aus dem Speicher holt und ausgibt. Dabei erhebt sich aber eine Fragestellung: Woher weiß die Funktion eigentlich, wie lange der Text ist? Die Antwort darauf lautet: Sie kann es nicht wissen. Wir müssen irgendwelche Vereinbarungen treffen, woran die Funktion erkennen kann, dass der Text zu Ende ist. Im Wesentlichen werden dazu 2 Methoden benutzt:

- Der Text enthält ein spezielles Zeichen, welches das Ende des Textes markiert
- Wir speichern nicht nur den Text selbst, sondern auch die Länge des Textes

Mit einer der beiden Methoden ist es der Textausgabefunktion dann ein Leichtes, den Text vollständig auszugeben.

Wir werden uns im Weiteren dafür entscheiden, ein spezielles Zeichen, eine 0, dafür zu benutzen. Die Ausgabefunktionen werden dann etwas einfacher, als wenn bei der Ausgabe die Anzahl der bereits ausgegebenen Zeichen mitgezählt werden muss.

Den Text selbst speichern wir im Flash-Speicher, also dort, wo auch das Programm gespeichert ist:

```
; Einen konstanten Text aus dem Flash Speicher
; ausgeben. Der Text wird mit einer 0 beendet
lcd_flash_string:
    push    temp1

lcd_flash_string_1:
    lpm     temp1, Z+
    cpi     temp1, 0
    breq    lcd_flash_string_2
    rcall   lcd_data
    rjmp    lcd_flash_string_1

lcd_flash_string_2:
    pop     temp1
    ret
```

Diese Funktion benutzt den Befehl **lpm**, um das jeweils nächste Zeichen aus dem Flash Speicher in ein Register zur Weiterverarbeitung zu laden. Dazu wird der sog. **Z-Pointer** benutzt. So nennt man das Registerpaar **R30** und **R31**. Nach jedem Ladevorgang wird dabei durch den Befehl

```
lpm    temp1, Z+
```

dieser Z-Pointer um 1 erhöht. Mittels **cpi** wird das in das Register **temp1** geladene Zeichen mit 0 verglichen. **cpi** vergleicht die beiden Zahlen und merkt sich das Ergebnis in einem speziellen Register in Form von Status Bits. **cpi** zieht dabei ganz einfach die beiden Zahlen voneinander ab. Sind sie gleich, so kommt da als Ergebnis 0 heraus und **cpi** setzt daher konsequenter Weise das Zero-Flag, das anzeigt, dass die vorhergegangene Operation eine 0 als Ergebnis hatte. **breq** wertet diese Status-Bits aus. Wenn die vorhergegangene Operation ein 0-Ergebnis hatte, das Zero-Flag also gesetzt ist, dann wird ein Sprung zum angegebenen Label durchgeführt. In Summe bewirkt also die Sequenz

```
cpi     temp1, 0
breq    lcd_flash_string_2
```

dass das gelesene Zeichen mit 0 verglichen wird und falls das gelesene Zeichen tatsächlich 0 war, an der Stelle `lcd_flash_string_2` weiter gemacht wird. Im anderen Fall wird die bereits geschriebene

Funktion `lcd_data` aufgerufen, welche das Zeichen ausgibt. `lcd_data` erwartet dabei das Zeichen im Register `temp1`, genau in dem Register, in welches wir vorher mittels `lpm` das Zeichen geladen hatten.

Das verwendende Programm sieht dann so aus:

```
.include "m8def.inc"

.def temp1 = r16
.def temp2 = r17
.def temp3 = r18

        ldi temp1, LOW(RAMEND)      ; LOW-Byte der obersten RAM-Adresse
        out SPL, temp1
        ldi temp1, HIGH(RAMEND)    ; HIGH-Byte der obersten RAM-Adresse
        out SPH, temp1

        rcall lcd_init             ; Display initialisieren
        rcall lcd_clear           ; Display löschen

        ldi ZL, LOW(text*2)       ; Adresse des Strings in den
        ldi ZH, HIGH(text*2)     ; Z-Pointer laden

        rcall lcd_flash_string    ; Unterprogramm gibt String aus der
                                ; durch den Z-Pointer adressiert wird
loop:
        rjmp loop

text:
        .db "Test",0              ; Stringkonstante, durch eine 0
                                ; abgeschlossen

.include "lcd-routines.asm"      ; LCD Funktionen
```

Genauer über die Verwendung unterschiedlicher Speicher findet sich im Kapitel [Speicher](#)

7.11 Zahlen ausgeben

Um Zahlen, die beispielsweise in einem Register gespeichert sind, ausgeben zu können, ist es notwendig sich eine Textrepräsentierung der Zahl zu generieren. Die Zahl 123 wird also in den Text "123" umgewandelt welcher dann ausgegeben wird. Aus praktischen Gründen wird allerdings der Text nicht vollständig generiert (man müsste ihn ja irgendwo zwischenspeichern) sondern die einzelnen Buchstaben werden sofort ausgegeben, sobald sie bekannt sind.

7.11.1 Dezimal ausgeben

Das Prinzip der Umwandlung ist einfach. Um herauszufinden wieviele Hunderter in der Zahl 123 enthalten sind, genügt es in einer Schleife immer wieder 100 von der Zahl abzuziehen und mitzuzählen wie oft dies gelang, bevor das Ergebnis negativ wurde. In diesem Fall lautet die Antwort: 1 mal, denn $123 - 100$ macht 23. Versucht man erneut 100 anzuziehen, so ergibt sich eine negative Zahl. Also muss eine '1' ausgegeben werden. Die verbleibenden 23 werden weiterbehandelt, indem festgestellt wird wieviele Zehner darin enthalten sind. Auch hier wiederum: In einer Schleife solange 10 abziehen, bis das Ergebnis negativ wurde. Konkret geht das 2 mal gut, also muss das nächste auszugebende Zeichen ein '2' sein. Damit verbleiben noch die Einer, welche direkt in das entsprechende Zeichen umgewandelt werden können. In Summe hat man also an das Display die Zeichen '1' '2' '3' ausgegeben.

```

;*****
;
; Eine 8 Bit Zahl ohne Vorzeichen ausgeben
;
; Übergabe:           Zahl im Register temp1
; veränderte Register: keine
;
lcd_number:
    push    temp2           ; die Funktion verändert temp2, also sichern
                          ; wir den Inhalt, um ihn am Ende wieder
                          ; herstellen zu können

    mov     temp2, temp1    ; das Register temp1 frei machen
                          ; abzählen wieviele Hunderter
                          ; in der Zahl enthalten sind

    ldi     temp1, '0'

lcd_number_1:
    subi    temp2, 100      ; 100 abziehen
    brcs   lcd_number_2    ; ist dadurch ein Unterlauf entstanden?
    inc     temp1          ; Nein: 1 Hunderter mehr ...
    rjmp   lcd_number_1    ; ... und ab zur nächsten Runde
;
; die Hunderterstelle ausgeben

lcd_number_2:
    rcall  lcd_data
    subi   temp2, -100      ; 100 wieder dazuzählen, da die
                          ; vorhergehende Schleife 100 zuviel
                          ; abgezogen hat

                          ; abzählen wieviele Zehner in
                          ; der Zahl enthalten sind

    ldi     temp1, '0'

lcd_number_3:
    subi    temp2, 10       ; 10 abziehen
    brcs   lcd_number_4    ; ist dadurch ein Unterlauf entstanden?
    inc     temp1          ; Nein: 1 Zehner mehr ...

```

```

        rjmp  lcd_number_3      ; ... und ab zur nächsten Runde
                                   ; die Zehnerstelle ausgeben
lcd_number_4:
        rcall lcd_data
        subi  temp2, -10       ; 10 wieder dazuzählen, da die
                                   ; vorhergehende Schleife 10 zuviel
                                   ; abgezogen hat

                                   ; die übrig gebliebenen Einer
                                   ; noch ausgeben
        ldi   temp1, '0'      ; die Zahl in temp2 ist jetzt im Bereich
        add   temp1, temp2    ; 0 bis 9. Einfach nur den ASCII Code für
        rcall lcd_data       ; '0' dazu addieren und wir erhalten direkt
                                   ; den ASCII Code für die Ziffer

        pop   temp2          ; den gesicherten Inhalt von temp2 wieder
                                   ; herstellen
        ret                   ; und zurück

```

Beachte: Diese Funktion benutzt wiederum die Funktion **lcd_data**. Anders als bei den bisherigen Aufrufen ist **lcd_number** aber darauf angewiesen, dass **lcd_data** das Register **temp2** unangetastet lässt. Falls sie es noch nicht getan haben, dann ist das jetzt die perfekte Gelegenheit, **lcd_data** mit den entsprechenden **push** und **pop** Befehlen zu versehen. Sie sollten dies unbedingt zur Übung selbst machen. Am Ende muß die Funktion dann wie diese hier aussehen:

```

;sendet ein Datenbyte an das LCD
lcd_data:
        push  temp2
        mov   temp2, temp1      ; "Sicherungskopie" für
                                   ; die Übertragung des 2.Nibbles
        swap  temp1            ; Vertauschen
        andi  temp1, 0b00001111 ; oberes Nibble auf Null setzen
        sbr   temp1, 1<<PIN_RS ; entspricht 0b00010000
        out   LCD_PORT, temp1  ; ausgeben
        rcall lcd_enable      ; Enable-Routine aufrufen
                                   ; 2. Nibble, kein swap da es schon
                                   ; an der richtigen stelle ist
        andi  temp2, 0b00001111 ; obere Hälfte auf Null setzen
        sbr   temp2, 1<<PIN_RS ; entspricht 0b00010000
        out   LCD_PORT, temp2  ; ausgeben
        rcall lcd_enable      ; Enable-Routine aufrufen
        rcall delay50us      ; Delay-Routine aufrufen
        pop   temp2
        ret                    ; zurück zum Hauptprogramm

; sendet einen Befehl an das LCD
lcd_command:
        push  temp2
        mov   temp2, temp1
        swap  temp1
        andi  temp1, 0b00001111
        out   LCD_PORT, temp1
        rcall lcd_enable
        andi  temp2, 0b00001111
        out   LCD_PORT, temp2
        rcall lcd_enable
        rcall delay50us
        pop   temp2
        ret

```

Kurz zur Funktionsweise der Funktion **lcd_number**: Die Zahl in einem Register bewegt sich im Wertebereich 0 bis 255. Um herauszufinden, wie die Hunderterstelle lautet, zieht die Funktion einfach in einer Schleife immer wieder 100 von der Schleife ab, bis bei der Subtraktion ein Unterlauf, angezeigt durch das Setzen des Carry-Bits bei der Subtraktion, entsteht. Die Anzahl wird im Register **temp1** mitgezählt. Da dieses Register mit dem ASCII Code von '0' initialisiert wurde, und dieser ASCII Code bei jedem Schleifendurchlauf um 1 erhöht wird, können wir das Register **temp1** direkt zur Ausgabe des Zeichens für die Hunderterstelle durch die Funktion **lcd_data** benutzen. Völlig analog funktioniert auch die Ausgabe der Zehnerstelle.

7.11.2 Unterdrückung von führenden Nullen

Achtung: Diese Routine ist fehlerhaft

Diese Funktion gibt jede Zahl im Register **temp1** immer mit 3 Stellen aus. Führende Nullen werden nicht unterdrückt. Möchte man dies ändern, so ist das ganz leicht möglich: Vor Ausgabe der Hunderterstelle bzw. Zehnerstelle muss lediglich überprüft werden, ob die Entsprechende Ausgabe eine '0' wäre. Ist sie das, so wird die Ausgabe übersprungen. Lediglich in der Einerstelle wird jede Ziffer wie errechnet ausgegeben.

```

...
                                ; die Hunderterstelle ausgeben, wenn
                                ; sie nicht '0' ist
lcd_number_2:
    cpi    temp1, '0'
    breq  lcd_number_2a
    rcall lcd_data
lcd_number_2a:
    subi  temp2, -100           ; 100 wieder dazuzählen, da die
    ...
...
                                ; die Zehnerstelle ausgeben, wenn
                                ; sie nicht '0' ist
lcd_number_4:
    cpi    temp1, '0'
    breq  lcd_number_4a
    rcall lcd_data
lcd_number_4a:
    subi  temp2, -10           ; 10 wieder dazuzählen, da die
    ...

```

Das Verfahren, die einzelnen Stellen durch Subtraktion zu bestimmen, ist bei kleinen Zahlen eine durchaus gängige Alternative. Vor allem dann, wenn keine hardwaremäßige Unterstützung für Multiplikation und Division zur Verfügung steht. Ansonsten könnte man die einzelnen Ziffern auch durch Division bestimmen. Das Prinzip ist folgendes (beispielhaft an der Zahl 52783 gezeigt)

```

52783 / 10      -> 5278
52783 - 5278 * 10  ->          3

5278 / 10      -> 527
5278 - 527 * 10  ->          8

527 / 10       -> 52
527 - 52 * 10   ->          7

52 / 10        -> 5

```

```

52 - 5 * 10      ->      2
5 / 10           -> 0
5 - 0 * 10      ->      5

```

Das Prinzip ist also die Restbildung bei einer fortgesetzten Division durch 10, wobei die einzelnen Ziffern in umgekehrter Reihenfolge ihrer Wertigkeit entstehen. Dadurch hat man aber ein Problem: Damit die Zeichen in der richtigen Reihenfolge ausgegeben werden können, muß man sie meistens zwischenspeichern um sie in der richtigen Reihenfolge ausgeben zu können. Wird die Zahl in einem Feld von immer gleicher Größe ausgegeben, dann kann man auch die Zahl von rechts nach links ausgeben (bei einem LCD ist das möglich).

7.11.3 Hexadezimal ausgeben

Zu guter letzt hier noch eine Funktion, die eine Zahl aus dem Register **temp1** in hexadezimaler Form ausgibt. Die Funktion weist keine Besonderheiten auf und sollte unmittelbar verständlich sein.

```

;*****
;
; Eine 8 Bit Zahl ohne Vorzeichen hexadezimal ausgeben
;
; Übergabe:           Zahl im Register temp1
; veränderte Register: keine
;
lcd_number_hex:
    swap    temp1
    rcall  lcd_number_hex_digit
    swap    temp1

lcd_number_hex_digit:
    push   temp1

    andi   temp1, $0F
    cpi    temp1, 10
    brlt  lcd_number_hex_digit_1
    subi   temp1, -( 'A' - '9' - 1 ) ; es wird subi mit negativer
                                     ; Konstante verwendet, weil es kein
                                     ; addi gibt

lcd_number_hex_digit_1:
    subi   temp1, -'0'                ; ditto
    rcall  lcd_data

    pop    temp1
    ret

```

7.11.4 Eine 16-Bit Zahl aus einem Registerpärchen ausgeben

Um eine 16 Bit Zahl auszugeben wird wieder das bewährte Schema benutzt die einzelnen Stellen durch Subtraktion abzuzählen. Da es sich hierbei allerdings um eine 16 Bit Zahl handelt, müssen die Subtraktionen als 16-Bit Arithmetik ausgeführt werden.

```

;*****
;
; Eine 16 Bit Zahl ohne Vorzeichen ausgeben
;
; Übergabe:           Zahl im Register temp2 (low Byte) / temp3 (high Byte)
; veränderte Register: keine
;
lcd_number16:
    push    temp1
    push    temp2
    push    temp3

; die Zehntausenderstellen abzählen ...
    ldi     temp1, '0'
lcd_number0:
    subi    temp2, low(10000)
    sbci    temp3, high(10000)
    brcs   lcd_number1
    inc     temp1
    rjmp   lcd_number0

; .. und ausgeben
lcd_number1:
    rcall   lcd_data
    subi    temp2, low(-10000)
    sbci    temp3, high(-10000)

; die Tausenderstellen abzählen ...
    ldi     temp1, '0'
lcd_number2:
    subi    temp2, low(1000)
    sbci    temp3, high(1000)
    brcs   lcd_number3
    inc     temp1
    rjmp   lcd_number2

; ... und ausgeben
lcd_number3:
    rcall   lcd_data
    subi    temp2, low(-1000)
    sbci    temp3, high(-1000)

; Als nächstes kommt die Hunderterstelle drann
    ldi     temp1, '0'
lcd_number4:
    subi    temp2, low(100)
    sbci    temp3, high(100)
    brcs   lcd_number5
    inc     temp1
    rjmp   lcd_number4

; und ausgeben
lcd_number5:
    rcall   lcd_data
    subi    temp2, -100

; bleiben noch die Zehner
    ldi     temp1, '0'
lcd_number6:
    subi    temp2, 10
    brcs   lcd_number7
    inc     temp1
    rjmp   lcd_number6

```

```

; ausgeben ...
lcd_number7:
    rcall lcd_data
    subi  temp2, -10

    ldi   temp1, '0'
    add   temp1, temp2
    rcall lcd_data

; fertig. Stack wieder aufräumen
    pop   temp1
    pop   temp2
    pop   temp3

    ret

```

7.12 Der überarbeitete, komplette Code

Hier also die komplett überarbeitete Version der LCD Funktionen.

Die für die Benutzung relevanten Funktionen

- **lcd_init**
- **lcd_clear**
- **lcd_home**
- **lcd_data**
- **lcd_command**
- **lcd_flash_string**
- **lcd_number**
- **lcd_number_hex**

sind so ausgeführt, dass sie kein Register (ausser dem Statusregister **SREG**) verändern. Die bei manchen Funktionen notwendige Argumente werden immer im Register **temp1** übergeben, wobei **temp1** vom Usercode definiert werden muss.

[Download lcd-routines.asm](#)

sind so ausgeführt, dass sie kein Register (ausser dem Statusregister **SREG**) verändern. Die bei manchen Funktionen notwendige Argumente werden immer im Register **temp1** übergeben, wobei **temp1** vom Usercode definiert werden muss.

der progger hat vergessen das Z reg in den sub's lcd_flash_string ... zu sichern, aber danke für den Einstig

Lars

8 AVR-Tutorial: Interrupts

8.1 Definition

Bei bestimmten Ereignissen in Prozessoren wird ein sogenannter *Interrupt* ausgelöst. Dabei wird das Programm unterbrochen und ein Unterprogramm aufgerufen. Wenn dieses beendet ist, läuft das Hauptprogramm ganz normal weiter.

8.2 Mögliche Auslöser

Bei Mikrocontrollern werden Interrupts z.B. ausgelöst wenn:

- sich der an einem bestimmten Eingangs-Pin anliegende Wert von High auf Low ändert (oder umgekehrt)
- eine vorher festgelegte Zeitspanne abgelaufen ist ([Timer](#))
- eine serielle Übertragung abgeschlossen ist ([UART](#))
- ...

Der ATmega8 besitzt 18 verschiedene Interruptquellen. Standardmäßig sind diese alle deaktiviert und müssen über verschiedene IO-Register einzeln eingeschaltet werden.

8.3 INT0, INT1 und die zugehörigen Register

Wir wollen uns hier erst mal die beiden Interrupts **INT0** und **INT1** anschauen. **INT0** wird ausgelöst, wenn sich der an PD2 anliegende Wert ändert, **INT1** reagiert auf Änderungen an PD3.

Als erstes müssen wir die beiden Interrupts konfigurieren. Im Register **MCUCR** wird eingestellt, ob die Interrupts bei einer steigenden Flanke (low nach high) oder bei einer fallenden Flanke (high nach low) ausgelöst werden. Dafür gibt es in diesem Register die Bits **ISC00**, **ISC01** (betreffen **INT0**) und **ISC10** und **ISC11** (betreffen **INT1**).

Hier eine Übersicht über die möglichen Einstellungen und was sie bewirken:

ISCx1 ISCx0 Beschreibung

0	0	Low-Level am Pin löst den Interrupt aus
0	1	Jede Änderung am Pin löst den Interrupt aus
1	0	Eine fallende Flanke löst den Interrupt aus
1	1	Eine steigende Flanke löst den Interrupt aus

Danach müssen diese beiden Interrupts aktiviert werden, indem die Bits **INT0** und **INT1** im Register **GICR** auf **1** gesetzt werden.

Die Register **MCUCR** und **GICR** gehören zwar zu den IO-Registern, können aber nicht wie andere mit den Befehlen **cbi** und **sbi** verwendet werden. Diese Befehle wirken nur auf die IO-Register bis zur Adresse 0x1F (welches Register sich an welcher IO-Adresse befindet, steht in der Include-Datei, hier "m8def.inc", und im Datenblatt des Controllers). Somit bleiben zum Zugriff auf diese Register nur die Befehle **in** und **out** übrig.

8.4 Interrupts generell zulassen

Schließlich muss man noch das Ausführen von Interrupts allgemein aktivieren, was man durch einfaches Aufrufen des Assemblerbefehls **sei** bewerkstelligt.

8.5 Die Interruptvektoren

Woher weiß der Controller jetzt, welche Routine aufgerufen werden muss wenn ein Interrupt ausgelöst wird?

Wenn ein Interrupt auftritt, dann springt die Programmausführung an eine bestimmte Stelle im Programmspeicher. Diese Stellen sind festgelegt und können nicht geändert werden:

Nr.	Adresse	Interruptname	Beschreibung
1	0x000	RESET	Reset bzw. Einschalten der Stromversorgung
2	0x001	INT0	Externer Interrupt 0
3	0x002	INT1	Externer Interrupt 1
4	0x003	TIMER2 COMP	Timer/Counter2 Compare Match
5	0x004	TIMER2 OVF	Timer/Counter2 Overflow
6	0x005	TIMER1 CAPT	Timer/Counter1 Capture Event
7	0x006	TIMER1 COMPA	Timer/Counter1 Compare Match A
8	0x007	TIMER1 COMPB	Timer/Counter1 Compare Match B
9	0x008	TIMER1 OVF	Timer/Counter1 Overflow
10	0x009	TIMER0 OVF	Timer/Counter0 Overflow
11	0x00A	SPI, STC	SPI-Übertragung abgeschlossen
12	0x00B	USART, RX	USART-Empfang abgeschlossen
13	0x00C	USART, UDRE	USART-Datenregister leer
14	0x00D	USART, TX	USART-Sendung abgeschlossen
15	0x00E	ADC	AD-Wandlung abgeschlossen
16	0x00F	EE_RDY	EEPROM bereit
17	0x010	ANA_COMP	Analogkomperator
18	0x011	TWI	Two-Wire Interface
19	0x012	SPM_RDY	Store Program Memory Ready

So, wir wissen jetzt, dass der Controller zu Adresse 0x001 springt, wenn **INT0** auftritt. Aber dort ist ja nur Platz für einen Befehl, denn die nächste Adresse ist doch für INT1 reserviert? Ganz einfach: Dort kommt ein Sprungbefehl rein, z.B. **rjmp interrupt0**. Irgendwo anders im Programm muss in diesem Fall eine Stelle mit *interrupt0*: gekennzeichnet sein, an die dann gesprungen wird. Diese durch den Interrupt aufgerufene Routine nennt man **Interrupthandler** (engl. Interrupt Service Routine, **ISR**).

8.6 Beenden eines Interrupthandlers

Und wie wird die Interruptroutine wieder beendet? Durch den Befehl **reti**. Wird dieser aufgerufen, dann wird das Programm ganz normal dort fortgesetzt, wo es durch den Interrupt unterbrochen wurde. Es ist dabei wichtig, daß hier der Befehl **reti** und nicht ein normaler **ret** benutzt wird. Wird ein Interrupt Handler betreten, so sperrt der Mikrokontroller automatisch alle weiteren Interrupts. Im Unterschied zu **ret**, hebt ein **reti** diese Sperre wieder auf.

8.7 Aufbau der Interruptvektortabelle

Jetzt müssen wir dem Assembler nur noch klarmachen, dass er unser **rjmp interrupt0** an die richtige Stelle im Programmspeicher schreibt, nämlich an den Interruptvektor für **INT0**. Dazu gibt es die Assemblerdirektive. Durch **.org 0x001** sagt man dem Assembler, dass er die darauffolgenden Befehle ab Adresse 0x001 im Programmspeicher platzieren soll. Diese Stelle wird von **INT0** angesprungen.

Damit man nicht alle Interruptvektoren immer nachschlagen muss, sind in der Definitionsdatei *m8def.inc* einfach zu merkende Namen für die Adressen definiert. Statt 0x001 kann man z.B. einfach **INT0addr** schreiben. Das hat außerdem den Vorteil, dass man bei Portierung des Programms auf einen anderen AVR-Mikrocontroller nur die passende Definitionsdatei einbinden muss, und sich über evtl. geänderte Adressen für die Interruptvektoren keine Gedanken zu machen braucht.

Nun gibt es nur noch ein Problem: Beim Reset (bzw. wenn die Spannung eingeschaltet wird) wird das Programm immer ab der Adresse 0x000 gestartet. Deswegen muss an diese Stelle ein Sprungbefehl zum Hauptprogramm erfolgen, z.B. **rjmp RESET** um an die mit **RESET**: markierte Stelle zu springen.

Wenn man mehrere Interrupts verwenden möchte, kann man auch, anstatt jeden Interruptvektor einzeln mit **.org** an die richtige Stelle zu rücken, die gesamte Sprungtabelle ausschreiben:

```
.include "m8def.inc"

.org 0x000                ; kommt ganz an den Anfang des Speichers
rjmp RESET              ; Interruptvektoren überspringen
                        ; und zum Hauptprogramm

rjmp EXT_INT0           ; IRQ0 Handler
rjmp EXT_INT1           ; IRQ1 Handler
rjmp TIM2_COMP
rjmp TIM2_OVF
rjmp TIM1_CAPT         ; Timer1 Capture Handler
rjmp TIM1_COMPA        ; Timer1 CompareA Handler
rjmp TIM1_COMPB        ; Timer1 CompareB Handler
rjmp TIM1_OVF          ; Timer1 Overflow Handler
rjmp TIM0_OVF          ; Timer0 Overflow Handler
rjmp SPI_STC           ; SPI Transfer Complete Handler
```

```

rjmp USART_RXC      ; USART RX Complete Handler
rjmp USART_DRE      ; UDR Empty Handler
rjmp USART_TXC      ; USART TX Complete Handler
rjmp ADC             ; ADC Conversion Complete Interrupt Handler
rjmp EE_RDY         ; EEPROM Ready Handler
rjmp ANA_COMP       ; Analog Comparator Handler
rjmp TWSI           ; Two-wire Serial Interface Handler
rjmp SPM_RDY        ; Store Program Memory Ready Handler

```

```
RESET:                ; hier beginnt das Hauptprogramm
```

Hier ist es unbedingt nötig, bei unbenutzten Interruptvektoren statt des Sprungbefehls den Befehl **reti** reinschreiben. Wenn man einen Vektor einfach weglässt stehen die nachfolgenden Sprungbefehle sonst alle an der falschen Adresse im Speicher.

Wer auf Nummer sicher gehen möchte kann aber auch alle Vektoren einzeln mit `.org` adressieren:

```

#include "m8def.inc"

.org 0x000
    rjmp RESET
.org INT0addr      ; External Interrupt0 Vector Address
    reti
.org INT1addr      ; External Interrupt1 Vector Address
    reti
.org OC2addr       ; Output Compare2 Interrupt Vector Address
    reti
.org OVF2addr      ; Overflow2 Interrupt Vector Address
    reti
.org ICPladdr      ; Input Capture1 Interrupt Vector Address
    reti
.org OC1Aaddr      ; Output Compare1A Interrupt Vector Address
    reti
.org OC1Baddr      ; Output Compare1B Interrupt Vector Address
    reti
.org OVF1addr      ; Overflow1 Interrupt Vector Address
    reti
.org OVF0addr      ; Overflow0 Interrupt Vector Address
    reti
.org SPIaddr       ; SPI Interrupt Vector Address
    reti
.org URXCaddr      ; USART Receive Complete Interrupt Vector Address
    reti
.org UDREaddr      ; USART Data Register Empty Interrupt Vector
                    ; Address
    reti
.org UTXCaddr      ; USART Transmit Complete Interrupt Vector
                    ; Address
    reti
.org ADCCaddr      ; ADC Interrupt Vector Address
    reti
.org ERDYaddr      ; EEPROM Interrupt Vector Address
    reti
.org ACIaddr       ; Analog Comparator Interrupt Vector Address
    reti
.org TWIaddr       ; Irq. vector address for Two-Wire Interface
    reti
.org SPMaddr       ; SPM complete Interrupt Vector Address
    reti
.org SPMRaddr      ; SPM complete Interrupt Vector Address
    reti

.org INT_VECTORS_SIZE

```

```
RESET:                ; hier beginnt das Hauptprogramm
```

Statt die unbenutzten Interruptvektoren mit **reti** zu füllen könnte man sie hier auch einfach weglassen, da die **.org**-Direktive dafür sorgt dass jeder Vektor in jedem Fall am richtigen Ort im Speicher landet.

8.8 Beispiel

So könnte ein Minimal-Assemblerprogramm aussehen, das die Interrupts INT0 und INT1 verwendet:

[Download extinttest.asm](#)

```
.include "m8def.inc"

.def temp = r16

.org 0x000
    rjmp main                ; Reset Handler
.org INT0addr
    rjmp int0_handler        ; IRQ0 Handler
.org INT1addr
    rjmp int1_handler        ; IRQ1 Handler

main:                        ; hier beginnt das Hauptprogramm

    ldi temp, LOW(RAMEND)
    out SPL, temp
    ldi temp, HIGH(RAMEND)
    out SPH, temp

    ldi temp, 0x00
    out DDRD, temp

    ldi temp, 0xFF
    out DDRB, temp

    ldi temp, 0b00001010    ; INT0 und INT1 konfigurieren
    out MCUCR, temp

    ldi temp, 0b11000000    ; INT0 und INT1 aktivieren
    out GICR, temp

    sei                    ; Interrupts allgemein aktivieren

loop:    rjmp loop          ; eine leere Endlosschleife

int0_handler:
    sbi PORTB, 0
    reti

int1_handler:
    cbi PORTB, 0
    reti
```

Für dieses Programm braucht man nichts weiter als eine LED an PB0 und je einen Taster an PD2 (INT0) und PD3 (INT1). Wie diese angeschlossen werden, steht in [Teil 2](#) des Tutorials.

Die Funktion ist auch nicht schwer zu verstehen: Drückt man eine Taste, wird der dazugehörige Interrupt aufgerufen und die LED an- oder abgeschaltet. Das ist zwar nicht sonderlich spektakulär, aber das Prinzip sollte deutlich werden.

Meistens macht es keinen Sinn, Taster direkt an einen Interrupteingang anzuschließen. Das kann bisweilen sogar sehr schlecht sein, siehe [Entprellung](#). Häufiger werden Interrupts in Zusammenhang mit dem UART verwendet, um z.B. auf ein empfangenes Zeichen zu reagieren. Wie das funktioniert, wird im Kapitel über den [UART](#) beschrieben.

8.9 Besonderheiten des Interrupthandlers

Der Interrupthandler kann ja mehr oder weniger zu jedem beliebigen Zeitpunkt unabhängig vom restlichen Programm aufgerufen werden. Dabei soll das restliche Programm auf keinen Fall durch den Interrupthandler negativ beeinflusst werden, das heißt das Hauptprogramm soll nach dem Beenden des Handlers weiterlaufen als wäre nichts passiert. Insbesondere muss deshalb darauf geachtet werden, dass im Interrupthandler Register, die vom Programmierer nicht ausschließlich nur für den Interrupthandler reserviert wurden, auf dem Stack gesichert und zum Schluss wieder hergestellt werden müssen.

Ein Register das gerne übersehen wird ist das **Status Register**. In ihm merkt sich der Prozessor bestimmte Zustände von Berechnungen, z. B. ob ein arithmetischer Überlauf stattgefunden hat, ob das letzte Rechenergebnis 0 war, etc. Sobald ein Interrupthandler etwas komplizierter wird als im obigen Beispiel, tut man gut daran, das **SREG** Register auf jeden Fall zu sichern. Ansonsten kann das Hinzufügen von weiterem Code zum Interrupthandler schnell zum Boomerang werden: Die dann möglicherweise notwendige Sicherung des **SREG** Registers wird vergessen. Überhaupt empfiehlt es sich, in diesen Dingen bei der Programmierung eines Interrupthandlers eher vorausschauend, übervorsichtig und konservativ zu programmieren. Wird dies getan, so vergeudet man höchstens ein bisschen Rechenzeit. Im anderen Fall handelt man sich allerdings einen Super-GAU ein: Man steht dann vor einem Programm, das sporadisch nicht funktioniert und keiner weiss warum. Solche Fehler sind nur sehr schwer und oft nur mit einem Quäntchen Glück zu finden.

Im Beispiel wäre zwar das Sichern und Wiederherstellen der Register **temp** und **SREG** nicht wirklich notwendig, aber hier soll die grundsätzliche Vorgehensweise gezeigt werden:

```
.include "m8def.inc"

.def temp = r16

.org 0x000
    rjmp main           ; Reset Handler
.org INT0addr
    rjmp int0_handler  ; IRQ0 Handler
.org INT1addr
    rjmp int1_handler  ; IRQ1 Handler

main:                    ; hier beginnt das Hauptprogramm

    ldi temp, LOW(RAMEND)
    out SPL, temp
    ldi temp, HIGH(RAMEND)
    out SPH, temp

    ldi temp, 0x00
```

```
out DDRD, temp

ldi temp, 0xFF
out DDRB, temp

ldi temp, 0b00001010 ; INT0 und INT1 konfigurieren
out MCUCR, temp

ldi temp, 0b11000000 ; INT0 und INT1 aktivieren
out GICR, temp

sei ; Interrupts allgemein aktivieren

loop: rjmp loop ; eine leere Endlosschleife

int0_handler:
push temp ; Das SREG in temp sichern. Vorher
in temp, SREG ; muss natürlich temp gesichert werden

sbi PORTB, 0

out SREG, temp ; Die Register SREG und temp wieder
pop temp ; herstellen
reti

int1_handler:
push temp ; Das SREG in temp sichern. Vorher
in temp, SREG ; muss natürlich temp gesichert werden

cbi PORTB, 0

out SREG, temp ; Die Register SREG und temp wieder
pop temp ; herstellen
reti
```

9 AVR-Tutorial: Vergleiche

Vergleiche und Entscheidungen sind in jeder Programmiersprache ein zentrales Mittel um den Programmfluss abhängig von Bedingungen zu kontrollieren. In einem AVR spielen dazu 3 Komponenten zusammen:

- Vergleichsbefehle
- die Flags im Statusregister
- bedingte Sprungbefehle

Der Zusammenhang ist dabei folgender: Die Vergleichsbefehle führen einen Vergleich durch, zum Beispiel zwischen zwei Registern oder zwischen einem Register und einer Konstante. Das Ergebnis des Vergleiches wird in den Flags abgelegt. Die bedingten Sprungbefehle werten die Flags aus und führen bei einem positiven Ergebnis den Sprung aus. Besonders der erste Satzteil ist wichtig! Den bedingten Sprungbefehlen ist es nämlich völlig egal, ob die Flags über Vergleichsbefehle oder über sonstige Befehle gesetzt wurden. Die Sprungbefehle werten einfach nur die Flags aus, wie auch immer diese zu ihrem Zustand kommen.

9.1 Flags

Die Flags residieren im Statusregister **SREG**. Ihre Aufgabe ist es, das Auftreten bestimmter Ereignisse, die während Berechnungen eintreten können festzuhalten.

I	T	H	S	V	N	Z	C

9.1.1 Carry (C)

Das Carry Flag zeigt an, ob ein Überlauf oder Unterlauf bei einer 8-Bit Berechnung statt gefunden hat (Addition, Subtraktion). Ebenso ist es ein Zwischenspeicher bei Schiebe- und Rotationsoperationen.

9.1.2 Zero (Z)

Das Zero Flag hält fest, ob das Ergebnis der letzten 8-Bit Berechnung 0 war oder nicht.

9.1.3 Negative (N)

Spiegelt den Zustand des höchstwertigen Bits der letzten 8-Bit Berechnung wieder. In 2-Komplement Arithmetik bedeutet ein gesetztes 7. Bit eine negative Zahl, daher der Name.

9.1.4 Overflow (V)

Dieses Bit wird gesetzt, wenn bei einer Berechnung mit 2-Komplement Arithmetik ein Überlauf (Unterlauf) stattgefunden hat. Dies entspricht einem Überlauf von Bit 6 ins Bit 7

9.1.5 Signed (S)

Das Signed Bit ist eine Verknüpfung aus dem N und dem V Flag. Es wird hauptsächlich für 'Signed'

Tests benötigt. Daher auch der Name.

9.1.6 Half Carry (H)

Das Half Carry Flag hat die gleiche Aufgabe wie das Carry Flag, nur beschäftigt es sich mit einem Überlauf von Bit 3 nach Bit 4. Das Haupteinsatzgebiet ist der Bereich der BCD Arithmetik.

9.1.7 Transfer (T)

Das T-Flag wird von keiner Berechnung gesetzt, sondern steht zur ausschliesslichen Verwendung des Programmierers zur Verfügung. Damit können Bits von einer Stelle schnell an eine andere kopiert oder getestet werden.

9.1.8 Interrupt (I)

Das Interrupt Flag hat ebenfalls nichts mit Vergleichen zu tun, sondern steuert ob Interrupts systemweit zugelassen sind (siehe [AVR-Tutorial: Interrupts](#)).

9.2 Vergleiche

Um einen Vergleich durchzuführen, wird intern eine Subtraktion der beiden Operanden durchgeführt. Das eigentliche Ergebnis der Subtraktion wird allerdings verworfen, es bleibt nur die neue Belegung der Flags übrig, die in weiterer Folge ausgewertet werden kann

9.2.1 CP - Compare

Vergleicht den Inhalt zweier Register miteinander. Prozessorintern wird dabei eine Subtraktion der beiden Register durchgeführt. Das eigentliche Subtraktionsergebnis wird allerdings verworfen, das Subtraktionsergebnis beeinflusst lediglich die Flags.

9.2.2 CPC - Compare with Carry

Vergleicht den Inhalt zweier Register, wobei das Carry Flag in den Vergleich mit einbezogen wird. Dieser Befehl wird für Arithmetik mit grossen Variablen (16/32 Bit) benötigt. Siehe [AVR-Tutorial: Arithmetik](#).

9.2.3 CPI - Compare Immediate

Vergleicht den Inhalt eines Registers mit einer direkt angegebenen Konstanten. Der Befehl ist nur auf die Register r16..r31 anwendbar.

9.3 Bedingte Sprünge

Die bedingten Sprünge werten immer bestimmte Flags im Statusregister **SREG** aus. Es spielt dabei keine Rolle, ob dies nach einem Vergleichsbefehl oder einem sonstigen Befehl gemacht wird. Entscheidend ist einzig und alleine der Zustand des abgefragten Flags. Die Namen der Sprungbefehle wurden allerdings so gewählt, daß sich im Befehlsnamen die Beziehung der Operanden direkt nach einem Compare Befehl widerspiegelt. Zu beachten ist auch, daß die Flags nicht nur durch Vergleichsbefehle verändert werden, sondern auch durch arithmetische Operationen, Schiebepfehle und logische [Verknüpfungen](#). Da diese Information wichtig ist, ist auch in der bei Atmel erhältlichen [Übersicht über alle Assemblerbefehle](#) bei jedem Befehl angegeben, ob und wie er Flags beeinflusst. Ebenso ist dort eine kompakte Übersicht aller bedingten Sprünge zu finden. Beachten muss man jedoch, dass die bedingten Sprünge maximal 64 Worte weit springen können.

9.3.1 Bedingte Sprünge für vorzeichenlose Zahlen

9.3.1.1 BRSH - Branch if Same or Higher

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Carry Flag (C)** nicht gesetzt ist. Wird dieser Branch direkt nach einer **CP, CPI, SUB** oder **SUBI** Operation eingesetzt, so findet der Sprung dann statt, wenn der erste Operand größer oder gleich dem zweiten Operanden ist.

9.3.1.2 BRLO - Branch if Lower

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Carry Flag (C)** gesetzt ist. Wird dieser Branch direkt nach einer **CP, CPI, SUB** oder **SUBI** Operation eingesetzt, so findet der Sprung dann statt, wenn der erste Operand kleiner dem zweiten Operanden ist.

9.3.2 Bedingte Sprünge für vorzeichenbehaftete Zahlen

9.3.2.1 BRGE - Branch if Greater or Equal

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Signed Flag (S)** nicht gesetzt ist. Wird dieser Branch direkt nach einer **CP, CPI, SUB** oder **SUBI** eingesetzt, so findet der Sprung dann und nur dann statt, wenn der zweite Operand größer oder gleich dem ersten Operanden ist.

9.3.2.2 BRLT - Branch if Less Than

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Signed Flag (S)** gesetzt ist. Wird dieser Branch direkt nach einer **CP, CPI, SUB** oder **SUBI** Operation eingesetzt, so findet der Sprung dann und nur dann statt, wenn der zweite Operand kleiner als der erste Operand ist.

9.3.2.3 BRMI - Branch if Minus

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Negativ Flag (N)** gesetzt ist, das Ergebnis der letzten Operation also negativ war.

9.3.2.4 BRPL - Branch if Plus

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Negativ Flag (N)** nicht gesetzt ist, das Ergebnis der letzten Operation also positiv war (einschliesslich Null).

9.3.3 Sonstige bedingte Sprünge

9.3.3.1 BREQ - Branch if Equal

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Zero Flag (Z)** gesetzt ist. Ist nach einem Vergleich das Zero Flag gesetzt, lieferte die interne Subtraktion also 0, so waren beide Operanden gleich.

9.3.3.2 BRNE - Branch if Not Equal

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Zero Flag (Z)** nicht gesetzt ist. Ist nach einem Vergleich das Zero Flag nicht gesetzt, lieferte die interne Subtraktion also nicht 0, so waren beide Operanden verschieden.

9.3.3.3 BRCC - Branch if Carry Flag is Cleared

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Carry Flag (C)** nicht gesetzt ist. Dieser Befehl wird oft für Arithmetik mit grossen Variablen (16/32 Bit) bzw. im Zusammenhang mit Schiebeoperationen verwendet.

9.3.3.4 BRCS - Branch if Carry Flag is Set

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Carry Flag (C)** gesetzt ist. Die Verwendung ist sehr ähnlich zu BRCC.

9.3.4 Selten verwendete bedingte Sprünge

9.3.4.1 BRHC - Branch if Half Carry Flag is Cleared

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Half Carry Flag (H)** nicht gesetzt ist.

9.3.4.2 BRHS - Branch if Half Carry Flag is Set

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Half Carry Flag (H)** gesetzt ist.

9.3.4.3 BRID - Branch if Global Interrupt is Disabled (Cleared)

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Interrupt Flag (I)** nicht gesetzt ist.

9.3.4.4 BRIS - Branch if Global Interrupt is Enabled (Set)

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Interrupt Flag (I)** gesetzt ist.

9.3.4.5 BRTC - Branch if T Flag is Cleared

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **(T)** nicht gesetzt ist.

9.3.4.6 BRTS - Branch if T Flag is Set

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **(T)** gesetzt ist.

9.3.4.7 BRVC - Branch if Overflow Cleared

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Overflow Flag (V)** nicht gesetzt ist.

9.3.4.8 BRVS - Branch if Overflow Set

Der Sprung wird durchgeführt, wenn das **Overflow Flag (V)** gesetzt ist.

9.4 Beispiele

9.4.1 Entscheidungen

In jedem Programm kommt früher oder später das Problem, die Ausführung von Codeteilen von irgendwelchen Zahlenwerten, die sich in anderen Registern befinden abhängig zu machen. Sieht beispielweise die Aufgabe vor, daß Register r18 auf 0 gesetzt werden soll, wenn im Register r17 der Zahlenwert 25 enthalten ist, dann lautet der Code

```

    cpi    r17, 25      ; vergleiche r17 mit der Konstante 25
    brne  nicht_gleich ; wenn nicht gleich, dann mach bei
                          ; nicht_gleich weiter
    ldi    r18, 0      ; hier stehen nun Anweisungen für den Fall
                          ; dass R17 gleich 25 ist
    rjmp  weiter      ; meist will man den anderen Zweig nicht
                          ; durchlaufen, darum der Sprung

nicht_gleich:
    ldi    r18, 123    ; hier stehen nun Anweisungen für den Fall
                          ; dass R17 ungleich 25 ist
weiter:
                          ; hier geht das Programm weiter

```

In ähnlicher Weise können die anderen bedingten Sprungbefehle eingesetzt werden, um die üblicherweise vorkommenden Vergleiche auf Gleichheit, Ungleichheit, Größer, Kleiner zu realisieren.

9.4.2 Schleifenkonstrukte

Ein immer wiederkehrendes Muster in der Programmierung ist eine **Schleife**. Die einfachste Form einer Schleife ist die **Zählschleife**. Dabei wird ein Register von einem Startwert ausgehend eine gewisse Anzahl erhöht, bis ein Endwert erreicht wird.

```

    ldi    r17, 10     ; der Startwert sei in diesem Beispiel 10
loop:
                          ; an dieser Stelle stehen die Befehle, welche
                          ; innerhalb der Schleife mehrfach ausgeführt werden
                          ; sollen

```

```

inc    r17          ; erhöhe das Zaehlregister
cpi    r17, 134     ; mit dem Endwert vergleichen
brne   loop        ; und wenn der Endwert noch nicht erricht ist
                          ; wird bei der Marke loop ein weiterer
                          ; Schleifendurchlauf ausgeführt

```

Sehr oft ist es auch möglich das Konstrukt umzudrehen. Anstatt von einem Startwert aus zu inkrementieren genügt es die Anzahl der gewünschten Schleifendurchläufe in ein Register zu laden und dieses Register zu dekrementieren. Dabei kann man von der Eigenschaft der Dekrementieranweisung gebrauch machen, das **Zero Flag (Z)** zu beeinflussen. Ist das Ergebnis des Dekrements 0, so wird das **Zero Flag (Z)** gesetzt, welches wiederum in der nachfolgenden **BRNE** Anweisung für einen bedingen Sprung benutzt werden kann. Das vereinfacht die Schleife und spart eine Anweisung sowie einen Takt Ausführungszeit.

```

ldi    r17, 124     ; Die Anzahl der Wiederholungen in ein Register
                          ; laden
loop:
                          ; an dieser Stelle stehen die Befehle, welche
                          ; innerhalb der Schleife mehrfach ausgeführt werden
                          ; sollen

dec    r17          ; Schleifenzähler um 1 verringern, dabei wird das
                          ; Zero Flag beeinflusst
brne   loop        ; wenn r17 noch nicht 0 geworden ist
                          ; -> Schleife wiederholen

```

10 AVR-Tutorial: Mehrfachverzweigung

10.1 Einleitung

Oft ist es in einem Programm notwendig, eine Variable auf mehrere Werte zu prüfen und abhängig vom Ergebniss verschiedene Aktionen auszulösen. Diese Konstruktion nennt man Mehrfachverzweigung. In einem Struktogramm sieht das so aus.

Prüfe X					
X=1	X=17	X=33	X=9	X=22	sonst

In C gibt es direkt dafür eine Konstruktion namens **switch**.

```
switch (variable) {
  case 1:      // Anweisungen für diesen Zeig, wenn variable == 1
    break;
  case 17:    // Anweisungen für diesen Zeig, wenn variable == 17
    break;
  case 33:    // Anweisungen für diesen Zeig, wenn variable == 33
    break;
  case 9:     // Anweisungen für diesen Zeig, wenn variable == 9
    break;
  case 22:    // Anweisungen für diesen Zeig, wenn variable == 22
    break;
  default:    // Anweisungen wenn keine der oben definierten Bedingungen
              // erfüllt ist
    break;
}
```

In Assembler muss man so etwas "zu Fuß" programmieren. Die verschiedenen Lösungen sollen hier betrachtet werden.

10.2 Einfacher Ansatz

Im einfachsten Fall verwendet man eine lange Kette von **cpi** und **brq** Befehlen. Für jeden Zweig benötigt man zwei Befehle.

```
; Mehrfachverzweigung Version A

; Einfacher Ansatz, mit vielen CPI

start_vergleich:

    cpi    r16,1
    brne  zweig_0

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig r16=1

    rjmp  ende_vergleich
```

```
zweig_0:
    cpi    r16,17
    brne   zweig_1

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig r16=17

    rjmp   ende_vergleich
zweig_1:
    cpi    r16,33
    brne   zweig_2

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig r16=33

    rjmp   ende_vergleich
zweig_2:
    cpi    r16,9
    brne   zweig_3

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig r16=9

    rjmp   ende_vergleich
zweig_3:
    cpi    r16,22
    brne   kein_Treffer

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig r16=22

    rjmp   ende_vergleich
kein_Treffer:

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für den Fall, dass keiner der Vergleiche
erfolgreich war

ende_vergleich:

    rjmp   ende_vergleich          ; nur für Simulationszwecke! ENTFERNEN!
```

Eigenschaften

- Programmspeicherbedarf: 6*N Bytes (N = Anzahl der Zweige)

Vorteile

- leicht verständlich
- Es können beliebige Vergleichswerte geprüft werden

Nachteile

- relativ hoher Programmspeicherbedarf
- die Größe der Zweige ist stark begrenzt, weil der Befehl **brq** maximal 63 Worte weit springen kann!
- die einzelnen Zweige haben unterschiedliche Durchlaufzeiten, der letzte Zweig ist am langsamsten
- nur bedingt übersichtlicher Quellcode

10.3 Sprungtabelle

Oft liegen die einzelnen Vergleichswerte nebeneinander (z.B. 7..15), z.B. bei der Übergabe von Parametern, Zustandsautomaten, Menüeinträgen etc. . In so einem Fall kann man mittels einer **Sprungtabelle** das Programm verkürzen, beschleunigen und übersichtlicher gestalten.

```
.include "m8def.inc"

; Mehrfachverzweigung Version B

; Clevere Version mit Sprungtabelle
; minimum und maximum sind auf 0..255 begrenzt!

.equ minimum = 3
.equ maximum = 7

start_vergleich:

    subi    r16,minimum           ; Nullpunkt verschieben
    cpi     r16,(maximum-minimum+1) ; Index auf Maximum prüfen
    brsh   kein_Treffer         ; Index zu gross -> Fehler
    ldi     ZL,low(Sprungtabelle) ; Tabellenzeiger laden, 16 Bit
    ldi     ZH,high(Sprungtabelle)
    add    ZL,r16                ; Index addieren, 16 Bit
    ldi     r16,0
    adc    ZH,r16
    ijmp                    ; indirekter Sprung in Sprungtabelle

kein_treffer:

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für den Fall, dass keiner der Vergleiche
erfolgreich war

    rjmp   ende_vergleich

Sprungtabelle:
    rjmp   zweig_0
    rjmp   zweig_1
    rjmp   zweig_2
    rjmp   zweig_3
    rjmp   zweig_4

zweig_0:

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig

    rjmp   ende_vergleich

zweig_1:

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig

    rjmp   ende_vergleich

zweig_2:

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig

    rjmp   ende_vergleich

zweig_3:
```

```
; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig
    rjmp     ende_vergleich
zweig_4:
; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig
    rjmp     ende_vergleich
ende_vergleich:
; hier geht das Programm weiter
    rjmp     ende_vergleich           ; nur für Simulationszwecke! ENTFERNEN!
```

Programmbeschreibung

Wie ist dieses Programm nun zu verstehen? Das Prinzip beruht darauf, daß in einer gleichmässigen Tabelle Sprungbefehle auf einzelne Programmzweige abgelegt werden. Das ist praktisch genauso wie der AVR [Interrupts](#) verarbeitet. Über einen Index (0...N) wird ein Sprungbefehl ausgewählt und ausgeführt. Der entscheidende Befehl dazu ist **ijmp**.

Zunächst muss der Wertebereich, auf welchen die Variable geprüft werden soll (minimum bis maximum), normiert werden (0 bis (Maximum-Minimum)). Dazu wird einfach das Minimum subtrahiert.

```
subi    r16,minimum                ; Nullpunkt verschieben
```

Danach muss geprüft werden, ob der maximale Index nicht überschritten wird. Denn ein Sprung auf nichtexistierende Einträge oberhalb der Sprungtabelle wäre fatal!

```
cpi     r16,(maximum-minimum+1)    ; Index auf Maximum prüfen
brsh    kein_Treffer               ; Index zu gross -> Fehler
```

Danach muss der indirekte Sprung vorbereitet werden. Dazu wird die Adresse der Sprungtabelle in das Z-Register geladen, welches ein 16 Bit Register ist und gleichbedeutend mit r30 und r31.

```
ldi     ZL,low(Sprungtabelle)      ; Tabellenzeiger laden, 16 Bit
ldi     ZH,high(Sprungtabelle)
```

Danach muss der Index addiert werden, dies ist eine 16-Bit Addition.

```
add     ZL,r16                      ; Index addieren, 16 Bit
ldi     r16,0
adc     ZH,r16
```

Zu guter Letzt wird der indirekte Sprung in die Sprungtabelle ausgeführt.

```
ijmp                                ; indirekter Sprung in Sprungtabelle
```

In der Sprungtabelle wird dann zum jeweiligen Zweig verzweigt.

Sprungtabelle:

```
rjmp    zweig_0
rjmp    zweig_1
rjmp    zweig_2
rjmp    zweig_3
rjmp    zweig_4
```

Der Zweig für einen ungültigen Index folgt direkt nach dem **ijmp**, weil der Befehl **brsh** nur maximal 63 Worte weit springen kann.

Eigenschaften

- Programmspeicherbedarf: $2*N + 18$ Bytes (N = Anzahl der Zweige)
- maximale Gesamtgröße der Zweige wird durch den Befehl `rjmp` begrenzt (± 4 KB). Das sollte aber nur in sehr wenigen Fällen ein Problem sein (Man wird kaum einen AVR mit 8 kB FLASH mit einer einzigen Mehrfachverzweigung füllen!)

Vorteile

- relativ niedriger Programmspeicherbedarf
- die einzelnen Zweige haben unabhängig von der Grösse der Sprungtabelle eine konstante und kurze Durchlaufzeit von 12 Takten.
- übersichtlicher Quellcode

Nachteile

- Die Vergleichswerte müssen lückenlos aufeinander folgen

10.4 Lange Sprungtabelle

Wenn man doch mal eine GIGA-Mehrfachverzweigung braucht, dann hilft die Version C.

```
.include "m16def.inc"

; Mehrfachverzweigung Version C

; Clevere Version mit langer Sprungtabelle
; funktioniert nur mit AVRs mit mehr als 8KB FLASH
; minimum und maximum sind auf 0..127 begrenzt!

.equ minimum = 3
.equ maximum = 7

start_vergleich:

    subi    r16,minimum                ; Nullpunkt verschieben
    cpi     r16,(maximum-minimum+1)    ; Index auf Maximum prüfen
    brsh   kein_Treffer                ; Index zu gross -> Fehler
    ldi     ZL,low(Sprungtabelle*2)    ; Tabellenzeiger laden, 16 Bit
    ldi     ZH,high(Sprungtabelle*2)   ;
    lsl     r16                          ; Index mit 2 multiplizieren
    add     z1,r16                       ; Index addieren, 16 Bit
    ldi     r16,0
    adc     zh,r16
    lpm     r16,Z+                       ; Low Byte laden und Pointer erhöhen
```

10 AVR-Tutorial: Mehrfachverzweigung

```
lpm      ZH,Z           ; zweites Byte laden
mov      ZL,r16         ; erstes Byte in Z-Pointer kopieren
ijmp     ; indirekter Sprung
```

kein_treffer:

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für den Fall, dass keiner der Vergleiche erfolgreich war

```
jmp      ende_vergleich
```

Sprungtabelle:

```
.dw zweig_0
.dw zweig_1
.dw zweig_2
.dw zweig_3
.dw zweig_4
```

zweig_0:

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig

```
jmp      ende_vergleich
```

zweig_1:

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig

```
jmp      ende_vergleich
```

zweig_2:

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig

```
jmp      ende_vergleich
```

zweig_3:

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig

```
jmp      ende_vergleich
```

zweig_4:

; hier stehen jetzt alle Anweisungen für diesen Zweig

ende_vergleich:

; hier geht das Programm weiter

```
jmp      ende_vergleich           ; nur für Simulationszwecke! ENTFERNEN!
```

Programmbeschreibung

Diese Version ist der Version B sehr ähnlich. Der Unterschied besteht darin, daß in Version B die Sprungtabelle mit Sprungbefehlen gefüllt ist (rjmp) während in Version C die Startadressen der Funktionen ablegt sind. D.H. man kann nicht in die Sprungtabelle springen, sondern muss sich mit Hilfe des Index die richtige Adresse aus der Sprungtabelle lesen und mit **ijmp** anspringen. Klingt sehr ähnlich, ist aber dennoch verschieden.

Die ersten drei Befehle sind identisch, es wird der Index normiert und auf das Maximum geprüft.

```
subi    r16,minimum           ; Nullpunkt verschieben
cpi     r16,(maximum-minimum+1) ; Index auf Maximum prüfen
brsh    kein_Treffer          ; Index zu gross -> Fehler
```

Die nächsten zwei Befehle laden wieder die Anfangsadresse der Sprungtabelle. Doch halt, hier wird die Adresse der Sprungtabelle mit zwei multipliziert. Des Rätsels Lösung gibt es weiter unten.

```
ldi     ZL,low(Sprungtabelle*2) ; Tabellenzeiger laden, 16 Bit
ldi     ZH,high(Sprungtabelle*2)
```

Der Index wird ebenfalls mit zwei multipliziert.

```
lsl     r16                    ; Index mit 2 multiplizieren
```

Danach erfolgt eine 16-Bit Addition.

```
add     z1,r16                 ; Index addieren, 16 Bit
ldi     r16,0
adc     zh,r16
```

Nun zeigt unser Z-Zeiger auf den richtigen Tabelleneintrag. Jetzt müssen zwei Bytes aus dem FLASH geladen werden. Das geschieht mit Hilfe des **lpm**-Befehls (**L**oad **P**rogram **M**emory). Hier wird die erweiterte Version des lpm-Befehls verwendet, wie sie nur auf grösseren AVR's verfügbar ist. Dabei wird ein Byte in Register r16 geladen und gleichzeitig der Z-Pointer um eins erhöht. Damit zeigt er wunderbar auf das nächste Byte, welches auch geladen werden muss.

```
lpm     r16,Z+                 ; Low Byte laden und Zeiger erhöhen
```

Der zweite lpm-Befehl ist etwas ungewöhnlich, denn er überschreibt einen Teil des Z-Pointers! In den meisten Programmen wäre das ein Schuss ins Knie (Programmierfehler!), da wir aber den Z-Pointer danach sowieso mit neuen Daten laden ist das OK.

```
lpm     ZH,Z                   ; zweites Byte laden
```

Das zuerst gelesene Byte wird in den Z-Pointer kopiert. Nun steht die Startadresse des gewählten Zweigs im Z-Pointer.

```
mov     ZL,r16                 ; erstes Byte in Z-zeiger kopieren
```

Zu guter Letzt wird der indirekte Sprung ausgeführt und bringt uns direkt in den Programmzweig.

```
ijmp                                ; indirekter Sprung direkt in den
                                       ; Programmzweig
```

Der Zweig für einen ungültigen Index folgt direkt nach dem **ijmp**, weil der Befehl **brsh** nur maximal 63 Worte weit springen kann.

Eigenschaften

- Programmspeicherbedarf: $2*N + 26$ Bytes (N = Anzahl der Zweige)
- unbegrenzte Sprungweite

Vorteile

- relativ niedriger Programmspeicherbedarf
- die einzelnen Zweige haben unabhängig von der Grösse der Sprungtabelle eine konstante und kurze Durchlaufzeit von 18 Takten
- übersichtlicher Quellcode

Nachteile

- Die Vergleichswerte müssen lückenlos aufeinander folgen
- geringfügig höherer Programmspeicherbedarf (8 Byte mehr) und grössere Durchlaufzeit (6 Takte mehr) als Version B

10.5 Z-Pointer leicht verständlich

Auf den ersten Blick scheint es sonderbar, daß Version B die Adresse der Sprungtabelle direkt lädt, während Version C sowohl Anfangsadresse als auch Index mit zwei multipliziert. Warum ist das so?

Version B verwendet nur den Befehl **ijmp**. Dieser erwartet im Z-Register eine Adresse zur Programmausführung, eine **Wort-Adresse**. Da der Programmspeicher des AVR 16 Bit breit ist (=1 Wort = 2 Bytes), werden nur Worte adressiert, nicht jedoch Bytes! Genauso arbeitet der Assembler. Jedes Label entspricht einer Wort-Adresse. Damit kann man mit einer 12 Bit-Adresse 4096 Worte adressieren (=8192 Bytes). Wenn man sich die Befehle der einzelnen AVRs anschaut wird klar, daß alle AVRs mit 8KB und weniger FLASH nur die Befehle rjmp und rcall besitzen. Denn sie brauchen nicht mehr! Mit 12 Adressbits, welche direkt in einem Wort im Befehl rjmp bzw. rcall kodiert sind, kann der gesamte Programmspeicher erreicht werden. Größere AVRs besitzen call und jmp, dort ist die Adresse als 22 bzw. 16 Bit Zahl kodiert, deshalb brauchen diese Befehle auch 2 Worte Programmspeicher.

Der Befehl **lpm** dient zum Laden einzelner Bytes aus dem Programmspeicher. Das ist vor allem für Tabellen mit konstanten Werten sehr nützlich (7-Segmentdekoder, Zeichensätze, Kennlinien, Parameter Texte, etc.) Doch wie kommt man nun in dem wortweise adressierten Programmspeicher an einzelne Bytes? Ganz einfach. Der AVR "mogelt" hier und erwartet im Z-Register eine **Byte-Adresse**. Von dieser Adresse bilden die Bits 15..1 die Wortadresse, welche zur Adressierung des Programmspeichers verwendet wird. Bit 0 entscheidet dann, ob das hoch- oder niederwertige Byte in das Zielregister kopiert werden soll (0=niederwertiges Byte; 1=höherwertiges Byte).

Darum muss bei Verwendung des Befehls lpm die Anfangsadresse immer mit zwei multipliziert werden.

```
ldi    ZL,low(Sprungtabelle*2)    ; Tabellenzeiger laden, 16 Bit
ldi    ZH,high(Sprungtabelle*2)
```

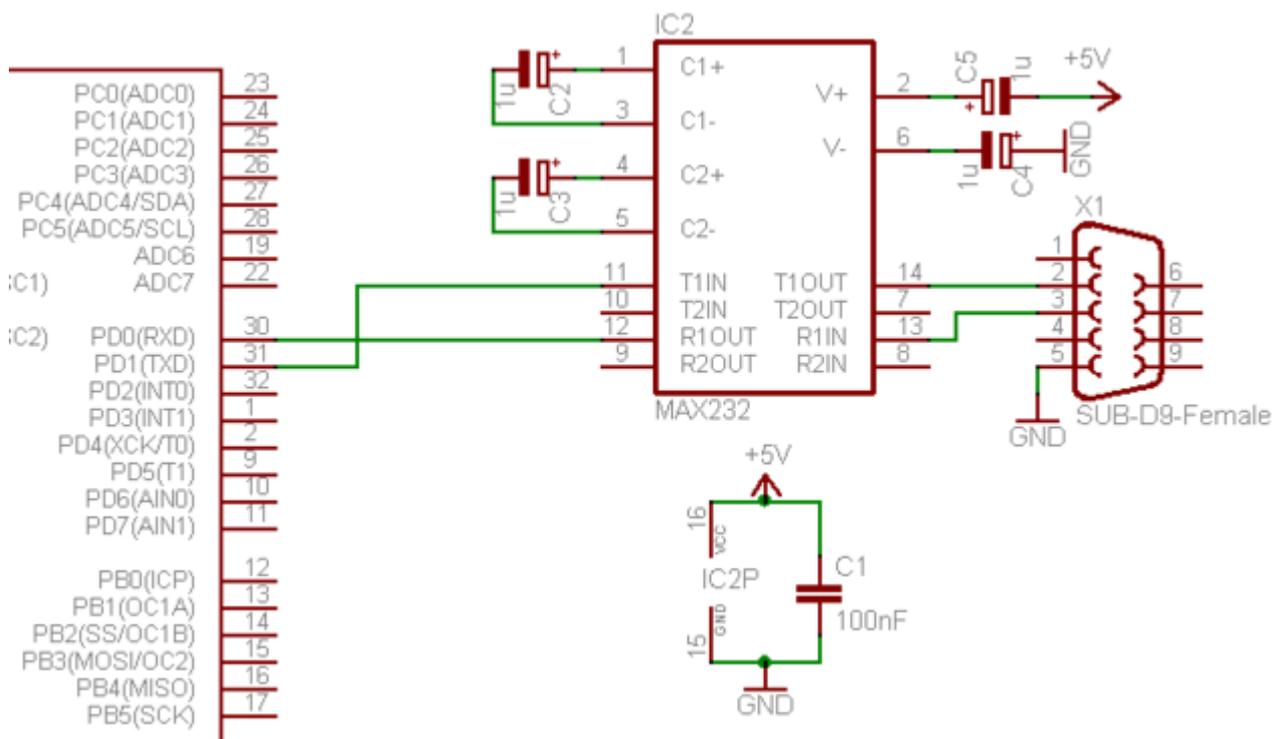
In Version C muss zusätzlich der Index mit zwei multipliziert werden, weil jeder Tabelleneintrag (Adresse des Programmzweigs) ein Wort breit ist. Damit wird aus einem Index von 0,1,2,3,4 ein Offset von 0,2,4,6,8.

11 AVR-Tutorial: UART

Wie viele andere Controller besitzen die meisten AVR's einen **UART** (**U**niversal **A**synchronous **R**eceiver and **T**ransmitter). Das ist eine serielle Schnittstelle, die meistens zur Datenübertragung zwischen Mikrocontroller und PC genutzt wird. Zur Übertragung werden zwei Pins am Controller benötigt: **TXD** und **RXD**. Über **TXD** ("Transmit Data") werden Daten gesendet, **RXD** ("Receive Data") dient zum Empfang von Daten.

11.1 Hardware

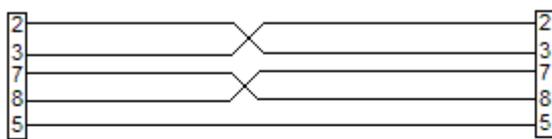
Um den UART des Mikrocontrollers zu verwenden, muss der Versuchsaufbau um folgende Bauteile erweitert werden:



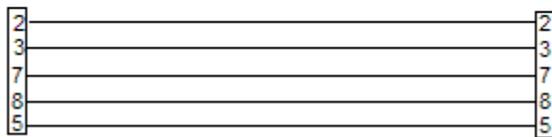
Auf dem Board vom [Shop](#) sind diese Bauteile bereits enthalten, man muss nur noch die Verbindungen zwischen MAX232 und AVR herstellen wie im [Bild](#) zu sehen.

- Der MAX232 ist ein [Pegelwandler](#), der die -12V/+12V Signale an der seriellen Schnittstelle des PCs zu den 5V/0V des AVR's kompatibel macht.
- C1 ist ein kleiner Keramikkondensator, wie er immer wieder zur Entkopplung der Versorgungsspannungen an digitalen ICs verwendet wird.
- Die vier Kondensatoren C2..C5 sind Elektrolytkondensatoren (Elkos). Auf die richtige Polung achten! Minus ist der Strich auf dem Gehäuse. Der exakte Wert ist hier relativ unkritisch, in der Praxis sollte alles von ca. 1 μ F bis 47 μ F mit einer Spannungsfestigkeit von 16V und höher funktionieren.
- X1 ist ein weiblicher 9-poliger SUB-D-Verbinder.

- Die Verbindung zwischen PC und Mikrocontroller erfolgt über ein 9-poliges Modem-Kabel (nicht Nullmodem-Kabel!), das an den seriellen Port des PCs angeschlossen wird. Bei einem Modem-Kabel sind die Pins 2 und 3 des einen Kabelendes mit den Pins 2 und 3 des anderen Kabelendes durchverbunden. Bei einem Nullmodem Kabel sind die Leitungen gekreuzt, sodass Pin 2 von der einen Seite mit Pin 3 auf der anderen Seite verbunden ist und umgekehrt.
- Als Faustregel kann man annehmen: Befinden sich an den beiden Enden des Kabels die gleiche Art von Anschlüssen (Männchen = Stecker; Weibchen = Buchse), dann benötigt man ein gekreuztes Kabel, also ein Nullmodem-Kabel. Am PC-Anschluss selbst befindet sich ein Stecker, also ein Männchen, sodaß am Kabel auf dieser Seite eine Buchse (also ein Weibchen) sitzen muss. Da am AVR laut obigem Schaltbild eine Buchse (also ein Weibchen) verbaut wird, muss daher an diesem Ende des Kabels ein Stecker sitzen. Das Kabel hat daher an einem Ende einen Stecker und am anderen Ende eine Buchse und ist daher ein normales Modem-Kabel (= nicht gekreuzt).



Nullmodem Kabel



Modem Kabel

11.2 Software

11.2.1 UART konfigurieren

Als erstes muss die gewünschte Baudrate im Register **UBRR** festgelegt werden. Der in dieses Register zu schreibende Wert errechnet sich nach der folgenden Formel:

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

Beim AT90S4433 kann man den Wert direkt in das Register **UBRR** laden, beim ATmega8 gibt es für **UBRR** zwei Register: **UBRRL** (Low-Byte) und **UBRRH** (High-Byte). Im Normalfall steht in **UBRRH** 0, da der berechnete Wert kleiner als 256 ist und somit in **UBRRL** alleine passt. Beachtet werden muss, dass das Register **UBRRH** vor dem Register **UBRRL** beschrieben werden muss. Der Schreibzugriff auf **UBRRL** löst das Neusetzen des internen Taktteilers aus.

WICHTIGER HINWEIS!

Auf Grund permanent wiederkehrender Nachfrage sei hier **AUSDRÜCKLICH** darauf hingewiesen, dass bei Verwendung des UART im asynchronen Modus dringend ein Quarz oder Quarzoszillator verwendet werden sollte! Der interne RC-Oszillator der AVRs ist recht ungenau! Damit kann es in Ausnahmefällen funktionieren, muss es aber nicht! Auch ist der interne Oszillator temperaturempfindlich. Damit hat man dann den schönen Effekt, dass eine UART-Schaltung die im Winter noch funktionierte, im Sommer den Dienst verweigert.

Außerdem muss bei der Berechnung von **UBRR** geprüft werden, ob mit der verwendeten Taktfrequenz die gewünschte Baudrate mit einem Fehler von <1% generiert werden kann. Das Datenblatt bietet hier sowohl die Formel als auch Tabellen unter der Überschrift des U(S)ART an.

$$Fehler_{Baudrate} [\%] = \left(\frac{UBRR_{gerundet} + 1}{UBRR_{genau} + 1} - 1 \right) \cdot 100$$

Siehe auch [Baudratenquarz](#)

Wer es ganz einfach haben will, nimmt die folgenden Macros. Die rechnen sogar den Fehler aus und brechen die Assemblierung ggf. ab. Das ist dann praktisch idiotensicher.

```
.equ F_CPU = 4000000           ; Systemtakt in Hz
.equ BAUD = 9600             ; Baudrate

; Berechnungen
.equ UBRR_VAL = ((F_CPU+BAUD*8)/(BAUD*16)-1) ; clever runden
.equ BAUD_REAL = (F_CPU/(16*(UBRR_VAL+1))) ; Reale Baudrate
.equ BAUD_ERROR = ((BAUD_REAL*1000)/BAUD-1000) ; Fehler in Promille

.if ((BAUD_ERROR>10) || (BAUD_ERROR<-10)) ; max. +/-10 Promille Fehler
.error "Systematischer Fehler der Baudrate grösser 1 Prozent und damit zu hoch!"
.endif
```

Wer dennoch den internen RC-Oszillator verwenden will, muss diesen kalibrieren. Näheres findet man dazu im Datenblatt, Stichwort Register OSCCAL.

Um den Sendekanal des UART zu aktivieren, muss das Bit **TXEN** im UART Control Register **UCSRB** auf 1 gesetzt werden.

Danach kann das zu sendende Byte in das Register **UDR** eingeschrieben werden - vorher muss jedoch sichergestellt werden, dass das Register leer ist, die vorhergehende Übertragung also schon abgeschlossen wurde. Dazu wird getestet, ob das Bit **UDRE** ("UART Data Register Empty") im Register **UCSRA** auf 1 ist.

Genauer über die UART-Register findet man im Datenblatt des Controllers.

Der ATmega8 bietet noch viele weitere Optionen zur Konfiguration des UARTs, aber für die Datenübertragung zum PC sind im Normalfall keine anderen Einstellungen notwendig.

11.2.2 Senden von Zeichen

Das Beispielprogramm überträgt die Zeichenkette "Test!" in einer Endlosschleife an den PC. Die folgenden Beispiele sind für den ATmega8 geschrieben.

```
.include "m8def.inc"

.def temp      = r16                ; Register für kleinere
                                   ; Arbeiten
.def zeichen = r17                ; in diesem Register wird das
                                   ; Zeichen an die
                                   ; Ausgabefunktion übergeben

.equ F_CPU = 4000000              ; Systemtakt in Hz
.equ BAUD = 9600                  ; Baudrate

; Berechnungen
.equ UBRR_VAL = ((F_CPU+BAUD*8)/(BAUD*16)-1) ; clever runden
.equ BAUD_REAL = (F_CPU/(16*(UBRR_VAL+1))) ; Reale Baudrate
.equ BAUD_ERROR = ((BAUD_REAL*1000)/BAUD-1000) ; Fehler in Promille

.if ((BAUD_ERROR>10) || (BAUD_ERROR<-10)) ; max. +/-10 Promille Fehler
.error "Systematischer Fehler der Baudrate grösser 1 Prozent und damit zu
hoch!"
.endif

; Stackpointer initialisieren

ldi    temp, LOW(RAMEND)
out    SPL, temp
ldi    temp, HIGH(RAMEND)
out    SPH, temp

; Baudrate einstellen

ldi    temp, HIGH(UBRR_VAL)
out    UBRRH, temp
ldi    temp, LOW(UBRR_VAL)
out    UBRR_L, temp

; Frame-Format: 8 Bit

ldi    temp, (1<<URSEL) | (3<<UCSZ0)
out    UCSRC, temp

sbi    UCSRB, TXEN                ; TX aktivieren

loop:
ldi    zeichen, 'T'
rcall  serout                      ; Unterprogramm aufrufen
ldi    zeichen, 'e'
rcall  serout                      ; Unterprogramm aufrufen
ldi    zeichen, 's'
rcall  serout                      ; ...
ldi    zeichen, 't'
rcall  serout
ldi    zeichen, '!'
rcall  serout
ldi    zeichen, 10
rcall  serout
ldi    zeichen, 13
rcall  serout
rjmp   loop
```

```

serout:
    sbis    UCSRA, UDRE                ; Warten bis UDR für das nächste
                                        ; Byte bereit ist
    rjmp   serout
    out    UDR, zeichen
    ret                                ; zurück zum Hauptprogramm

```

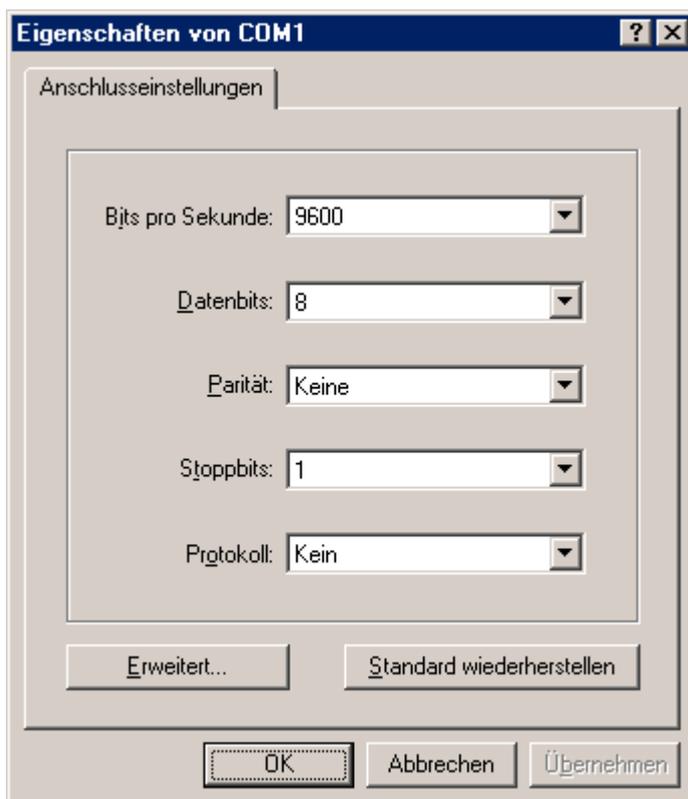
Der Befehl **rcall serout** ruft ein kleines Unterprogramm auf, das zuerst wartet bis das Datenregister **UDR** von der vorhergehenden Übertragung frei ist, und anschließend das in zeichen (=r17) gespeicherte Byte an **UDR** ausgibt.

Bevor *serout* aufgerufen wird, wird zeichen jedesmal mit dem ASCII-Code des zu übertragenden Zeichens geladen (so wie in Teil 4 bei der LCD-Ansteuerung). Der Assembler wandelt Zeichen in einfachen Anführungsstrichen automatisch in den entsprechenden ASCII-Wert um. Nach dem Wort "Test!" werden noch die Codes 10 (New Line) und 13 (Carriage Return) gesendet, um dem Terminalprogramm mitzuteilen, dass eine neue Zeile beginnt.

Eine Übersicht aller ASCII-Codes gibt es auf www.asciitable.com.

Die Berechnung der Baudrate wird übrigens nicht im Controller während der Programmausführung durchgeführt, sondern schon beim Assemblieren, wie man beim Betrachten der Listingdatei feststellen kann.

Zum Empfang muss auf dem PC ein Terminal-Programm wie z.B. HyperTerminal gestartet werden. Der folgende Screenshot zeigt, welche Einstellungen im Programm vorgenommen werden müssen:



Linux-Benutzer können das entsprechende Device (z.B. /dev/ttyS0) mit `stty` konfigurieren und mit `cat` die empfangenen Daten anzeigen oder ein Terminalprogramm wie `minicom` nutzen.

11.2.3 Senden von Zeichenketten

Eine bequemere Methode um längere Zeichenketten (Strings) zu übertragen ist hier zu sehen. Dabei werden die Zeichenketten im Flash gespeichert. Als Abschluss des Strings wird der Wert 0x00 genutzt, so wie auch in der Programmiersprache C.

```
.include "m8def.inc"

.def temp      = r16                ; Register für kleinere
                                   ; Arbeiten
.def zeichen = r17                ; in diesem Register wird das
                                   ; Zeichen an die
                                   ; Ausgabefunktion übergeben

.equ F_CPU = 4000000                ; Systemtakt in Hz
.equ BAUD = 9600                    ; Baudrate

; Berechnungen
.equ UBRR_VAL = ((F_CPU+BAUD*8)/(BAUD*16)-1) ; clever runden
.equ BAUD_REAL = (F_CPU/(16*(UBRR_VAL+1))) ; Reale Baudrate
.equ BAUD_ERROR = ((BAUD_REAL*1000)/BAUD-1000) ; Fehler in Promille

.if ((BAUD_ERROR>10) || (BAUD_ERROR<-10)) ; max. +/-10 Promille Fehler
.error "Systematischer Fehler der Baudrate grösser 1 Prozent und damit zu
hoch!"
.endif

; hier geht unser Programm los

    ; Stackpointer initialisieren

    ldi    temp, LOW(RAMEND)
    out    SPL, temp
    ldi    temp, HIGH(RAMEND)
    out    SPH, temp

    ; Baudrate einstellen

    ldi    temp, HIGH(UBRR_VAL)
    out    UBRRH, temp
    ldi    temp, LOW(UBRR_VAL)
    out    UBRRL, temp

    ; Frame-Format: 8 Bit

    ldi    temp, (1<<URSEL) | (3<<UCSZ0)
    out    UCSRC, temp

    sbi    UCSRB, TXEN                ; TX aktivieren

loop:
    ldi    z1, low(my_string*2);        ; Z Pointer laden
    ldi    zh, high(my_string*2);
    rcall  serout_string
    rjmp   loop

; Ausgabe eines Strings aus dem Flash

serout_string:
    lpm                ; nächstes Byte aus dem Flash laden
    and    r0, r0      ; = Null?
    breq   serout_string_ende ; wenn ja, -> Ende
```

```

serout_string_wait:
    sbis    UCSRA,UDRE                ; Warten bis UDR für das nächste
                                        ; Byte bereit ist

    rjmp   serout_string_wait
    out    UDR, r0
    adiw   zl:zh,1                    ; Zeiger erhöhen
    rjmp   serout_string             ; nächstes Zeichen bearbeiten
serout_string_ende:
    ret                                ; zurück zum Hauptprogramm

; Hier wird jetzt der String definiert und im Flash gespeichert

my_string:  .db "Test!",10,13,0

```

11.2.4 Empfangen von Zeichen per Polling

Der AVR kann nicht nur Daten seriell senden, sondern auch empfangen. Dazu muss man, nachdem die Baudrate wie oben beschrieben eingestellt wurde, das Bit **RXEN** setzen.

Sobald der UART ein Byte über die serielle Verbindung empfangen hat, wird das Bit **RXC** im Register **UCSRA** gesetzt, um anzuzeigen, dass ein Byte im Register **UDR** zur Weiterverarbeitung bereitsteht. Sobald es aus **UDR** gelesen wurde, wird **RXC** automatisch wieder gelöscht, bis das nächste Byte angekommen ist.

Das erste einfache Testprogramm soll das empfangene Byte auf den an Port D angeschlossenen LEDs ausgeben. Dabei sollte man daran denken, dass PD0 (RXD) bereits für die Datenübertragung zuständig ist, so dass das entsprechende Bit im Register PORTD keine Funktion hat und damit auch nicht für die Datenanzeige verwendet werden kann.

Nachdem der UART konfiguriert ist, wartet das Programm einfach in der Hauptschleife darauf, dass ein Byte über den UART ankommt (z.B. indem man im Terminalprogramm ein Zeichen eingibt), also **RXC** gesetzt wird. Sobald das passiert, wird das Register **UDR**, in dem die empfangenen Daten stehen, nach *temp* eingelesen und an den Port D ausgegeben.

```

#include "m8def.inc"

.def temp = R16

.equ F_CPU = 4000000                ; Systemtakt in Hz
.equ BAUD = 9600                    ; Baudrate

; Berechnungen
.equ UBRR_VAL = ((F_CPU+BAUD*8)/(BAUD*16)-1) ; clever runden
.equ BAUD_REAL = (F_CPU/(16*(UBRR_VAL+1)))   ; Reale Baudrate
.equ BAUD_ERROR = ((BAUD_REAL*1000)/BAUD-1000) ; Fehler in Promille

.if ((BAUD_ERROR>10) || (BAUD_ERROR<-10))    ; max. +/-10 Promille Fehler
.error "Systematischer Fehler der Baudrate grösser 1 Prozent und damit zu hoch!"
.endif

; Stackpointer initialisieren

ldi    temp, LOW(RAMEND)
out    SPL, temp
ldi    temp, HIGH(RAMEND)

```

```

out    SPH, temp

; Port D = Ausgang

ldi    temp, 0xFF
out    DDRD, temp

; Baudrate einstellen

ldi    temp, HIGH(UBRR_VAL)
out    UBRRH, temp
ldi    temp, LOW(UBRR_VAL)
out    UBRRL, temp

; Frame-Format: 8 Bit

ldi    temp, (1<<URSEL) | (3<<UCSZ0)
out    UCSRC, temp

sbi    UCSRB, RXEN                ; RX (Empfang) aktivieren

receive_loop:
sbis   UCSRA, RXC                ; warten bis ein Byte angekommen
                                           ; ist

rjmp   receive_loop
in     temp, UDR                 ; empfangenes Byte nach temp
                                           ; kopieren

out    PORTD, temp              ; und an Port D ausgeben.
rjmp   receive_loop            ; zurück zum Hauptprogramm

```

11.2.5 Empfangen von Zeichen per Interrupt

Dieses Programm lässt sich allerdings noch verfeinern. Statt in der Hauptschleife auf die Daten zu warten, kann man auch veranlassen dass ein Interrupt ausgelöst wird, sobald ein Byte angekommen ist. Das sieht in der einfachsten Form so aus:

```

.include "m8def.inc"

.def temp = R16

.equ F_CPU = 4000000                ; Systemtakt in Hz
.equ BAUD = 9600                    ; Baudrate

; Berechnungen
.equ UBRR_VAL = ((F_CPU+BAUD*8)/(BAUD*16)-1) ; clever runden
.equ BAUD_REAL = (F_CPU/(16*(UBRR_VAL+1))) ; Reale Baudrate
.equ BAUD_ERROR = ((BAUD_REAL*1000)/BAUD-1000) ; Fehler in Promille

.if ((BAUD_ERROR>10) || (BAUD_ERROR<-10)) ; max. +/-10 Promille Fehler
.error "Systematischer Fehler der Baudrate grösser 1 Prozent und damit zu hoch!"
.endif

.org 0x00
    rjmp main

.org URXCaddr                        ; Interruptvektor für

```

```

                                ; UART-Empfang
    rjmp int_rxc

; Hauptprogramm

main:

    ; Stackpointer initialisieren

    ldi    temp, LOW(RAMEND)
    out    SPL, temp
    ldi    temp, HIGH(RAMEND)
    out    SPH, temp

    ; Port D = Ausgang

    ldi    temp, 0xFF
    out    DDRD, temp

    ; Baudrate einstellen

    ldi    temp, HIGH(UBRR_VAL)
    out    UBRRH, temp
    ldi    temp, LOW(UBRR_VAL)
    out    UBRRL, temp

    ; Frame-Format: 8 Bit

    ldi    temp, (1<<URSEL) | (3<<UCSZ0)
    out    UCSRC, temp

    sbi    UCSRB, RXCIE           ; Interrupt bei Empfang
    sbi    UCSRB, RXEN           ; RX (Empfang) aktivieren

    sei                                ; Interrupts global aktivieren

loop:
    rjmp loop                    ; Endlosschleife

; Interruptroutine: wird ausgeführt sobald ein Byte über das UART empfangen
; wurde

int_rxc:
    push   temp                 ; temp auf dem Stack sichern
    in     temp, UDR             ; empfangendes Byte lesen,
                                ; dadurch wird auch der Interrupt
                                ; gelöscht
    out    PORTD, temp          ; Daten ausgeben
    pop    temp                 ; temp wiederherstellen
    reti                        ; Interrupt beenden

```

Diese Methode hat den großen Vorteil, dass das Hauptprogramm (hier nur eine leere Endlosschleife) andere Dinge erledigen kann, während der Controller Daten empfängt. Auf diese Weise kann man mehrere Aktionen quasi gleichzeitig ausführen, da das Hauptprogramm nur kurz unterbrochen wird, um die empfangenen Daten zu verarbeiten.

Probleme können allerdings auftreten, wenn in der Interruptroutine die gleichen Register verwendet werden wie im Hauptprogramm, da dieses ja an beliebigen Stellen durch den Interrupt unterbrochen werden kann. Damit sich aus der Sicht der Hauptschleife durch den Interruptaufruf nichts ändert, müssen alle in der Interruptroutine geänderten Register am Anfang der Routine gesichert und am Ende wiederhergestellt werden. Das gilt vor allem für das CPU-Statusregister (**SREG**)! Sobald ein einziger Befehl im Interrupt ein einziges Bit im SREG beeinflusst, muss das SREG gesichert werden. Das ist praktisch fast immer der Fall, nur in dem ganz einfachen Beispiel oben ist es überflüssig, weil die verwendeten Befehle das SREG nicht beeinflussen. In diesem Zusammenhang wird der **Stack** wieder interessant. Um die Register zu sichern, kann man sie mit **push** oben auf den Stapel legen und am Ende wieder in der umgekehrten Reihenfolge(!) mit **pop** vom Stapel herunternehmen.

Im folgenden Beispielprogramm werden die empfangenen Daten nun nicht mehr komplett angezeigt. Stattdessen kann man durch Eingabe einer 1 oder einer 0 im Terminalprogramm eine LED (an PB0) an- oder ausschalten. Dazu wird das empfangene Byte in der Interruptroutine mit den entsprechenden ASCII-Codes der Zeichen 1 und 0 (siehe www.asciitable.com) verglichen.

Für den **Vergleich** eines Registers mit einer Konstanten gibt es den Befehl **cpi register, konstante**. Das Ergebnis dieses Vergleichs kann man mit den Befehlen **breq label** (springe zu label, wenn gleich) und **brne label** (springe zu label, wenn ungleich) auswerten.

```
.include "m8def.inc"

.def temp = R16

.equ F_CPU = 4000000           ; Systemtakt in Hz
.equ BAUD = 9600              ; Baudrate

; Berechnungen
.equ UBRR_VAL = ((F_CPU+BAUD*8)/(BAUD*16)-1) ; clever runden
.equ BAUD_REAL = (F_CPU/(16*(UBRR_VAL+1)))   ; Reale Baudrate
.equ BAUD_ERROR = ((BAUD_REAL*1000)/BAUD-1000) ; Fehler in Promille

.if ((BAUD_ERROR>10) || (BAUD_ERROR<-10))      ; max. +/-10 Promille Fehler
.error "Systematischer Fehler der Baudrate grösser 1 Prozent und damit zu
hoch!"
.endif

.org 0x00
    rjmp main

.org URXCaddr
    rjmp int_rxc

; Hauptprogramm
main:

    ; Stackpointer initialisieren

    ldi    temp, LOW(RAMEND)
    out    SPL, temp
    ldi    temp, HIGH(RAMEND)
    out    SPH, temp

    ; Port B = Ausgang

    ldi    temp, 0xFF
    out    DDRB, temp

    ; Baudrate einstellen
```

```

ldi    temp, HIGH(UBRR_VAL)
out    UBRRH, temp
ldi    temp, LOW(UBRR_VAL)
out    UBRRL, temp

; Frame-Format: 8 Bit

ldi    temp, (1<<URSEL) | (3<<UCSZ0)
out    UCSRC, temp

sbi    UCSRB, RXCIE           ; Interrupt bei Empfang
sbi    UCSRB, RXEN           ; RX (Empfang) aktivieren

sei    ; Interrupts global aktivieren

loop:
    rjmp loop                ; Endlosschleife

; Interruptroutine: wird ausgeführt sobald ein Byte über das UART empfangen
wurde

int_rxc:
    push    temp             ; temp auf dem Stack sichern
    in     temp, sreg        ; SREG sichern
    push    temp

    in     temp, UDR         ; UART Daten lesen
    cpi    temp, '1'        ; empfangenes Byte mit '1' vergleichen
    brne   int_rxc_1        ; wenn nicht gleich, dann zu int_rxc_1
    cbi    PORTB, 0         ; LED einschalten, low aktiv
    rjmp   int_rxc_2        ; Zu int_rxc_2 springen
int_rxc_1:
    cpi    temp, '0'        ; empfangenes Byte mit '0' vergleichen
    brne   int_rxc_2        ; wenn nicht gleich, dann zu int_rxc_2
    sbi    PORTB, 0         ; LED ausschalten, low aktiv
int_rxc_2:

    pop    temp
    out    sreg, temp       ; SREG wiederherstellen
    pop    temp             ; temp wiederherstellen
    reti

```

12 AVR-Tutorial: Speicher

12.1 Speichertypen

Die AVR-Mikrocontroller besitzen 3 verschiedene Arten von Speicher:

	Flash	EEPROM	RAM
Schreibzyklen	>10.000	>100.000	unbegrenzt
Lesezyklen	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt
flüchtig	nein	nein	ja
Größe beim ATtiny2313	2 KB	128 Byte	128 Byte
Größe beim ATmega8	8 KB	512 Byte	1 KB
Größe beim ATmega32	32 KB	1 KB	2 KB

12.1.1 Flash-ROM

Das **Flash-ROM** der AVRs dient als Programmspeicher. Über den Programmieradapter werden die kompilierten Programme vom PC an den Controller übertragen und im Flash-ROM abgelegt. Bei der Programmausführung wird das ROM **Wort** für Wort ausgelesen und ausgeführt. Es lässt sich aber auch zur Speicherung von Daten nutzen (z.B. Texte für ein **LCD**). Vom laufenden Programm aus kann man das ROM normalerweise nur lesen, nicht beschreiben. Es kann beliebig oft ausgelesen werden, aber theoretisch nur ~10.000 mal beschrieben werden.

12.1.2 EEPROM

Das **EEPROM** ist wie das Flash ein nichtflüchtiger Speicher, die Daten bleiben also auch nach dem Ausschalten der Betriebsspannung erhalten. Es kann beliebig oft gelesen und mindestens 100.000 mal beschrieben werden. Bei den AVRs kann man es z.B. als Speicher für Messwerte oder Einstellungen benutzen.

12.1.3 RAM

Das **RAM** ist ein flüchtiger Speicher, d.h. die Daten gehen nach dem Ausschalten verloren. Es kann beliebig oft gelesen und beschrieben werden, weshalb es sich zur Speicherung von Variablen eignet für die die Register R0-R31 nicht ausreichen. Daneben dient es als Speicherort für den Stack, auf dem z.B. bei Unterprogrammaufrufen (rcall) die Rücksprungadresse gespeichert wird (siehe [AVR-Tutorial: SRAM](#)).

12.2 Anwendung

12.2.1 Flash-ROM

Die erste und wichtigste Anwendung des Flash-ROMs kennen wir bereits: Das Speichern von Programmen, die wir nach dem Assemblieren dort hineingeladen haben. Nun sollen aber auch vom laufenden Programm aus Daten ausgelesen werden.

Um die Daten wieder auszulesen, muss man die Adresse, auf die zugegriffen werden soll, in den **Z-Pointer** laden. Der Z-Pointer besteht aus den Registern **R30** (Low-Byte) und **R31** (High-Byte), daher kann man das Laden einer Konstante wie gewohnt mit dem Befehl **ldi** durchführen. Statt R30 und R31 kann man übrigens einfach **ZL** und **ZH** schreiben, da diese Synonyme bereits in der include-Datei `m8def.inc` definiert sind.

Wenn die richtige Adresse erstmal im Z-Pointer steht, geht das eigentliche Laden der Daten ganz einfach mit dem Befehl **lpm**. Dieser Befehl, der im Gegensatz zu `out`, `ldi` usw. keine Operanden hat, veranlasst das Laden des durch den Z-Pointer adressierte Byte aus dem Programmspeicher in das Register **R0**, von wo aus man es weiterverarbeiten kann.

Jetzt muss man nur noch wissen, wie man dem Assembler überhaupt beibringt, dass er die von uns festgelegte Daten im ROM plazieren soll, und wie man dann an die Adresse kommt an der sich diese Daten befinden. Um den Programmspeicher mit Daten zu füllen, gibt es die Direktiven `.db` und `.dw`. In der Regel benötigt man nur `.db`, was folgendermaßen funktioniert:

```
daten:
    .db 12, 20, 255, 0xFF, 0b10010000
```

Direktiven wie `.db` sind Anweisungen an den Assembler, keine Prozessorbefehle. Von denen kann man sie durch den vorangestellten Punkt unterscheiden. In diesem Fall sagen wir dem Assembler, dass er die angegebenen Bytes nacheinander im Speicher platzieren soll; wenn man die Zeile also assembliert, erhält man eine Hex-Datei, die nur diese Daten enthält.

Aber was soll das **daten:** am Anfang der Zeile? Bis jetzt haben wir Labels nur als Sprungmarken verwendet, um den Befehlen **rcall** und **rjmp** zu sagen, an welche Stelle im Programm gesprungen werden soll. Würden wir in diesem Fall **rjmp daten** im Programm stehen haben, dann würde die Programmausführung zur Stelle **daten:** springen, und versuchen die sinnlosen Daten als Befehle zu interpretieren - was mit Sicherheit dazu führt, dass der Controller Amok läuft.

Statt nach **daten:** zu springen, sollten wir die Adresse besser in den Z-Pointer laden. Da der Z-Pointer aus zwei Bytes besteht, brauchen wir dazu zweimal den Befehl **ldi**:

```
ldi ZL, LOW(daten*2)    ; Low-Byte der Adresse in Z-Pointer
ldi ZH, HIGH(daten*2)  ; High-Byte der Adresse in Z-Pointer
```

Wie man sieht, ist das Ganze sehr einfach: Man kann die Labels im Assembler direkt wie Konstanten verwenden. Über die Multiplikation der Adresse mit zwei sollte man sich erst mal keine Gedanken machen: "Das ist einfach so." Wer es genauer wissen will schaut [hier](#) nach.

Um zu zeigen wie das alles konkret funktioniert, ist das folgende Beispiel nützlich:

```
.include "m8def.inc"

    ldi    R16, 0xFF
    out    DDRB, R16                ; Port B: Ausgang

    ldi    ZL, LOW(daten*2)        ; Low-Byte der Adresse in Z-Pointer
    ldi    ZH, HIGH(daten*2)      ; High-Byte der Adresse in Z-Pointer

    lpm                                ; durch Z-Pointer adressiertes Byte
                                ; in R0 laden
    out    PORTB, R0              ; an PORTB ausgeben

ende:
    rjmp  ende                    ; Endlosschleife

daten:
    .db  0b10101010
```

Wenn man dieses Programm assembliert und in den Controller überträgt, dann kann man auf den an Port B angeschlossenen LEDs das mit **.db 0b10101010** im Programmspeicher abgelegte Bitmuster sehen.

Eine häufige Anwendung von **lpm** ist das Auslesen von Zeichenketten ("Strings") aus dem Flash-ROM und die Ausgabe an den seriellen Port oder ein LCD. Das folgende Programm gibt in einer Endlosschleife den Text "AVR-Assembler ist ganz einfach", gefolgt von einem Zeilenumbruch, an den UART aus.

```
.include "m8def.inc"

.def  temp = r16
.def  temp1 = r17

.equ  CLOCK = 4000000                ; Frequenz des Quarzes
.equ  BAUD = 9600                    ; Baudrate
.equ  UBRRVAL = CLOCK / (BAUD*16) - 1 ; Baudratenteiler

; hier geht das Programmsegment los

.CSEG
.org  0
    ldi    r16, low(RAMEND)          ; Stackpointer initialisieren
    out    SPL, r16
    ldi    r16, high(RAMEND)
    out    SPH, r16

    ldi    temp, LOW(UBRRVAL)        ; Baudrate einstellen
    out    UBRRL, temp
    ldi    temp, HIGH(UBRRVAL)
    out    UBRRH, temp

    ldi    temp, (1<<URSEL) | (3<<UCSZ0) ; Frame-Format: 8 Bit
    out    UCSRC, temp
    sbi    UCSRB, TXEN              ; TX (Senden) aktivieren

loop:
    ldi    ZL, LOW(text*2)          ; Adresse des Strings in den
    ldi    ZH, HIGH(text*2)        ; Z-Pointer laden
    rcall  print                    ; Funktion print aufrufen
    rcall  wait                     ; kleine Pause
    rjmp  loop                      ; das Ganze wiederholen
```

```

; kleine Pause
wait:
    ldi    temp,0
wait_1:
    ldi    temp1,0
wait_2:
    dec    temp1
    brne   wait_2
    dec    temp
    brne   wait_1
    ret

; print: sendet die durch den Z-Pointer adressierte Zeichenkette

print:
    lpm                    ; Erstes Byte des Strings nach R0 lesen
    tst    R0              ; R0 auf 0 testen
    breq   print_end      ; wenn 0, dann zu print_end
    mov    r16, r0         ; Inhalt von R0 nach R16 kopieren
    rcall  sendbyte       ; UART-Sendefunktion aufrufen
    adiw   ZL, 1          ; Adresse des Z-Pointers um 1 erhöhen
    rjmp   print          ; wieder zum Anfang springen
print_end:
    ret

; sendbyte: sendet das Byte aus R16 über das UART

sendbyte:
    sbis   UCSRA, UDRE    ; warten bis das UART bereit ist
    rjmp   sendbyte
    out    UDR, r16
    ret

; Konstanten werden hier im Flash abgelegt

text:
    .db   "AVR-Assembler ist ganz einfach",10,13,0
    ; Stringkonstante, durch eine 0 abgeschlossen
    ; die 10 bzw. 13 sind Steuerzeichen für Wagenrücklauf und neue Zeile

```

Neuere AVR-Controller besitzen einen erweiterten Befehlssatz. Darunter befindet sich auch der folgende Befehl:

```
lpm    r16, Z+
```

Dieser Befehl liest ein Byte aus dem Flash und speichert es in einem beliebigen Register, hier r16. Danach wird der Zeiger Z um eins erhöht. Für die neuen Controller, wie ATmegas kann das Codebeispiel also so abgeändert werden:

```

; print: sendet die durch den Z-Pointer adressierte Zeichenkette
print:
    lpm    r16, Z+        ; Erstes Byte des Strings nach r16 lesen
    tst    r16           ; r16 auf 0 testen
    breq   print_end     ; wenn 0, dann zu print_end
    rcall  sendbyte     ; UART-Sendefunktion aufrufen
    rjmp   print        ; wieder zum Anfang springen
print_end:
    ret

```

Wenn man bei `.db` einen Text in doppelten Anführungszeichen angibt, werden die Zeichen automatisch in die entsprechenden ASCII-Codes umgerechnet:

```
.db    "Test", 0
; ist äquivalent zu
.db    84, 101, 115, 116, 0
```

Damit das Programm das Ende der Zeichenkette erkennen kann, wird eine 0 an den Text angehängt.

Das ist doch schonmal sehr viel praktischer, als jeden Buchstaben einzeln in ein Register zu laden und abzuschicken. Und wenn man statt **sendbyte** einfach die Routine **lcd_data** aus dem 4. Teil des Tutorials aufruft, dann funktioniert das gleiche sogar mit dem LCD!

12.2.1.1 Neue Assemblerbefehle

```
lpm                                ; Liest das durch den Z-Pointer
                                ; adressierte Byte aus dem Flash-ROM
                                ; in das Register R0 ein.

lpm    [Register], Z              ; Macht das gleiche wie lpm, jedoch in
                                ; ein beliebiges Register

lpm    [Register], Z+            ; Erhöht zusätzlich den Z-Zeiger

tst    [Register]                ; Prüft, ob Inhalt eines Registers
                                ; gleich 0 ist.

breq   [Label]                   ; Springt zu [Label], wenn der
                                ; vorhergehende Vergleich wahr ist.

adiw   [Register], [Konstante] ; Addiert eine Konstante zu einem
                                ; Registerpaar. [Register] bezeichnet das
                                ; untere der beiden Register.
                                ; Kann nur auf die Registerpaare
                                ; R25:R24, R27:R26, R29:R28 und R31:R30
                                ; angewendet werden.
```

12.2.2 EEPROM

12.2.2.1 Lesen

Als erstes muss geprüft werden, ob ein vorheriger Schreibzugriff schon abgeschlossen ist. Danach wird die EEPROM-Adresse von der gelesen werden soll in das IO-Registerpaar **EEARH/EEARL** (EEPROM Address Register) geladen. Da der ATmega8 mehr als 256 Byte EEPROM hat, passt die Adresse nicht in ein einziges 8-Bit-Register, sondern muss in zwei Register aufgeteilt werden: EEARH bekommt das obere Byte der Adresse, EEARL das untere Byte. Dann löst man den Lesevorgang durch das Setzen des Bits **EERE** (EEPROM Read Enable) im IO-Register **EEDR** (EEPROM Control Register) aus. Das gelesene Byte kann sofort aus dem IO-Register **EEDR** (EEPROM Data Register) in ein normales CPU-Register kopiert und dort weiterverarbeitet werden.

Wie auch das Flash-ROM kann man das EEPROM über den ISP-Programmer programmieren. Die Daten, die im EEPROM abgelegt werden sollen, werden wie gewohnt mit `.db` angegeben; allerdings muss man dem Assembler natürlich sagen, dass es sich hier um Daten für das EEPROM handelt. Das macht man durch die Direktive `.eseg`, woran der Assembler erkennt, dass alle nun folgenden Daten für das EEPROM bestimmt sind.

Damit man die Bytes nicht von Hand abzählen muss um die Adresse herauszufinden, kann man auch im EEPROM-Segment wieder Labels einsetzen und diese im Assemblerprogramm wie Konstanten verwenden.

```
.include "m8def.inc"

; hier geht die Programmsektion los
.cseg
.org 0

    ldi    r16, low(RAMEND)           ; Stackpointer initialisieren
    out    SPL, r16
    ldi    r16, high(RAMEND)
    out    SPH, r16

    ldi    r16, 0xFF
    out    DDRB, r16                 ; Port B Ausgang

    ldi    ZL, low(daten)            ; Z-Zeiger laden
    ldi    ZH, high(daten)
    rcall  EEPROM_read              ; Daten aus EEPROM lesen
    out    PORTB, r16

loop:
    rjmp  loop

EEPROM_read:
    sbic   EECR, EERE                ; prüfe ob der vorherige Schreibzugriff
                                    ; beendet ist
    rjmp  EEPROM_read              ; nein, nochmal prüfen

    out    EEARH, ZH                 ; Adresse laden
    out    EEARL, ZL
    sbi    EECR, EERE                ; Lesevorgang aktivieren
    in     r16, EEDR                 ; Daten in CPU Register kopieren
    ret

; Daten im EEPROM definieren
.eseg
daten:
```

```
.db 0b10101010
```

Wenn man dieses Programm assembliert, erhält man außer der .hex-Datei noch eine Datei mit der Endung .eep. Diese Datei enthält die Daten aus dem EEPROM-Segment (.eseg), und muss zusätzlich zu der hex-Datei in den Controller programmiert werden.

Das Programm gibt die Binärzahl 0b10101010 an den Port B aus, das heißt jetzt sollte jede zweite LED leuchten.

Natürlich kann man auch aus dem EEPROM Strings lesen und an den UART senden:

```
.include "m8def.inc"

.def temp = r16

.equ CLOCK = 4000000          ; Frequenz des Quarzes

.equ BAUD = 9600             ; Baudrate
.equ UBRRVAL = CLOCK/(BAUD*16)-1 ; Baudratenteiler

; hier geht das Programmsegment los

.CSEG

; Hauptprogramm
main:
    ldi    temp, LOW(RAMEND)      ; Stackpointer initialisieren
    out    SPL, temp
    ldi    temp, HIGH(RAMEND)
    out    SPH, temp

    ldi    temp, LOW(UBRRVAL)     ; Baudrate einstellen
    out    UBRRL, temp
    ldi    temp, HIGH(UBRRVAL)
    out    UBRRH, temp

    ldi    temp, (1<<URSEL)|(3<<UCSZ0) ; Frame-Format: 8 Bit
    out    UCSRC, temp
    sbi    UCSRB, TXEN           ; TX (Senden) aktivieren

    ldi    ZL, low(text1)        ; ersten String senden
    ldi    ZH, high(text1)       ; Z-Pointer laden
    rcall  EEPROM_print

    ldi    ZL, low(text2)        ; zweiten String senden
    ldi    ZH, high(text2)       ; Z-Pointer laden
    rcall  EEPROM_print

loop:
    rjmp   loop                  ; Endlosschleife

; EEPROM Lesezugriff auf Strings + UART Ausgabe
EEPROM_print:
    sbic   EECR, EWE             ; prüf ob der vorherige Schreibzugriff
                                ; beendet ist
    rjmp   EEPROM_print         ; nein, nochmal prüfen

    out    EEARH, ZH            ; Adresse laden
    out    EEARL, ZL

    sbi    EECR, EERE           ; Lesevorgang aktivieren
```

```

    in     temp, EEDR           ; Daten in CPU Register kopieren
    tst   temp                 ; auf 0 testen (=Stringende)
    breq  eep_print_end       ; falls 0, Funktion beenden
    rcall sendbyte            ; ansonsten Byte senden...
    adiw  ZL, 1                ; Adresse um 1 erhöhen...
    rjmp  EEPROM_print        ; und zum Anfang der Funktion
eep_print_end:
    ret

; sendbyte: sendet das Byte aus "data" über den UART

sendbyte:
    sbis  UCSRA, UDRE         ; warten bis das UART bereit ist
    rjmp  sendbyte
    out   UDR, temp
    ret

; hier wird der EEPROM-Inhalt definiert

.ESEG

text1:
    .db   "Strings funktionieren auch ", 0
text2:
    .db   "im EEPROM", 10, 13, 0

```

12.2.2.2 Schreiben

Als erstes muss geprüft werden, ob ein vorheriger Schreibzugriff schon abgeschlossen ist. Danach wird die EEPROM-Adresse, auf die geschrieben wird, in das IO-Register **EEAR** (**EEPROM Address Register**) geladen. Dann schreibt man die Daten, welche man auf der im Adressregister abgespeicherten Position ablegen will ins Register **EEDR** (**EEPROM Data Register**). Als nächstes setzt man das **EEMWE** Bit im EEPROM-Kontrollregister **ECCR** (**EEPROM Control Register**) um den Schreibvorgang vorzubereiten. Nun wird es zeitkritisch - es darf nun keinesfalls ein Interrupt dazwischenfahren - denn man muss innerhalb von 4 Taktzyklen das **EEWE** Bit setzen um den Schreibvorgang auszulösen. Um das unter allen Bedingungen sicherzustellen werden die Interrupts kurz gesperrt. Danach startet der Schreibvorgang und läuft automatisch ab. Wenn er beendet ist, wird von der Hardware das **EEWE** Bit im Register **ECCR** wieder gelöscht.

In diesem Beispiel werden Zeichen per UART und Interrupt empfangen und nacheinander im EEPROM gespeichert. Per Terminalprogramm kann man nun bis zu 512 Zeichen in den EEPROM schreiben. Per Programmieradapter kann man denn EEPROM wieder auslesen und seine gespeicherten Daten anschauen.

```

.include "m8def.inc"

.def temp      = r16
.def sreg_save = r17

.equ CLOCK = 4000000

.equ BAUD = 9600
.equ UBRRVAL = CLOCK / (BAUD*16) - 1

; hier geht das Programmsegment los

.CSEG
.org 0x00
    rjmp    main

.org URXCaddr
    rjmp    int_rxc

; Hauptprogramm
main:
    ldi     temp, LOW(RAMEND)           ; Stackpointer initialisieren
    out     SPL, temp
    ldi     temp, HIGH(RAMEND)
    out     SPH, temp

    ldi     temp, LOW(UBRRVAL)         ; Baudrate einstellen
    out     UBRRL, temp
    ldi     temp, HIGH(UBRRVAL)
    out     UBRRH, temp

    ldi     temp, (1<<URSEL) | (3<<UCSZ0) ; Frame-Format: 8 Bit
    out     UCSRC, temp

    sbi     UCSRB, RXCIE               ; Interrupt bei Empfang
    sbi     UCSRB, RXEN               ; RX (Empfang) aktivieren

    ldi     ZL, low(daten)             ; der Z-zeiger wird hier exklusiv
    ldi     ZH, high(daten)           ; für die Datenadressierung verwendet

    sei                               ; Interrupts global aktivieren

loop:
    rjmp    loop                       ; Endlosschleife (ABER Interrupts!)

; Interruptroutine wird ausgeführt,
; sobald ein Byte über den UART empfangen wurde

int_rxc:
    push    temp                       ; temp auf dem Stack sichern
    in      temp, sreg                 ; SREG sicher, muss praktisch in jeder
                                        ; Interruptroutine gemacht werden

    push    temp

    in      temp, UDR                  ; empfangenes Byte lesen
    rcall   EEPROM_write               ; Byte im EEPROM speichern
    adiw   ZL, 1                       ; Zeiger erhöhen
    cpi    ZL, low(EEPROMEND+1)        ; Vergleiche den Z Zeiger
    ldi    temp, high(EEPROMEND+1)     ; mit der maximalen EEPROM Adresse +1
    cpc    ZH, temp
    brne   int_rxc_1                  ; wenn ungleich, springen
    ldi    ZL, low(Daten)              ; wenn gleich, Zeiger zurücksetzen
    ldi    ZH, high(Daten)

```

```
int_rxc_1:

    pop     temp
    out     sreg,temp
    pop     temp                ; temp wiederherstellen
    reti

; der eigentliche EEPROM Schreibzugriff
; Adresse in ZL/ZH
; Daten in temp

EEPROM_write:
    sbic    EECR, EEWE          ; prüfe ob der letzte Schreibvorgang
                                ; beendet ist
    rjmp    EEPROM_write       ; wenn nein, nochmal prüfen

    out     EEARH, ZH           ; Adresse schreiben
    out     EEARL, ZL           ;
    out     EEDR,temp          ; Daten schreiben
    in     sreg_save,sreg      ; SREG sichern
    cli                                          ; Interrupts sperren, die nächsten
                                ; zwei Befehle dürfen NICHT
                                ; unterbrochen werden
    sbi     EECR,EEMWE         ; Schreiben vorbereiten
    sbi     EECR,EEWE          ; Und los !
    out     sreg, sreg_save     ; SREG wieder herstellen
    ret

; hier wird der EEPROM-Inhalt definiert
.ESEG

Daten:
    .db    0
```

12.2.3 SRAM

Die Verwendung des SRAM wird in einem anderen Kapitel erklärt: [AVR-Tutorial: SRAM](#)

12.3 Siehe auch

- [Adressierung](#)

13 AVR-Tutorial: Timer

Timer sind eines der Hauptarbeitspferde in unserem Mikrocontroller. Mit ihrer Hilfe ist es möglich in regelmäßigen Zeitabständen Aktionen zu veranlassen. Aber Timer können noch mehr!

- Timer können mit einem externen Pin hochgezählt werden
- es gibt Möglichkeiten bei bestimmten Zählerständen einen Interrupt auslösen zu lassen
- Timer können aber auch völlig selbstständig Signale an einem Ausgabepin erzeugen
- ...

Aber der Reihe nach.

13.1 Was ist ein Timer?

Ein Timer ist im Grunde nichts anderes als ein bestimmtes Register im Mikrocontroller, das hardwaregesteuert fortlaufend um 1 erhöht (oder erniedrigt) wird (statt *um 1 erhöhen* sagt man auch **inkrementieren**, und das Gegenstück, **dekrementieren**, bedeutet *um 1 erniedrigen*). Anstatt also Befehle im Programm vorzusehen, die regelmäßig ausgeführt werden und ein Register inkrementieren, erledigt dies der Mikrocontroller ganz von alleine. Dazu ist es möglich, den Timer mit dem Systemtakt zu verbinden und so die Genauigkeit des Quarzes auszunutzen, um ein Register regelmässig und vor allen Dingen unabhängig vom restlichen Programmfluss (!) hochzählen zu lassen.

Davon alleine hätte man aber noch keinen großen Gewinn. Nützlich wird das Ganze erst dann, wenn man bei bestimmten Zählerständen eine Aktion ausführen lassen kann. Einer der 'bestimmten Zählerstände' ist zum Beispiel der **Overflow**. Das Zählregister eines Timers kann natürlich nicht beliebig lange inkrementiert werden – z. B. ist der höchste Zählerstand, den ein 8-Bit-Timer erreichen kann, $2^8 - 1 = 255$. Beim nächsten Inkrementierschritt tritt ein Überlauf (engl. Overflow) auf, der den Timerstand wieder zu 0 werden lässt. Und hier liegt der springende Punkt. Wir können uns nämlich an diesen Overflow "anhängen" und den Controller so konfigurieren, daß beim Auftreten des Timer-Overflows ein Interrupt ausgelöst wird.

13.2 Der Vorteiler (Prescaler)

Wenn also der Quarzoszillator mit 4 MHz schwingt, dann würde auch der Timer 4 Millionen mal in der Sekunde erhöht werden. Da der Timer jedes Mal von 0 bis 255 zählt, bevor ein Overflow auftritt, heist das auch, dass in einer Sekunde $4000000 / 256 = 15625$ Overflows vorkommen. Ganz schön schnell! Nur: Oft ist das nicht sinnvoll. Um diese Raten zu verzögern, gibt es den Vorteiler, oder auf Englisch, Prescaler. Er kann auf die Werte 1, 8, 64, 256 oder 1024 eingestellt werden. Seine Aufgabe ist es, den Systemtakt um den angegebenen Faktor zu teilen. Steht der Vorteiler also auf 1024, so wird nur bei jedem 1024-ten Impuls vom Systemtakt das Timerregister um 1 erhöht. Entsprechend weniger häufig kommen dann natürlich die Overflows. Der Systemtakt sei wieder 4000000. Dann wird der Timer in 1 Sekunde $4000000 / 1024 = 3906.25$ mal erhöht. Da der Timer wieder jedesmal bis 255 zählen muss bis ein Overflow auftritt, bedeutet dies, dass in 1 Sekunde $3906.25 / 256 = 15.25$ Overflows auftreten.

Systemtakt: 4Mhz

Vorteiler	Overflows/Sekunde	Zeit zwischen 2 Overflows [s]
1	15625	0.000064
8	1953.125	0.000512
64	244.1406	0.004096
256	61.0351	0.016384
1024	15.2587	0.065536

13.3 Erste Tests

Ein Programm das einen Timer Overflow in Aktion zeigt könnte z.B. so aussehen:

```
.include "m8def.inc"

.def temp = r16
.def leds = r17

.org 0x0000
    rjmp    main          ; Reset Handler
.org OVFOaddr
    rjmp    timer0_overflow ; Timer Overflow Handler

main:
    ldi    temp, LOW(RAMEND) ; Stackpointer initialisieren
    out    SPL, temp
    ldi    temp, HIGH(RAMEND)
    out    SPH, temp

    ldi    temp, 0xFF        ; Port B auf Ausgang
    out    DDRB, temp

    ldi    leds, 0xFF

    ldi    temp, 0b00000001 ; CS00 setzen: Teiler 1
    out    TCCR0, temp

    ldi    temp, 0b00000001 ; TOIE0: Interrupt bei Timer Overflow
    out    TIMSK, temp

    sei

loop:    rjmp    loop

timer0_overflow: ; Timer 0 Overflow Handler
    out    PORTB, leds
    com    leds
    reti
```

Das Programm beginnt mit der [Interrupt-Vektoren-Tabelle](#). Dort ist an der Adresse *OVFOAddr* ein Sprung zur Marke *timer0_overflow* eingetragen. Wenn also ein Overflow Interrupt vom Timer 0 auftritt, so wird dieser Interrupt durch den **rjmp** weitergeleitet an die Stelle *timer0_overflow*.

Das Hauptprogramm beginnt ganz normal mit der Belegung des Stackpointers. Danach wird der Port B auf Ausgang geschaltet, wir wollen hier wieder die LED anschliessen.

Durch Beschreiben von TCCR0 mit dem Bitmuster 0b00000001 wird der Vorteiler auf 1 gesetzt. Für die ersten Versuche empfiehlt es sich, das Programm mit dem AVR-Studio zunächst zu simulieren. Würden wir einen größeren Vorteiler benutzen, so müsste man ziemlich oft mittels F11 einen simulierten Schritt ausführen um eine Änderung im Timerregister zu erreichen.

Die nächsten Anweisungen setzen im TIMSK Register das TOIE0 Bit. Sinn der Sache ist es, dem Timer zu erlauben bei Erreichen eines Overflow einen Interrupt auszulösen.

Zum Schluss noch die Interrupts generell mittels `sei` freigeben. Dieser Schritt ist obligatorisch. Im Mikrocontroller können viele Quellen einen Interrupt auslösen. Daraus folgt: Für jede mögliche Quelle muss festgelegt werden, ob sie einen Interrupt erzeugen darf oder nicht. Die Oberhoheit hat aber das globale Interrupt Flag. Mit ihm können alle Interrupts, egal von welcher Quelle sie kommen, unterdrückt werden.

Damit ist die Initialisierung beendet und das Hauptprogramm kann sich schlafen legen. Die **loop: rjmp loop** Schleife macht genau dieses.

Tritt nun ein Overflow am Timer auf, so wird über den Umweg über die Interrupt Vektor Tabelle der Programmteil `timer0_overflow` angesprungen. Dieser gibt einfach nur den Inhalt des Registers `leds` am Port B aus. Danach wird das `leds` Register mit einer **com** Operation negiert, so dass aus allen 0 Bits eine 1 wird und umgekehrt. Die Overflow Behandlung ist damit beendet und mittels **reti** wird der Interrupt Handler wieder verlassen.

13.4 Simulation im AVR-Studio

Es lohnt sich den ganzen Vorgang im AVR-Studio simulieren zu lassen. Dazu am besten in der linken I/O View Ansicht die Einträge für PORTB und TIMER_COUNTER_0 öffnen. Wird mittels F11 durch das Programm gegangen, so sieht man, dass ab dem Moment, ab dem der Vorteiler auf 1 gesetzt wird, der Timer 0 im TCNT0 Register zu zählen anfängt. Mit jedem Druck auf F11 erhöht sich der Zählerstand. Irgendwann ist dann die Endlosschleife `loop` erreicht. Drücken Sie weiterhin F11 und beobachten sie, wie TCNT0 immer höher zählt, bis der Overflow erreicht wird. In dem Moment, in dem der Overflow erreicht wird, wird der Interrupt ausgelöst. Mit dem nächsten F11 landen sie in der Interrupt Vektor Tabelle und von dort geht es weiter zu `timer_0_overflow`. Weitere Tastendrucke von F11 erledigen dann die Ausgabe auf den Port B, das invertieren des Registers `r17` und der Interrupt ist damit behandelt. Nach dem **reti** macht der Microcontroller genau an der Stelle weiter, an der er vom Interrupt unterbrochen wurde. Und der Timer 0 hat in der Zwischenzeit weitergezählt! Nach exakt weiteren 256 Schritten, vom Auftreten des ersten Overflows an gerechnet, wird der nächste Overflow ausgelöst.

13.5 Wie schnell schaltet denn jetzt der Port?

Eine berechtigte Frage. Dazu müssen wir etwas rechnen. Keine Angst, es ist nicht schwer, und wer das Prinzip bisher verstanden hat, der sollte keine Schwierigkeiten haben die Berechnung nachzuvollziehen.

Der Quarzoszillator schwingt mit 4 MHz. Das heißt in 1 Sekunde werden 4000000 Taktzyklen generiert. Durch die Wahl des Vorteilers von 1 bedeutet das auch, dass der Timer 4000000 mal in der Sekunde erhöht wird. Von einem Overflow zum nächsten muss der Timer 256 Zählvorgänge ausführen. Also werden in 1 Sekunde $4000000 / 256 = 15625$ Overflows generiert. Bei jedem Overflow schalten wir die LEDs jeweils in den anderen Zustand. D.h die LEDs blinken mit einer Frequenz von 7812.5 Hz. Das ist zuviel als dass wir es noch sehen könnten.

Was können wir also tun um diese Blinkfrequenz zu verringern? Im Moment ist unsere einzige Einflussgröße der Vorteiler. Wie sieht die Rechnung aus, wenn wir einen Vorteiler von 1024 wählen?

Wiederrum: Der Systemtakt sei 4 Mhz. Durch den Vorteiler von 1024 werden daraus $4000000 / 1024 = 3906.25$ Pulse pro Sekunde für den Timer. Der zählt wiederum 256 Zustände von einem Overflow zum nächsten. $3906.25 / 256 = 15.2587$. Und wiederum: Im Overflow werden die LEDs ja abwechselnd ein und ausgeschaltet, also dividieren wir noch durch 2: $15.2587 / 2 = 7.629$. Also knapp 7 Hz. Diese Frequenz müsste man schon mit freiem Auge sehen. Die LEDs werden ziemlich schnell vor sich hin blinken.

Reicht diese Verzögerung noch immer nicht, dann haben wir 2 Möglichkeiten:

- Entweder wir benutzen einen anderen Timer. Timer 1 beispielsweise ist ein 16 Bit Timer. Der Timer zählt also nicht bis 256 sondern bis 65536. Bei entsprechender Umarbeitung des Programms und einem Vorteiler von 1024 bedeutet das, dass die LEDs einen Ein/Aus Zyklus in 33 Sekunden absolvieren.
- Oder wir schalten die LEDs nicht bei jedem Timer Overflow um. Man könnte zum Beispiel in einem Register bis 7 zählen und nur dann, wenn dieses Register 7 erreicht hat, wird
 - das Register wieder auf 0 gesetzt und
 - die LEDs umgeschaltet.

13.6 Timer 0

Timer 0 ist ein 8 Bit Timer.

- Overflow Interrupt

13.6.1 TCCR0

```
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
|           |           |           |           |           | CS02 | CS01 | CS00 |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

CS02 - CS00 Clock Select

CS02 CS01 CS00 Bedeutung

0	0	0	keine (Der Timer ist angehalten)
0	0	1	Vorteiler: 1
0	1	0	Vorteiler: 8
0	1	1	Vorteiler: 64
1	0	0	Vorteiler: 256
1	0	1	Vorteiler: 1024
1	1	0	Externer Takt vom Pin T0, fallende Flanke
1	1	1	Externer Takt vom Pin T0, steigende Flanke

13.6.2 TIMSK

```
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
|           |           |           |           |           |           |           | TOIE0 |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

TOIE0 Timer 0 Overflow Interrupt Enable

Ist dieses Bit gesetzt, so wird beim Auftreten eines Overflows am Timer ein Interrupt ausgelöst.

Anstatt der Schreibweise

```
ldi    temp, 0b00000001    ; TOIE0: Interrupt bei Timer Overflow
out    TIMSK, temp
```

ist es besser, die Schreibweise

```
ldi    temp, 1 << TOIE0
out    TIMSK, temp
```

zu wählen, da hier unmittelbar aus dem Ladekommando hervorgeht, welche Bedeutung das gesetzte Bit hat. Die vorher inkludierte `m8def.inc` definiert dazu alles Notwendige.

13.7 Timer 1

Timer 1 ist ein 16 Bit Timer

- Overflow Interrupt
- Clear Timer on Compare Match
- Input Capture
- 2 Compare Einheiten
- div. PWM Modi

13.7.1 TCCR1B

```
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| ICNC1| ICES1|          | WGM13| WGM12| CS12 | CS11 | CS10 |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

CS12 - CS10 Clock Select

CS12 CS11 CS10 Bedeutung

0	0	0	keine (Der Timer ist angehalten)
0	0	1	Vorteiler: 1
0	1	0	Vorteiler: 8
0	1	1	Vorteiler: 64
1	0	0	Vorteiler: 256
1	0	1	Vorteiler: 1024
1	1	0	Externer Takt vom Pin T1, fallende Flanke
1	1	1	Externer Takt vom Pin T1, steigende Flanke

ICES1 Input Capture Edge Select

ICNC1 Input Capture Noise Canceler

13.7.2 TCCR1A

```
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| COM1A1| COM1A0| COM1B1| COM1B0| FOC1A | FOC1B | WGM11 | WGM10 |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

13.7.3 OCR1A

```
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
|         |         |         |         |         |         |         |         |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

```
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
|         |         |         |         |         |         |         |         |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

13.7.4 OCR1B

13.7.5 ICR1

13.7.6 TIMSK

		TICIE1	OCIE1A	OCIE1B	TOIE1		
--	--	--------	--------	--------	-------	--	--

TICIE1 *Timer 1 Input Capture Interrupt Enable*

OCIE1A *Timer 1 Output Compare A Match Interrupt Enable*

OCIE1B *Timer 1 Output Compare B Match Interrupt Enable*

TOIE1 *Timer 1 Overflow Interrupt Enable*

13.8 Timer 2

Timer 2 ist ein 8 Bit Timer.

- Overflow Interrupt
- Compare Match Interrupt
- Clear Timer on Compare Match
- Phasen korrekte PWM

13.8.1 TCCR2

```
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| FOC2 | WGM20| COM21| COM20| WGM21| CS22 | CS21 | CS20 |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

CS22 - CS20 Clock Select

CS22 CS21 CS20 Bedeutung

0	0	0	keine (Der Timer ist angehalten)
0	0	1	Vorteiler: 1
0	1	0	Vorteiler: 8
0	1	1	Vorteiler: 32
1	0	0	Vorteiler: 64
1	0	1	Vorteiler: 128
1	1	0	Vorteiler: 256
1	1	1	Vorteiler: 1024

13.8.2 OCR2

```
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
|      |      |      |      |      |      |      |      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

13.8.3 TIMSK

```
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| OCIE2| TOIE2|      |      |      |      |      |      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

OCIE2 Timer 2 Output Compare Interrupt Enable

TOIE2 Timer 2 Overflow Interrupt Enable

13.9 Was geht noch mit einem Timer?

Timer sind sehr universelle Microcontroller Bestandteile. Für weitergehende Studien ist es daher unerlässlich das entsprechende Datenblatt des Microcontrollers zu studieren. Oft ist es zb. möglich, dass der Timer bei Erreichen von bestimmten Zählerständen einen Ausgabepin von sich aus ein-/aus-/umschaltet. Er erledigt dann das was wir oben noch mit einem Interrupt gemacht haben eigenständig komplett in Hardware. Bei einigen Timern ist es möglich damit eine [PWM](#) (Pulsweiten-Modulation) aufzubauen.

Ein paar der Timermodule lassen sich auch als Counter verwenden. Damit kann man z.B. die Anzahl externer Ereignisse wie Schaltvorgänge eines Inkrementalgebers bestimmen.

Andere bieten die Möglichkeit über einen externen Uhrenquarz getaktet zu werden. (Anwendung z.B. eine "Echtzeituhr" oder als "Weckfunktion" aus einem Standby/Powerdownmodus)

13.10 Weblinks

- Timer/Counter und PWM beim ATmega16 Mikrocontroller: <http://www.uni-koblenz.de/~physik/informatik/MCU/Timer.pdf>

14 AVR-Tutorial: Uhr

Eine beliebte Übung für jeden Programmierer ist die Implementierung einer Uhr. Die meisten Uhren bestehen aus einem Taktgeber und einer Auswerte- und Anzeigevorrichtung. Wir wollen hier beides mittels eines Programmes in einem Mikrocontroller realisieren. Voraussetzung für diese Fallstudie ist das Verständnis der Kapitel über

- [Ansteuerung eines LC-Displays](#)
- [Timer](#)

14.1 Aufbau und Funktion

Die Aufgabe des Taktgebers, der uns einen möglichst konstanten und genauen Takt liefert, übernimmt ein Timer. Der Timer ermöglicht einen einfachen Zugang zum Takt, die der AVR vom Quarz abgreift. Wie schon im Einführungskapitel über den [Timer](#) wird dazu ein Timer Overflow Interrupt installiert und in diesem Interrupt wird die eigentliche Uhr hochgezählt. Die Uhr selbst besteht aus 4 Registern. 3 davon repräsentieren die Sekunden, Minuten und Stunden unserer Uhr. Nach jeweils einer Sekunde wird das Sekundenregister um 1 erhöht. Sind 60 Sekunden vergangen, dann wird das Sekundenregister wieder auf 0 gesetzt und dafür das Minutenregister um 1 erhöht (Überlauf). Nach 60 Minuten werden die Minuten wieder auf 0 gesetzt und für diese 60 Minuten eine Stunde mehr gezählt. Nach 24 Stunden schliesslich werden die Stunden wieder auf 0 gesetzt, ein ganzer Tag ist vergangen.

Aber wozu das 4. Register?

Der Mikrocontroller wird mit 4MHz betrieben. Bei einem Teiler von 1024 zählt der Timer also mit $4000000 / 1024 = 3906.25$ Pulsen pro Sekunde. Der Timer muss einmal bis 256 zählen, bis er einen Overflow auslöst. Das heisst, es ereignen sich $3906.25 / 256 = 15.2587$ Overflows pro Sekunde. Die Aufgabe des 4. Registers ist es nun diese 15 Overflows zu zählen. Bei Auftreten des 15.ten Overflow ist 1 Sekunde vergangen. Dass dies nicht exakt stimmt, da ja die Division auch Nachkommastellen aufwies, wird im Moment der Einfachheit halber ignoriert. In einem späteren Abschnitt wird darauf noch eingegangen.

Im Overflow Interrupt wird also diese Kette von Zählvorgängen auf den Sekunden, Minuten und Stunden durchgeführt und anschliessend zur Anzeige gebracht. Dazu werden die in einem vorhergehenden Kapitel entwickelten [LCD Funktionen](#) benutzt.

14.2 Das erste Programm

```

.includ "m8def.inc"

.def temp1 = r16
.def temp2 = r17
.def temp3 = r18
.def flag = r19

.def SubCount = r21
.def Sekunden = r22
.def Minuten = r23
.def Stunden = r24

.org 0x0000
    rjmp    main                ; Reset Handler
.org OVF0addr
    rjmp    timer0_overflow    ; Timer Overflow Handler

.includ "lcd-routines.asm"

main:
    ldi     temp1, LOW(RAMEND)  ; Stackpointer initialisieren
    out     SPL, temp1
    ldi     temp1, HIGH(RAMEND)
    out     SPH, temp1

    rcall   lcd_init
    rcall   lcd_clear

    ldi     temp1, 0b00000101   ; Teiler 1024
    out     TCCR0, temp1

    ldi     temp1, 0b00000001   ; TOIE0: Interrupt bei Timer Overflow
    out     TIMSK, temp1

    clr     Minuten              ; Die Uhr auf 0 setzen
    clr     Sekunden
    clr     Stunden
    clr     SubCount
    clr     Flag                 ; Merker löschen

    sei

loop:
    cpi     flag, 0
    breq    loop                ; Flag im Interrupt gesetzt?
    ldi     flag, 0             ; flag löschen

    rcall   lcd_clear           ; das LCD löschen
    mov     temp1, Stunden      ; und die Stunden ausgeben
    rcall   lcd_number
    ldi     temp1, ':'          ; zwischen Stunden und Minuten einen ':'
    rcall   lcd_data
    mov     temp1, Minuten      ; dann die Minuten ausgeben
    rcall   lcd_number
    ldi     temp1, ':'          ; und noch ein ':'
    rcall   lcd_data
    mov     temp1, Sekunden     ; und die Sekunden
    rcall   lcd_number

```

```

    rjmp    loop

timer0_overflow:                ; Timer 0 Overflow Handler

    push   temp1                ; temp 1 sichern
    in     temp1,sreg           ; SREG sichern

    inc    SubCount             ; Wenn dies nicht der 15. Interrupt
    cpi    SubCount, 15         ; ist, dann passiert gar nichts
    brne   end_isr

                                ; Überlauf
    clr    SubCount             ; SubCount rücksetzen
    inc    Sekunden             ; plus 1 Sekunde
    cpi    Sekunden, 60        ; sind 60 Sekunden vergangen?
    brne   Ausgabe             ; wenn nicht kann die Ausgabe schon
                                ; gemacht werden

                                ; Überlauf
    clr    Sekunden             ; Sekunden wieder auf 0 und dafür
    inc    Minuten              ; plus 1 Minute
    cpi    Minuten, 60         ; sind 60 Minuten vergangen ?
    brne   Ausgabe             ; wenn nicht, -> Ausgabe

                                ; Überlauf
    clr    Minuten              ; Minuten zurücksetzen und dafür
    inc    Stunden              ; plus 1 Stunde
    cpi    Stunden, 24         ; nach 24 Stunden, die Stundenanzeige
    brne   Ausgabe             ; wieder zurücksetzen

                                ; Überlauf
    clr    Stunden              ; Stunden rücksetzen

Ausgabe:
    ldi    flag,1               ; Flag setzen, LCD updaten

end_isr:

    out    sreg,temp1           ; sreg wieder herstellen
    pop    temp1
    reti                          ; das wars. Interrupt ist fertig

; Eine Zahl aus dem Register temp1 ausgeben

lcd_number:
    push   temp2                ; register sichern,
                                ; wird für Zwischenergebnisse gebraucht

    ldi    temp2, '0'

lcd_number_10:
    subi   temp1, 10            ; abzählen wieviele Zehner in
    brcs   lcd_number_1        ; der Zahl enthalten sind
    inc    temp2
    rjmp   lcd_number_10

lcd_number_1:
    rcall  lcd_data             ; die Zehnerstelle ausgeben
    subi   temp1, -10           ; 10 wieder dazuzählen, da die
                                ; vorhergehende Schleife 10 zuviel
                                ; abgezogen hat
                                ; das Subtrahieren von -10
                                ; = Addition von +10 ist ein Trick
                                ; da kein addi Befehl existiert

    ldi    temp2, '0'           ; die übrig gebliebenen Einer
    add    temp1, temp2         ; noch ausgeben
    rcall  lcd_data

```

```

pop     temp2           ; Register wieder herstellen
ret

```

In der ISR wird nur die Zeit in den Registern neu berechnet, die Ausgabe auf das LCD erfolgt in der Hauptschleife. Das ist notwendig, da die LCD-Ausgabe bisweilen sehr lange dauern kann. Wenn sie länger als ~2/15 Sekunden dauert werden Timerinterrupts "verschluckt" und unsere Uhr geht noch mehr falsch. Dadurch, dass aber die Ausgabe in der Hauptschleife durchgeführt wird, welche jederzeit durch einen Timerinterrupt unterbrochen werden kann, werden keine Timerinterrupts verschluckt. Das ist vor allem wichtig, wenn mit höheren Interruptfrequenzen gearbeitet wird, z.B. 1/100s im Beispiel weiter unten. Auch wenn in diesem einfachen Beispiel die Ausgabe bei weitem nicht 2/15 Sekunden dauert, sollte man sich diesen Programmierstil allgemein angewöhnen. Siehe auch [Interrupt](#).

Eine weitere Besonderheit ist das Register **flag** (=r19). Dieses Register fungiert als Anzeiger, wie eine Flagge, daher auch der Name. In der ISR wird dieses Register auf 1 gesetzt. Die Hauptschleife, also alles zwischen *loop* und *rjmp loop*, prüft dieses Flag und nur dann, wenn das Flag auf 1 steht, wird die LCD Ausgabe gemacht und das Flag wieder auf 0 zurückgesetzt. Auf diese Art wird nur dann Rechenzeit für die LCD Ausgabe verbraucht, wenn dies tatsächlich notwendig ist. Die ISR teilt mit dem Flag der Hauptschleife mit, dass eine bestimmte Aufgabe, nämlich der Update der Anzeige gemacht werden muß und die Hauptschleife reagiert darauf bei nächster Gelegenheit, indem es diese Aufgabe ausführt und setzt das Flag zurück. Solche Flags werden daher auch **Job-Flags** genannt, weil durch ihr Setzen das Abarbeiten eines Jobs (einer Aufgabe) angestoßen wird. Auch hier gilt wieder: Im Grunde würde man in diesem speziellen Beispiel kein Job-Flag benötigen, weil es in der Hauptschleife nur einen einzigen möglichen Job, die Neuausgabe der Uhrzeit, gibt. Sobald aber Programme komplizierter werden und mehrere Jobs möglich sind, sind Job-Flags eine gute Möglichkeit ein Programm so zu organisieren, daß bestimmte Dinge nur dann gemacht werden, wenn sie notwendig sind.

Im Moment gibt es keine Möglichkeit, die Uhr auf eine bestimmte Uhrzeit einzustellen. Um dies tun zu können müssten noch zusätzlich Taster an den Mikrocontroller angeschlossen werden, mit deren Hilfe die Sekunden, Minuten und Stunden händisch vergrößert bzw. verkleinert werden können. Studieren Sie mal die Bedienungsanleitung einer käuflichen Digitaluhr und versuchen sie zu beschreiben, wie dieser Stellvorgang bei dieser Uhr vor sich geht. Sicherlich werden Sie daraus eine Idee entwickeln können, wie ein derartiges Stellen mit der hier vorgestellten Digitaluhr funktionieren könnte. Als Zwischenlösung kann man im Programm die Uhr beim Start anstelle von 00:00:00 z.B. auch auf 20:00:00 stellen und exakt mit dem Start der Tagesschau starten.

14.3 Ganggenauigkeit

Wird die Uhr mit einer gekauften Uhr verglichen, so stellt man schnell fest, dass die ganz schön ungenau geht. Sie geht vor! Woran liegt das? Die Berechnung sieht so aus:

- Frequenz des Quarzes: 4.0 MHz
- Vorteiler des Timers: 1024
- Überlauf alle 256 Timertakte

Daraus errechnet sich, daß in einer Sekunde $4000000 / 1024 / 256 = 15.258789$ Overflow Interrupts auftreten. Im Programm wird aber bereits nach 15 Overflows eine Sekunde weitergeschaltet, daher geht die Uhr vor. Rechnen wir etwas:

$$F_r = \left(\frac{15}{15,258789} - 1 \right) \cdot 100\% = -1,69\%$$

So wie bisher läuft die Uhr also rund 1.7 % zu schnell. In einer Minute ist das immerhin etwas mehr als eine Sekunde. Im Grunde ist das ein ähnliches Problem wie mit unserer Jahreslänge. Ein Jahr dauert nicht exakt 365 Tage, sondern in etwa einen viertel Tag länger. Die Lösung, die im Kalender dafür gemacht wurde - der Schalttag -, könnte man fast direkt übernehmen. Nach 3 Stück 15er Overflow Sekunden folgt eine Sekunde für die 16 Overflows ablaufen müssen. Wie sieht die Rechnung bei einem 15, 15, 15, 16 Schema aus? Für 4 Sekunden werden exakt $15.258789 * 4 = 61,035156$ Overflow Interrupts benötigt. Mit einem 15, 15, 15, 16 Schema werden in 4 Sekunden genau 61 Overflow Interrupts durchgeführt. Der relative Fehler beträgt dann

$$F_r = \left(\frac{61}{61,035156} - 1 \right) \cdot 100\% = -0,0575\%$$

Mit diesem Schema ist der Fehler beträchtlich gesunken. Nur noch 0.06%. Bei dieser Rate muss die Uhr immerhin etwas länger als 0,5 Stunden laufen, bis der Fehler auf eine Sekunde angewachsen ist. Das sind aber immer noch 48 Sekunden pro Tag bzw. 1488 Sekunden (=24,8 Minuten) pro Monat. So schlecht sind nicht mal billige mechanische Uhren!

Jetzt könnte man natürlich noch weiter gehen und immer kompliziertere "Schalt-Overflow"-Schemata austüfteln und damit die Genauigkeit näher an 100% bringen. Aber gibt es noch andere Möglichkeiten?

Im ersten Ansatz wurde ein Vorteiler von 1024 eingesetzt. Was passiert bei einem anderen Vorteiler? Nehmen wir mal einen Vorteiler von 64. Das heist, es müssen $(4000000 / 64) / 256 = 244.140625$ Overflows auflaufen bis 1 Sekunde vergangen ist. Wenn also 244 Overflows gezählt werden, dann beläuft sich der Fehler auf

$$F_r = \left(\frac{244}{244,140625} - 1 \right) \cdot 100\% = -0,0576\%$$

Nicht schlecht. Nur durch Verändern von 2 Zahlenwerten im Programm (Teilerfaktor und Anzahl der Overflow Interrupts bis zu einer Sekunden) kann die Genauigkeit gegenüber dem ursprünglichen Overflow-Schema beträchtlich gesteigert werden. Aber geht das noch besser? Ja das geht. Allerdings nicht mit dem Overflow Interrupt.

14.4 Der CTC Modus des Timers

Worin liegt den das eigentliche Problem, mit dem die Uhr zu kämpfen hat? Das Problem liegt darin, dass jedesmal ein kompletter Timerzyklus bis zum Overflow abgewartet werden muss, um darauf zu reagieren. Da aber nur jeweils ganzzahlige Overflowzyklen abgezählt werden können, heisst das auch, dass im ersten Fall nur in Vielfachen von $1024 * 256 = 262144$ Takten operiert werden kann, während im letzten Fall immerhin schon eine Granulierung von $64 * 256 = 16384$ Takten erreicht wird. Aber offensichtlich ist das nicht genau genug. Bei 4 MHz entsprechen 262144 Takte bereits einem Zeitraum von 65,5ms, während 16384 Takte einem Zeitbedarf von 4,096ms entsprechen. Beide Zahlen teilen aber 1000ms nicht ganzzahlig. Und daraus entsteht der Fehler. Angestrebt wird ein Timer der seinen *Overflow* so erreicht, dass sich ein ganzzahliger Teiler von 1 Sekunde einstellt. Dazu müssten man dem Timer aber vorschreiben können, bei welchem Zählerstand der *Overflow* erfolgen soll. Und genau dies ist im **CTC** Modus, allerdings nur beim Timer 1, möglich. **CTC** bedeutet "Clear Timer on Compare match".

Timer 1, ein 16 Bit Timer, wird mit einem Vorteiler von 1 betrieben. Dadurch wird erreicht, dass der Timer mit höchster Zeitauflösung arbeiten kann. Bei jedem Ticken des Systemtaktes von 4 MHz wird auch der Timer um 1 erhöht. Zusätzlich wird noch das WGM12 Bit bei der Konfiguration gesetzt. Dadurch wird der Timer in den **CTC** Modus gesetzt. Dabei wird der Inhalt des Timers hardwaremäßig mit dem Inhalt des **OCR1A** Registers verglichen. Stimmen beide überein, so wird der Timer auf 0 zurückgesetzt und im nächsten Taktzyklus ein **OCIE1A** Interrupt ausgelöst. Dadurch ist es möglich exakt die Anzahl an Taktzyklen festzulegen, die von einem Interrupt zum nächsten vergehen sollen. Das Compare Register **OCR1A** wird mit dem Wert 39999 vorbelegt. Dadurch vergehen exakt 40000 Taktzyklen von einem Compare Interrupt zum nächsten. "Zufällig" ist dieser Wert so gewählt, daß bei einem Systemtakt von 4 MHz von einem Interrupt zum nächsten genau 1 hundertstel Sekunde vergeht, denn $40000 / 4000000 = 0.01$. Bei einem möglichen Umbau der Uhr zu einer Stoppuhr könnte sich das als nützlich erweisen. Im Interrupt wird das Hilfsregister SubCount bis 100 hochgezählt und nach 100 Interrupts kommt wieder die Sekundenweitschaltung wie oben in Gang.

```
.include "m8def.inc"

.def temp1 = r16
.def temp2 = r17
.def temp3 = r18
.def Flag = r19

.def SubCount = r21
.def Sekunden = r22
.def Minuten = r23
.def Stunden = r24

.org 0x0000
    rjmp    main            ; Reset Handler
.org OC1Aaddr
    rjmp    timer1_compare ; Timer Compare Handler

.include "lcd-routines.asm"

main:
    ldi    temp1, LOW(RAMEND) ; Stackpointer initialisieren
    out   SPL, temp1
    ldi    temp1, HIGH(RAMEND)
    out   SPH, temp1

    rcall  lcd_init
    rcall  lcd_clear
```

```

                                ; Vergleichswert
ldi    temp1, high( 40000 - 1 )
out    OCR1AH, temp1
ldi    temp1, low( 40000 - 1 )
out    OCR1AL, temp1

                                ; CTC Modus einschalten
                                ; Vorteiler auf 1
ldi    temp1, ( 1 << WGM12 ) | ( 1 << CS10 )
out    TCCR1B, temp1

ldi    temp1, 1 << OCIE1A ; OCIE1A: Interrupt bei Timer Compare
out    TIMSK, temp1

clr    Minuten                ; Die Uhr auf 0 setzen
clr    Sekunden
clr    Stunden
clr    SubCount
clr    Flag                    ; Flag löschen

sei

loop:
cpi    flag, 0
breq   loop                    ; Flag im Interrupt gesetzt?
ldi    flag, 0                  ; Flag löschen

rcall  lcd_clear                ; das LCD löschen
mov    temp1, Stunden           ; und die Stunden ausgeben
rcall  lcd_number
ldi    temp1, ':'                ; zwischen Stunden und Minuten einen ':'
rcall  lcd_data
mov    temp1, Minuten           ; dann die Minuten ausgeben
rcall  lcd_number
ldi    temp1, ':'                ; und noch ein ':'
rcall  lcd_data
mov    temp1, Sekunden          ; und die Sekunden
rcall  lcd_number

rjmp   loop

timer1_compare:                ; Timer 1 Output Compare Handler

push   temp1                    ; temp 1 sichern
in     temp1, sreg              ; SREG sichern

inc    SubCount                 ; Wenn dies nicht der 100. Interrupt
cpi    SubCount, 100           ; ist, dann passiert gar nichts
brne   end_isr

                                ; Überlauf
clr    SubCount                 ; SubCount zurücksetzen
inc    Sekunden                 ; plus 1 Sekunde
cpi    Sekunden, 60            ; sind 60 Sekunden vergangen?
brne   Ausgabe                 ; wenn nicht kann die Ausgabe schon
                                ; gemacht werden

                                ; Überlauf
clr    Sekunden                 ; Sekunden wieder auf 0 und dafür
inc    Minuten                 ; plus 1 Minute
cpi    Minuten, 60             ; sind 60 Minuten vergangen ?
brne   Ausgabe                 ; wenn nicht, -> Ausgabe

                                ; Überlauf
clr    Minuten                 ; Minuten zurücksetzen und dafür

```

```

    inc    Stunden          ; plus 1 Stunde
    cpi    Stunden, 24     ; nach 24 Stunden, die Stundenanzeige
    brne   Ausgabe        ; wieder zurücksetzen

                                ; Überlauf
    clr    Stunden        ; Stunden rücksetzen

Ausgabe:
    ldi    flag,1          ; Flag setzen, LCD updaten

end_isr:

    out    sreg,temp1     ; sreg wieder herstellen
    pop    temp1
    reti                               ; das wars. Interrupt ist fertig

; Eine Zahl aus dem Register temp1 ausgeben

lcd_number:
    push   temp2          ; register sichern,
                                ; wird für Zwischenergebnisse gebraucht
    ldi    temp2, '0'
lcd_number_10:
    subi   temp1, 10     ; abzählen wieviele Zehner in
    brcs   lcd_number_1 ; der Zahl enthalten sind
    inc    temp2
    rjmp   lcd_number_10
lcd_number_1:
    rcall  lcd_data      ; die Zehnerstelle ausgeben
    subi   temp1, -10   ; 10 wieder dazuzählen, da die
                                ; vorhergehende Schleife 10 zuviel
                                ; abgezogen hat
                                ; das Subtrahieren von -10
                                ; = Addition von +10 ist ein Trick
                                ; da kein addi Befehl existiert
    ldi    temp2, '0'   ; die übrig gebliebenen Einer
    add    temp1, temp2 ; noch ausgeben
    rcall  lcd_data

    pop    temp2        ; Register wieder herstellen
    ret

```

In der Interrupt Routine werden wieder, genauso wie vorher, die Anzahl der Interrupt Aufrufe gezählt. Beim 100. Aufruf sind daher $40.000 * 100 = 4.000.000$ Takte vergangen und da der Quarz mit 4.000.000 Schwingungen in der Sekunde arbeitet, ist daher eine Sekunde vergangen. Sie wird genauso wie vorher registriert und die Uhr entsprechend hochgezählt. Wird jetzt die Uhr mit einer kommerziellen verglichen, dann fällt nach einiger Zeit auf ... Sie geht immer noch falsch! Was ist jetzt die Ursache? Die Ursache liegt in einem Problem, das nicht direkt behebbar ist. Am Quarz! Auch wenn auf dem Quarz drauf steht, dass er eine Frequenz von 4MHz hat, so stimmt das nicht exakt. Auch Quarze haben Fertigungstoleranzen verändern ihre Frequenz mit der Temperatur. Typisch liegt die Fertigungstoleranz bei $\pm 100\text{ppm} = 0,01\%$ (**p**arts **p**er **m**illion, Millionstel Teile), die Temperaturdrift zwischen -40 Grad und 85 Grad liegt je nach Typ in der selben Größenordnung. Das bedeutet, dass die Uhr pro Monat um bis zu 268 Sekunden ($\sim 4 \frac{1}{2}$ Minuten) falsch gehen kann. Diese Einflüsse auf die Quarzfrequenz sind aber messbar und per Hardware oder Software behebbar. In Uhren kommen normalerweise genauer gefertigte Uhrenquarze zum Einsatz, die vom Uhrmacher auch noch auf die exakte Frequenz abgeglichen werden (mittels Kondensatoren und Frequenzzähler). Ein Profi verwendet einen sehr genauen Frequenzzähler, womit er innerhalb weniger Sekunden die Frequenz sehr genau messen kann. Als Hobbybastler kann man die Uhr eine zeitlang (Tage, Wochen) laufen lassen und die Abweichung feststellen (z.B. exakt 20:00 Uhr zum Start der Tagsschau). Aus dieser Abweichung lässt sich dann errechnen wie schnell der Quarz wirklich schwingt. Und da dank CTC die Messperiode taktgenau eingestellt werden kann, ist es möglich diesen Frequenzfehler auszugleichen. Der genaue Vorgang ist in dem Wikiartikel [AVR - Die genaue Sekunde / RTC](#) beschrieben.

15 AVR-Tutorial: ADC

15.1 Was macht der ADC?

Wenn es darum geht Spannungen zu messen, wird der [Analog Digital Converter](#) benutzt. Er konvertiert eine elektrische Spannung in eine Digitalzahl. Diese kann dann in gewohnter Weise von einem [Mikrocontroller](#) weiterverarbeitet werden.

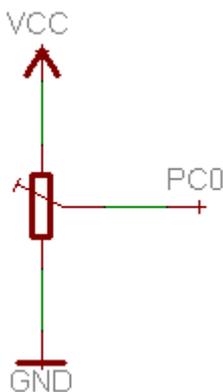
15.2 Elektronische Grundlagen

Natürlich kann der ADC nicht beliebig hohe Spannungen verarbeiten. Die Grenze, bis zu der der ADC arbeitet ohne Schaden zu nehmen, liegt bei der analogen Versorgungsspannung (AVcc). Die ADC-Eingangsspannung darf diese maximal um 0.5 Volt überschreiten. Wird der Mikrocontroller also mit 5 Volt betrieben, so liegt die maximale Eingangsspannung bei ca. 5.5 Volt.

Der Eingangswiderstand des ADC liegt in der Größenordnung von einigen Megaohm, so dass der ADC die Signalquelle praktisch nicht belastet. Desweiteren enthält der Mikrocontroller eine sog. **Sample&Hold** Schaltung. Dies ist wichtig, wenn sich während des Wandlungsvorgangs die Eingangsspannung verändert, da die AD-Wandlung eine bestimmte Zeit dauert. Die Sample&Hold-Stufe speichert zum Beginn der Wandlung die anliegende Spannung und hält sie während des Wandlungsvorgangs konstant.

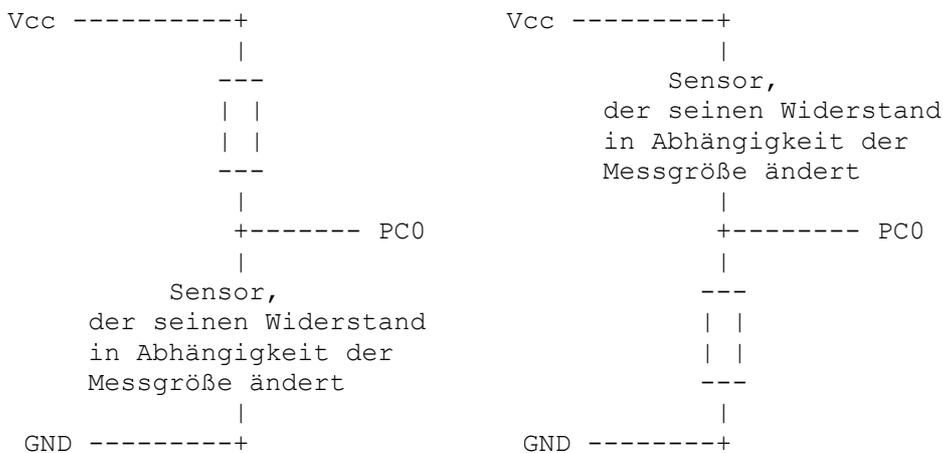
15.2.1 Beschaltung des ADC-Eingangs

Um den ADC im Folgenden zu testen wird eine einfache Schaltung an den PC0-Pin des ATmega8 angeschlossen. Dies ist der ADC-Kanal 0. Bei anderen AVR-Typen liegt der entsprechende Eingang auf einem andern Pin, hier ist ein Blick ins Datenblatt angesagt.



Der Wert des [Potentiometers](#) ist Dank des hohen Eingangswiderstandes des ADC ziemlich unkritisch. Es kann jedes Potentiometer von 1kΩ bis 1MΩ benutzt werden.

Wenn andere Messgrößen gemessen werden sollen, so bedient man sich oft und gern des Prinzips des [Spannungsteilers](#). Der Sensor ist ein veränderlicher Widerstand. Zusammen mit einem zweiten, konstanten Widerstand bekannter Größe wird ein Spannungsteiler aufgebaut. Aus der Variation der durch den variablen Spannungsteiler entstehenden Spannung kann auf den Messwert zurückgerechnet werden.



Die Größe des zweiten Widerstandes im Spannungsteiler richtet sich nach dem Wertebereich, in dem der Sensor seinen Wert ändert. Als Daumenregel kann man sagen, dass der Widerstand so gross sein sollte wie der Widerstand des Sensors in der Mitte des Messbereichs.

Beispiel: Wenn ein Temperatursensor seinen Widerstand von 0..100 Grad von 2kΩ auf 5kΩ ändert, sollte der zweite Widerstand eine Grösse von etwa $(2+5)/2 = 3,5\text{k}\Omega$ haben.

15.2.2 Referenzspannung AREF

Der ADC benötigt für seine Arbeit eine Referenzspannung. Dabei gibt es 2 Möglichkeiten:

- interne Referenzspannung
- externe Referenzspannung

15.2.2.1 Interne Referenzspannung

Mittels Konfigurationsregister können beim ATmega8 verschiedene Referenzspannungen eingestellt werden. Dies umfasst die Versorgungsspannung AVcc sowie eine vom AVR bereitgestellte Spannung von 2,56V (bzw. bei den neueren AVR's 1,1V, wie z.B. beim ATtiny13, ATmega48, 88, 168, ...). In beiden Fällen wird an den AREF-Pin des Prozessors ein Kondensator von 100nF als Minimalbeschaltung nach Masse angeschlossen, um die Spannung zu puffern/glätten.

15.2.2.2 Externe Referenzspannung

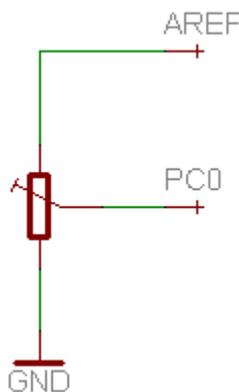
Wird eine externe Referenz verwendet, so wird diese an AREF angeschlossen. Aber aufgepasst! Wenn eine Referenz in Höhe der Versorgungsspannung benutzt werden soll, so ist es besser dies über die interne Referenz zu tun. Ausser bei anderen Spannungen als 5V bzw. 2,56V gibt es eigentlich keinen Grund an AREF eine Spannungsquelle anzuschliessen. In Standardanwendungen fährt man immer besser wenn die interne Referenzspannung mit einem Kondensator an AREF benutzt wird.

15.3 Ein paar ADC-Grundlagen

Der ADC ist ein 10-Bit ADC, d.h. er liefert Messwerte im Bereich 0 bis 1023. Liegt am Eingangskanal 0V an, so liefert der ADC einen Wert von 0. Hat die Spannung am Eingangskanal die Referenzspannung erreicht (stimmt nicht ganz), so liefert der ADC einen Wert von 1023. Unterschreitet oder überschreitet die zu messende Spannung diese Grenzen, so liefert der ADC 0 bzw. 1023. Wird die Auflösung von 10 Bit nicht benötigt, so ist es möglich die Ausgabe durch ein Konfigurationsregister so einzuschränken, dass ein leichter Zugriff auf die 8 höchstwertigen Bits möglich ist.

Wie bei vielen analogen Schaltungen, unterliegt auch der ADC einem Rauschen. Das bedeutet, dass man nicht davon ausgehen sollte, dass der ADC bei konstanter Eingangsspannung auch immer denselben konstanten Wert ausgibt. Ein "Zittern" der niederwertigsten 2 Bits ist durchaus nicht ungewöhnlich. Besonders hervorgehoben werden soll an dieser Stelle nochmals die Qualität der Referenzspannung. Diese Qualität geht in erheblichem Maße in die Qualität der Wandelergebnisse ein. Die Beschaltung von AREF mit einem Kondensator ist die absolut notwendige Mindestbeschaltung, um eine einigermaßen akzeptable Referenzspannung zu erhalten. Reicht dies nicht aus, so kann die Qualität einer Messung durch *Oversampling* erhöht werden. Dazu werden mehrere Messungen gemacht und deren Mittelwert gebildet.

Oft interessiert auch der absolute Spannungspegel nicht. Im Beschaltungsbeispiel oben ist man normalerweise nicht direkt an der am Poti entstehenden Spannung interessiert. Viel mehr ist diese Spannung nur ein notwendiges Übel, um die Stellung des Potis zu bestimmen. In solchen Fällen kann die Poti-Beschaltung wie folgt abgewandelt werden:



Hier wird AREF (bei interner Referenz) als vom μC gelieferte Spannung benutzt und vom Spannungsteiler bearbeitet wieder an den μC zur Messung zurückgegeben. Dies hat den Vorteil, dass der Spannungsteiler automatisch Spannungen bis zur Höhe der Referenzspannung ausgibt, ohne dass eine externe Spannung mit AREF abgeglichen werden müsste. Selbst Schwankungen in AREF wirken sich hier nicht mehr aus, da ja das Verhältnis der Spannungsteilerspannung zu AREF immer konstant bleibt (ratiometrische Messung). Und im Grunde bestimmt der ADC ja nur dieses Verhältnis. Wird diese Variante gewählt, so muss berücksichtigt werden, dass die Ausgangsspannung an AREF nicht allzusehr belastet wird. Der Spannungsteiler muss einen Gesamtwiderstand von deutlich über $10\text{k}\Omega$ besitzen. Werte von $100\text{k}\Omega$ oder höher sind anzustreben. Verwendet man anstatt AREF AVCC und schaltet auch die Referenzspannung auf AVCC um, ist die Belastung durch den Poti unkritisch, weil hier die Stromversorgung direkt zur Speisung verwendet wird.

Ist hingegen die absolute Spannung von Interesse, so muss man darauf achten, dass ein ADC in digitalen Bereichen arbeitet (Quantisierung). An einem einfacheren Beispiel soll demonstriert werden was damit gemeint ist.

Angenommen der ADC würde nur 5 Stufen auflösen können und AREF sei 5V:

Volt	Wert vom ADC
0 --+ 	0
1 --+ 	1
2 --+ 	2
3 --+ 	3
4 --+ 	4
5 --+	

Ein ADC Wert von 0 bedeutet also keineswegs, dass die zu messende Spannung exakt den Wert 0 hat. Es bedeutet lediglich, dass die Messspannung irgendwo im Bereich von 0V bis 1V liegt. Sinngemäß bedeutet daher auch das Auftreten des Maximalwertes nicht, dass die Spannung exakt AREF beträgt, sondern lediglich, dass die Messspannung sich irgendwo im Bereich der letzten Stufe (also von 4V bis 5V) bewegt.

15.4 Umrechnung des ADC Wertes in eine Spannung

Die Größe eines "Bereiches" bestimmt sich also zu

$$\text{Bereichsbreite} = \frac{\text{Referenzspannung}}{\text{Maximalwert} + 1}$$

Der Messwert vom ADC rechnet sich dann wie folgt in eine Spannung um:

$$\text{Spannung} = \text{ADCwert} \cdot \frac{\text{Referenzspannung}}{\text{Maximalwert} + 1}$$

Wird der ADC also mit 10 Bit an 5 V betrieben, so lauten die Umrechnungen:

$$\text{Spannung} = \text{ADCwert} \cdot \frac{5}{1024}$$

$$\text{Bereichsbreite} = \frac{5}{1024} = 0,004883V = 4,883mV$$

Wenn man genau hinsieht stellt man fest, dass sowohl die Referenzspannung als auch der Maximalwert Konstanten sind. D.h. der Quotient aus Referenzspannung und Maximalwert+1 ist konstant. Somit muss nicht immer eine Multiplikation und Division ausgeführt werden, sondern nur eine Multiplikation! Das spart viel Aufwand und Rechenzeit! Dabei kommt Festkommaarithmetik zum Einsatz.

15.5 Die Steuerregister des ADC

15.5.1 ADMUX

```
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| REFS1 | REFS0 | ADLAR |           | MUX3 | MUX2 | MUX1 | MUX0 |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

- Referenzspannung *REFS1*, *REFS0*

REFS1 REFS0 Referenz

0	0	externe Referenz
0	1	interne Referenz: Avcc
1	0	wird beim Mega8 nicht benutzt
1	1	interne Referenz: 2.56 Volt

- Ausrichtung *ADLAR*

ADLAR

0 Das Ergebnis wird in den Registern ADCH/ADCL rechtsbündig ausgerichtet. Die 8 niederwertigsten Bits des Ergebnisses werden in ADCL abgelegt. Die verbleibenden 2 Bits des Ergebnisses werden im Register ADCH in den Bits 0 und 1 abgelegt.

1 Das Ergebnis wird in den Registern ADCH/ADCL linksbündig ausgerichtet. Die 8 höchstwertigen Bits des Ergebnisses werden in ADCH abgelegt. Die verbleibenden 2 niederwertigen Bits werden im Register ADCL in den Bits 6 und 7 abgelegt.

- Kanalwahl *MUX3*, *MUX2*, *MUX1*, *MUX0*

MUX3 MUX2 MUX1 MUX0 Kanal

0	0	0	0	Kanal 0, Pin PC0
0	0	0	1	Kanal 1, Pin PC1
0	0	1	0	Kanal 2, Pin PC2
0	0	1	1	Kanal 3, Pin PC3
0	1	0	0	Kanal 4, Pin PC4
0	1	0	1	Kanal 5, Pin PC5
0	1	1	0	Kanal 6, Pin ADC7 (*)
0	1	1	1	Kanal 7, Pin ADC8 (*)
1	1	1	0	1.23V, Vbg
1	1	1	1	0V, GND

(*) nur in der Gehäusebauform TQFP und MLF verfügbar

15.5.2 ADCSRA

```
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
|  ADEN  |  ADSC  |  ADFR  |  ADIF  |  ADIE  |  ADPS2  |  ADPS1  |  ADPS0  |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

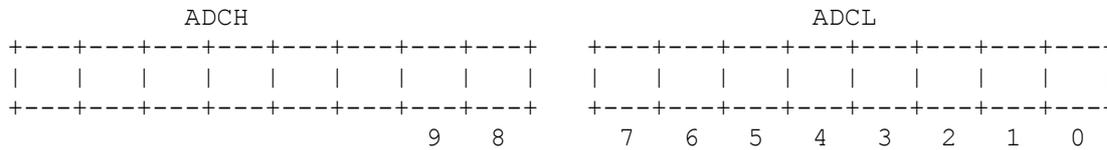
- **ADEN (ADC Enable):** Mittels ADEN wird der ADC ein und ausgeschaltet. Eine 1 an dieser Bitposition schaltet den ADC ein.
- **ADSC (ADC Start Conversion):** Wird eine 1 an diese Bitposition geschrieben, so beginnt der ADC mit der Wandlung. Das Bit bleibt auf 1, solange die Wandlung im Gange ist. Wenn die Wandlung beendet ist, wird dieses Bit von der ADC Hardware wieder auf 0 gesetzt.
- **ADFR (ADC Free Running):** Wird eine 1 an ADFR geschrieben, so wird der ADC im Free Running Modus betrieben. Dabei startet der **ADC** nach dem Abschluss einer Messung automatisch die nächste Messung. Die erste Messung wird ganz normal über das Setzen des **ADSC** Bits gestartet.
- **ADIF (ADC Interrupt Flag):** Wenn eine Messung abgeschlossen ist, wird das ADIF Bit gesetzt. Ist zusätzlich noch das *ADIE* Bit gesetzt, so wird ein Interrupt ausgelöst und der entsprechende Interrupt Handler angesprochen.
- **ADIE (ADC Interrupt Enable):** Wird eine 1 an ADIE geschrieben, so löst der **ADC** nach Beendigung einer Messung einen Interrupt aus.
- **ADPS2, ADPS1, ADPS0 (ADC Prescaler):** Mit dem Prescaler kann die ADC-Frequenz gewählt werden. Laut Datenblatt sollte diese für die optimale Auflösung zwischen 50KHz und 200kHz liegen. Ist die Wandlerfrequenz langsamer eingestellt, kann es passieren dass die eingebaute Sample & Hold Schaltung die Eingangsspannung nicht lange genug konstant halten kann. Ist die Frequenz aber zu schnell eingestellt, dann kann es passieren dass sich die Sample & Hold Schaltung nicht schnell genug an die Eingangsspannung anpassen kann.

ADPS2 ADPS1 ADPS0 Vorteiler

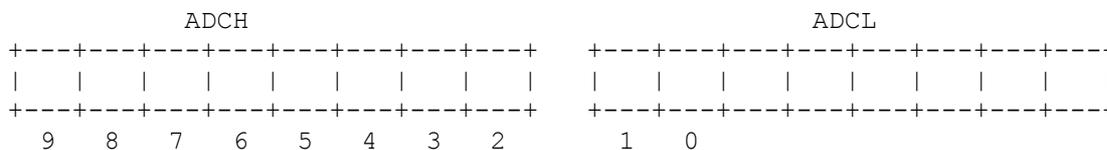
0	0	0	2
0	0	1	2
0	1	0	4
0	1	1	8
1	0	0	16
1	0	1	32
1	1	0	64
1	1	1	128

15.6 Die Ergebnisregister ADCL und ADCH

Da das Ergebnis des ADC ein 10 Bit Wert ist, passt dieser Wert naturgemäß nicht in ein einzelnes Register, das je bekanntlich nur 8 Bit breit ist. Daher wird das Ergebnis in 2 Register **ADCL** und **ADCH** abgelegt. Von den 10 Ergebnisbits sind die niederwertigsten 8 im Register **ADCL** abgelegt und die noch fehlenden 2 Bits werden im Register **ADCH** an den niederwertigsten Bitpositionen gespeichert.



Diese Zuordnung kann aber auch geändert werden: Durch setzen des **ADLAR** Bits im **ADMUX** Register wird die Ausgabe geändert zu:



Dies ist besonders dann interessant, wenn das ADC Ergebnis als 8 Bit Zahl weiterverarbeitet werden soll. In diesem Fall stehen die 8 höchstwertigen Bits bereits verarbeitungsfertig im Register **ADCH** zur Verfügung.

Beim Auslesen der ADC-Register ist zu beachten: Immer zuerst **ADCL** und erst dann **ADCH** auslesen. Beim Zugriff auf **ADCL** wird das **ADCH** Register gegenüber Veränderungen vom **ADC** gesperrt. Erst beim nächsten Auslesen des **ADCH**-Registers wird diese Sperre wieder aufgehoben. Dadurch ist sichergestellt, daß die Inhalte von **ADCL** und **ADCH** immer aus demselben Wandlungsergebnis stammen, selbst wenn der **ADC** im Hintergrund selbsttätig weiterwandelt. Das **ADCH** Register **muss** ausgelesen werden!

15.7 Beispiele

15.7.1 Ausgabe als ADC-Wert

Das folgende Programm liest in einer Schleife ständig den ADC aus und verschickt das Ergebnis im Klartext (ASCII) über die [UART](#). Zur Verringerung des unvermeidlichen Rauschens werden 256 Messwerte herangezogen und deren Mittelwert als endgültiges Messergebnis gewertet. Dazu werden die einzelnen Messungen in den Registern temp2, temp3, temp4 als 24 Bit Zahl aufaddiert. Die Division durch 256 erfolgt dann ganz einfach dadurch, dass das Register temp2 verworfen wird und die Register temp3 und temp4 als 16 Bit Zahl aufgefasst werden. Eine Besonderheit ist noch, dass je nach dem Wert in temp2 die 16 Bit Zahl in temp3 und temp4 noch aufgerundet wird: Enthält temp2 einen Wert größer als 128, dann wird zur 16 Bit Zahl in temp3/temp4 noch 1 dazu addiert.

In diesem Programm findet man oft die Konstruktion

```
subi    temp3, low(-1)      ; addieren von 1
sbci    temp4, high(-1)    ; addieren des Carry
```

Dabei handelt es sich um einen kleinen Trick. Um eine Konstante zu einem Register direkt addieren zu können bauchte man dazu ein Befehl ala addi (Add Immediate, Addiere Konstante), den der AVR aber nicht hat. Ebenso gibt es kein adci (Add with carry Immediate, Addiere Konstante mit Carry Flag). Man müsste also erst eine Konstante in ein Register laden und addieren. Das kostet aber Programmspeicher, Rechenzeit und man muss ein Register zusätzlich frei haben.

```
; 16 Bit Addition mit Konstante, ohne Cleverness
ldi    temp5, low(1)
add    temp3, temp5      ; addieren von 1
ldi    temp5, high(1)
add    temp3, temp5      ; addieren des Carry
```

Hier greift man einfach zu dem Trick, dass eine Addition gleich der Subtraktion der negativen Werts ist. Also "addiere +1" ist gleich "subtrahiere -1". Dafür hat der AVR zwei Befehle, subi (Subtract Immediate, Subtrahiere Konstante) und sbci (Subtract Immediate with carry, Subtrahiere Konstante mit Carry Flag).

```
.include "m8def.inc"

.def temp1    = r16      ; allgemeines temp Register, zur krufurstigen Verwendung
.def temp2    = r17      ; Register für 24 Bit Addition, Lowest Byte
.def temp3    = r18      ; Register für 24 Bit Addition, Middle Byte
.def temp4    = r19      ; Register für 24 Bit Addition, Highest Byte
.def adlow    = r20      ; Ergebnis vom ADC / Mittelwert der 256 Messungen
.def adhigh   = r21      ; Ergebnis vom ADC / Mittelwert der 256 Messungen
.def messungen = r22      ; Schleifenzähler für die Messungen
.def ztausend  = r23      ; Zehntausenderstelle des ADC Wertes
.def tausend   = r24      ; Tausenderstelle des ADC Wertes
.def hundert   = r25      ; Hunderterstelle des ADC Wertes
.def zehner    = r26      ; Zehnerstelle des ADC Wertes
.def zeichen   = r27      ; Zeichen zur Ausgabe auf den UART

.equ F_CPU = 4000000      ; Systemtakt in Hz
.equ BAUD  = 9600         ; Baudrate

; Berechnungen
.equ UBRR_VAL = ((F_CPU+BAUD*8)/(BAUD*16)-1) ; clever runden
.equ BAUD_REAL = (F_CPU/(16*(UBRR_VAL+1))) ; Reale Baudrate
.equ BAUD_ERROR = ((BAUD_REAL*1000)/BAUD-1000) ; Fehler in Promille

.if ((BAUD_ERROR>10) || (BAUD_ERROR<-10)) ; max. +/-10 Promille Fehler
  .error "Systematischer Fehler der Baudrate grösser 1 Prozent und damit zu hoch!"
.endif

; hier geht das Programm los

ldi    temp1, LOW(RAMEND)      ; Stackpointer initialisieren
out    SPL, temp1
ldi    temp1, HIGH(RAMEND)
out    SPH, temp1

;UART Initalisierung

ldi    temp1, LOW(UBRR_VAL)    ; Baudrate einstellen
out    UBRRL, temp1
ldi    temp1, HIGH(UBRR_VAL)
out    UBRRH, temp1

sbi    UCSRB, TXEN            ; TX einschalten

; ADC initialisieren: Single Conversion, Vorteiler 128
```

```

ldi    temp1, (1<<REFS0)           ; Kanal 0, interne Referenzspannung 5V
out    ADMUX, temp1
ldi    temp1, (1<<ADEN) | (1<<ADPS2) | (1<<ADPS1) | (1<<ADPS0)
out    ADCSRA, temp1

Main:
clr    temp1
clr    temp2
clr    temp3
clr    temp4

ldi    messungen, 0                ; 256 Schleifendurchläufe

; neuen ADC-Wert lesen (Schleife - 256 mal)

sample_adc:
sbi    ADCSRA, ADSC                ; den ADC starten

wait_adc:
sbic   ADCSRA, ADSC                ; wenn der ADC fertig ist, wird dieses Bit gelöscht
rjmp   wait_adc

; ADC einlesen:

in     adlow, ADCL                  ; immer zuerst LOW Byte lesen
in     adhigh, ADCH                 ; danach das mittlerweile gesperrte High Byte

; alle 256 ADC-Werte addieren
; dazu wird mit den Registern temp4, temp3 und temp2 ein
; 24-Bit breites Akkumulationsregister gebildet, in dem
; die 10 Bit Werte aus adhigh, adlow aufsummiert werden

add    temp2, adlow                 ; addieren
adc    temp3, adhigh                ; addieren über Carry
adc    temp4, temp1                 ; addieren über Carry, temp1 enthält 0
dec    messungen                    ; Schleifenzähler MINUS 1
brne   sample_adc                  ; wenn noch keine 256 ADC Werte -> nächsten Wert einlesen

; Aus den 256 Werten den Mittelwert berechnen
; Mathematisch eine Division durch 256
; Da aber 2^8 = 256 ist ist da einfach durch das weglassen des niederwertigsten Bytes
; erreicht werden
;
; allerdings wird der Wert noch gerundet

cpi    temp2, 128                   ; "Kommastelle" kleiner als 128 ?
brlo   no_round                     ; ist kleiner ==> Sprung

; Aufrunden
subi   temp3, low(-1)               ; addieren von 1
sbci   temp4, high(-1)              ; addieren des Carry

no_round:

; Ergebnis nach adlow und adhigh kopieren
; damit die temp Register frei werden

mov    adlow, temp3
mov    adhigh, temp4

; in ASCII umwandeln
; Division durch mehrfache Subtraktion

ldi    ztausend, '0'-1              ; Ziffernzähler direkt als ASCII Code

```

```

Z_ztausend:
    inc     ztausend
    subi   adlow, low(10000)    ; -10,000
    sbci   adhigh, high(10000) ; 16 Bit
    brcc   Z_ztausend

    subi   adlow, low(-10000)   ; nach Unterlauf wieder einmal addieren
    sbci   adhigh, high(-10000); +10,000

    ldi    tausend, '0'-1      ; Ziffernzähler direkt als ASCII Code
Z_tausend:
    inc     tausend
    subi   adlow, low(1000)     ; -1,000
    sbci   adhigh, high(1000)  ; 16 Bit
    brcc   Z_tausend

    subi   adlow, low(-1000)    ; nach Unterlauf wieder einmal addieren
    sbci   adhigh, high(-1000) ; +1,000

    ldi    hundert, '0'-1      ; Ziffernzähler direkt als ASCII Code
Z_hundert:
    inc     hundert
    subi   adlow, low(100)      ; -100
    sbci   adhigh, high(100)   ; 16 Bit
    brcc   Z_hundert

    subi   adlow, low(-100)     ; nach Unterlauf wieder einmal addieren
    sbci   adhigh, high(-100)  ; +100

    ldi    zehner, '0'-1       ; Ziffernzähler direkt als ASCII Code
Z_zehner:
    inc     zehner
    subi   adlow, low(10)       ; -10
    sbci   adhigh, high(10)    ; 16 Bit
    brcc   Z_zehner

    subi   adlow, low(-10)      ; nach Unterlauf wieder einmal addieren
    sbci   adhigh, high(-10)   ; +10

    subi   adlow, -'0'          ; adlow enthält die Einer, Umwandlung in ASCII

;an UART Senden

    mov    zeichen, ztausend    ; Zehntausender Stelle
    rcall  transmit
    mov    zeichen, tausend     ; Tausender Stelle ausgeben
    rcall  transmit
    mov    zeichen, hundert     ; Hunderter Stelle ausgeben
    rcall  transmit
    mov    zeichen, zehner      ; Zehner Stelle ausgeben
    rcall  transmit
    mov    zeichen, adlow       ; Einer Stelle ausgeben
    rcall  transmit
    ldi    zeichen, 13          ; CR, Carrige Return (Wagenrücklauf)
    rcall  transmit
    ldi    zeichen, 10         ; LF, Line Feed (Neue Zeile)
    rcall  transmit

    rjmp   Main

transmit:
    sbis   UCSRA,UDRE          ; Warten, bis UDR bereit ist ...
    rjmp   transmit
    out    UDR, zeichen        ; und Zeichen ausgeben

```

ret

15.7.2 Ausgabe als Spannungswert

Das zweite Beispiel ist schon um einiges größer. Hier wird der gemittelte ADC-Wert in eine Spannung umgerechnet. Dazu wird [Festkommaarithmetik](#) verwendet. Die Daten sind in diesem Fall

- Referenzspannung : 5V
- alte Auflösung : $5V / 1024 = 4,8828125mV$
- neue Auflösung : 1mV

-> Faktor = $4,8828125mV / 1mV = 4,8828125$

Der Faktor wird dreimal mit 10 multipliziert und das Ergebnis auf 4883 gerundet. Die neue Auflösung wird dreimal durch 10 dividiert und beträgt 1µV. Der relative Fehler beträgt

$$F_r = \frac{4883}{4882,8125} - 1 = 0,00384\% = \frac{1}{26042}$$

Diese Fehler ist absolut vernachlässigbar. Nach der Multiplikation des ADC-Wertes mit 4883 liegt die gemessene Spannung in der Einheit µV vor. Vorsicht! Das ist **nicht** die reale [Auflösung und Genauigkeit](#), nur rein mathematisch bedingt. Für maximale Genauigkeit sollte man die Versorgungsspannung AVCC, welche hier gleichzeitig als Referenzspannung dient, exakt messen, die Rechnung nachvollziehen und den Wert im Quelltext eintragen. Damit führt man eine einfache Einpunktkalibrierung durch.

Da das Programm schon um einiges größer und komplexer ist, wurde es im Vergleich zur Vorgängerversion geändert. Die Multiplikation sowie die Umwandlung der Zahl in einen ASCII-String sind als Unterprogramme geschrieben, dadurch erhält man wesentlich mehr Überblick im Hauptprogramm und die Wiederverwendung in anderen Programmen vereinfacht sich. Ausserdem wird der String im RAM gespeichert und nicht mehr in CPU-Registern. Die Berechnung der einzelnen Ziffern erfolgt über eine Schleife, das ist kompakter und übersichtlicher.

```
.include "m8def.inc"

.def z0      = r1      ; Zahl für Integer -> ASCII Umwandlung
.def z1      = r2
.def z2      = r3
.def z3      = r4
.def temp1   = r16     ; allgemeines Register, zur kurzfristigen
                       ; Verwendung
.def temp2   = r17     ; Register für 24 Bit Addition, niederwertigstes
                       ; Byte (LSB)
.def temp3   = r18     ; Register für 24 Bit Addition, mittlerers Byte
.def temp4   = r19     ; Register für 24 Bit Addition, höchstwertigstes
                       ; Byte (MSB)
.def adlow   = r20     ; Ergebnis vom ADC-Mittelwert der 256 Messungen
.def adhigh  = r21     ; Ergebnis vom ADC-Mittelwert der 256 Messungen
.def messungen = r22   ; Schleifenzähler für die Messungen
.def zeichen = r23     ; Zeichen zur Ausgabe auf den UART
.def temp5   = r24
.def temp6   = r25

; Faktor für Umrechnung des ADC-Wertes in Spannung
; = (Referenzspannung / 1024 ) * 100000
; = 5V / 1024 * 1.000.000
.equ Faktor = 4883
```

```

.equ F_CPU = 4000000          ; Systemtakt in Hz
.equ BAUD = 9600             ; Baudrate

; Berechnungen
.equ UBRR_VAL = ((F_CPU+BAUD*8)/(BAUD*16)-1) ; clever runden
.equ BAUD_REAL = (F_CPU/(16*(UBRR_VAL+1))) ; Reale Baudrate
.equ BAUD_ERROR = ((BAUD_REAL*1000)/BAUD-1000) ; Fehler in Promille

.if ((BAUD_ERROR>10) || (BAUD_ERROR<-10)) ; max. +/-10 Promille Fehler
.error "Systematischer Fehler der Baudrate grösser 1 Prozent und damit zu
hoch!"
.endif

; RAM
.dseg
.org 0x60
Puffer: .byte 10

; hier geht das Programm los
.cseg
.org 0

    ldi    temp1, LOW(RAMEND)          ; Stackpointer initialisieren
    out    SPL, temp1
    ldi    temp1, HIGH(RAMEND)
    out    SPH, temp1

;UART Initalisierung

    ldi    temp1, LOW(UBRR_VAL)        ; Baudrate einstellen
    out    UBRR_L, temp1
    ldi    temp1, HIGH(UBRR_VAL)
    out    UBRR_H, temp1

    sbi    UCSRB, TXEN                ; TX einschalten

; ADC initialisieren: Single Conversion, Vorteiler 128
; Kanal 0, interne Referenzspannung AVCC

    ldi    temp1, (1<<REFS0)
    out    ADMUX, temp1
    ldi    temp1, (1<<ADEN) | (1<<ADPS2) | (1<<ADPS1) | (1<<ADPS0)
    out    ADCSRA, temp1

Hauptschleife:
    clr    temp1
    clr    temp2
    clr    temp3
    clr    temp4

    ldi    messungen, 0                ; 256 Schleifendurchläufe

; neuen ADC-Wert lesen (Schleife - 256 mal)

adc_messung:
    sbi    ADCSRA, ADSC                ; den ADC starten

adc_warten:
    sbic   ADCSRA, ADSC                ; wenn der ADC fertig ist, wird dieses Bit
                                        ; gelöscht
    rjmp   adc_warten

; ADC einlesen:

```

```

in      adlow, ADCL          ; immer zuerst LOW Byte lesen
in      adhigh, ADCH        ; danach das mittlerweile gesperrte High Byte

; alle 256 ADC-Werte addieren
; dazu wird mit den Registern temp4, temp3 und temp2 ein
; 24-Bit breites Akkumulationsregister gebildet, in dem
; die 10 Bit Werte aus adhigh, adlow aufsummiert werden

add     temp2, adlow         ; addieren
adc     temp3, adhigh        ; addieren über Carry
adc     temp4, temp1         ; addieren über Carry, temp1 enthält 0
dec     messungen           ; Schleifenzähler MINUS 1
brne   adc_messung          ; wenn noch keine 256 ADC Werte -> nächsten
Wert einlesen

; Aus den 256 Werten den Mittelwert berechnen
; Bei 256 Werten ist das ganz einfach: Das niederwertigste Byte
; (im Register temp2) fällt einfach weg
;
; allerdings wird der Wert noch gerundet

cpi     temp2, 128           ; "Kommastelle" kleiner als 128 ?
brlo   nicht_runden        ; ist kleiner ==> Sprung

; Aufrunden
subi   temp3, low(-1)       ; addieren von 1
sbci   temp4, high(-1)     ; addieren des Carry

nicht_runden:

; Ergebnis nach adlow und adhigh kopieren
; damit die temp Register frei werden

mov     adlow, temp3
mov     adhigh, temp4

; in Spannung umrechnen

ldi     temp5, low(Faktor)
ldi     temp6, high(Faktor)
rcall   mul_16x16

; in ASCII umwandeln

ldi     XL, low(Puffer)
ldi     XH, high(Puffer)
rcall   Int_to_ASCII

;an UART Senden

ldi     ZL, low(Puffer+3)
ldi     ZH, high(Puffer+3)
ldi     temp1, 1
rcall   sende_zeichen      ; eine Vorkommastelle ausgeben

ldi     zeichen, ','       ; Komma ausgeben
rcall   sende_einzelzeichen

ldi     temp1, 3           ; Drei Nachkommastellen ausgeben
rcall   sende_zeichen

ldi     zeichen, 'V'       ; Volt Zeichen ausgeben
rcall   sende_einzelzeichen

```

```

ldi    zeichen, 10      ; New Line Steuerzeichen
rcall  sende_einzelzeichen

ldi    zeichen, 13     ; Carrige Return Steuerzeichen
rcall  sende_einzelzeichen

rjmp   Hauptschleife

; Ende des Hauptprogramms

; Unterprogramme

; ein Zeichen per UART senden

sende_einzelzeichen:
sbis   UCSRA,UDRE      ; Warten, bis UDR bereit ist ...
rjmp   sende_einzelzeichen
out    UDR, zeichen    ; und Zeichen ausgeben
ret

; mehrere Zeichen ausgeben, welche durch Z adressiert werden
; Anzahl in temp1

sende_zeichen:
sbis   UCSRA,UDRE      ; Warten, bis UDR bereit ist ...
rjmp   sende_zeichen
ld     zeichen, Z+      ; Zeichen laden
out    UDR, zeichen    ; und Zeichen ausgeben
dec    temp1
brne   sende_zeichen
ret

; 32 Bit Zahl in ASCII umwandeln
; Zahl liegt in temp1..4
; Ergebnis ist ein 10stelliger ASCII String, welcher im SRAM abgelegt wird
; Adressierung über X Pointer
; mehrfache Subtraktion wird als Ersatz für eine Division durchgeführt.

Int_to_ASCII:

push   ZL               ; Register sichern
push   ZH
push   temp5
push   temp6

ldi    ZL,low(Tabelle*2) ; Zeiger auf Tabelle
ldi    ZH,high(Tabelle*2)
ldi    temp5, 10        ; Schleifenzähler

Int_to_ASCII_schleife:
ldi    temp6, -1+'0'    ; Ziffernzähler zählt direkt im ASCII Code
lpm    z0,Z+            ; Nächste Zahl laden
lpm    z1,Z+
lpm    z2,Z+
lpm    z3,Z+

Int_to_ASCII_ziffer:
inc    temp6            ; Ziffer erhöhen
sub    temp1, z0        ; Zahl subrahieren
sbc    temp2, z1        ; 32 Bit
sbc    temp3, z2
sbc    temp4, z3
brge   Int_to_ASCII_ziffer ; noch kein Unterlauf, nochmal

```

```

add    temp1, z0          ; Unterlauf, einmal wieder addieren
adc    temp2, z1          ; 32 Bit
adc    temp3, z2
adc    temp4, z3
st     X+,temp6          ; Ziffer speichern
dec    temp5
brne   Int_to_ASCII_schleife ; noch eine Ziffer?

pop    temp6
pop    temp5
pop    ZH
pop    ZL                ; Register wieder herstellen
ret

; Tabelle mit Zahlen für die Berechnung der Ziffern
; 1 Milliarde bis 1
Tabelle:
.dd 1000000000, 100000000, 10000000, 1000000, 100000, 10000, 1000, 100, 10, 1

; 16 Bit Wert in Spannung umrechnen
;
; = 16Bitx16Bit=32 Bit Multiplikation
; = vier 8x8 Bit Multiplikationen
;
; adlow/adhigh * temp5/temp6

mul_16x16:
push   zeichen
clr    temp1              ; 32 Bit Akku löschen
clr    temp2
clr    temp3
clr    temp4
clr    zeichen           ; Null, für Carry-Addition

mul    adlow, temp5       ; erste Multiplikation
add    temp1, r0          ; und akkumulieren
adc    temp2, r1

mul    adhigh, temp5      ; zweite Multiplikation
add    temp2, r0          ; und gewichtet akkumulieren
adc    temp3, r1

mul    adlow, temp6       ; dritte Multiplikation
add    temp2, r0          ; und gewichtet akkumulieren
adc    temp3, r1
adc    temp4, zeichen     ; carry addieren

mul    adhigh, temp6      ; vierte Multiplikation
add    temp3, r0          ; und gewichtet akkumulieren
adc    temp4, r1

pop    zeichen
ret

```

Für alle, die es besonders eilig haben gibt es hier eine geschwindigkeitsoptimierte Version der Integer in ASCII Umwandlung. Zunächst wird keine Schleife verwendet sondern alle Stufen der Schleife direkt hingeschrieben. Das braucht zwar mehr Programmspeicher, ist aber schneller. Ausserdem wird abwechselnd subtrahiert und addiert, dadurch entfällt das immer wieder notwendige addieren nach dem Unterlauf. Zu guter Letzt werden die Berechnungen nur mit der minimal notwendigen Wortbreite durchgeführt. Am Anfang mit 32 Bit, dann nur noch mit 16 bzw. 8 Bit.

```
; 32 Bit Zahl in ASCII umwandeln
; geschwindigkeitsoptimierte Version
; Zahl liegt in temp1..4
; Ergebnis ist ein 10stelliger ASCII String, welcher im SRAM abgelegt wird
; Adressierung über X Pointer
```

```
Int_to_ASCII:
    ldi    temp5, -1 + '0'
    _a1ser:
        inc    temp5
        subi   temp1, BYTE1(100000000) ; - 1.000.000.000
        sbci   temp2, BYTE2(100000000)
        sbci   temp3, BYTE3(100000000)
        sbci   temp4, BYTE4(100000000)
        brcc   _a1ser

        st     X+, temp5                ; im Puffer speichern
        ldi    temp5, 10 + '0'
    _a2ser:
        dec    temp5
        subi   temp1, BYTE1(-100000000) ; + 100.000.000
        sbci   temp2, BYTE2(-100000000)
        sbci   temp3, BYTE3(-100000000)
        sbci   temp4, BYTE4(-100000000)
        brcs   _a2ser

        st     X+, temp5                ; im Puffer speichern
        ldi    temp5, -1 + '0'
    _a3ser:
        inc    temp5
        subi   temp1, low(1000000)      ; - 10.000.000
        sbci   temp2, high(1000000)
        sbci   temp3, BYTE3(1000000)
        brcc   _a3ser

        st     X+, temp5                ; im Puffer speichern
        ldi    temp5, 10 + '0'
    _a4ser:
        dec    temp5
        subi   temp1, low(-100000)     ; + 1.000.000
        sbci   temp2, high(-100000)
        sbci   temp3, BYTE3(-100000)
        brcs   _a4ser

        st     X+, temp5                ; im Puffer speichern
        ldi    temp5, -1 + '0'
    _a5ser:
        inc    temp5
        subi   temp1, low(100000)      ; -100.000
        sbci   temp2, high(100000)
        sbci   temp3, BYTE3(100000)
        brcc   _a5ser

        st     X+, temp5                ; im Puffer speichern
```

```

    ldi    temp5, 10 + '0'
_a6ser:
    dec    temp5
    subi   temp1, low(-10000)    ; +10,000
    sbci   temp2, high(-10000)
    sbci   temp3, BYTE3(-10000)
    brcs   _a6ser

    st     X+,temp5              ; im Puffer speichern
    ldi    temp5, -1 + '0'
_a7ser:
    inc    temp5
    subi   temp1, low(1000)      ; -1000
    sbci   temp2, high(1000)
    brcc   _a7ser

    st     X+,temp5              ; im Puffer speichern
    ldi    temp5, 10 + '0'
_a8ser:
    dec    temp5
    subi   temp1, low(-100)     ; +100
    sbci   temp2, high(-100)
    brcs   _a8ser

    st     X+,temp5              ; im Puffer speichern
    ldi    temp5, -1 + '0'
_a9ser:
    inc    temp5
    subi   temp1, 10            ; -10
    brcc   _a9ser

    st     X+,temp5              ; im Puffer speichern
    ldi    temp5, 10 + '0'
_a10ser:
    dec    temp5
    subi   temp1, -1            ; +1
    brcs   _a10ser

    st     X+,temp5              ; im Puffer speichern
    ret

```

16 AVR-Tutorial: Tasten

Bisher beschränkten sich die meisten Programme auf reine Ausgabe an einem Port. Möchte man Eingaben machen, so ist der Anschluss von Tasten an einen Port unumgänglich. Dabei erheben sich aber 2 Probleme

- Wie kann man erreichen, dass ein Tastendruck nur einmal ausgewertet wird?
- Tasten müssen entprellt werden

16.1 Erkennung von Flanken am Tasteneingang

Möchte man eine Taste auswerten, bei der eine Aktion nicht ausgeführt werden soll, *solange* die Taste gedrückt ist, sondern nur einmal *beim Drücken* einer Taste, dann ist eine Erkennung der Schaltflanke der Weg zum Ziel. Anstatt eine gedrückte Taste zu erkennen, wird bei einer Flankenerkennung der Wechsel des Zustands des Eingangspins detektiert. Dazu vergleicht man in regelmäßigen Zeitabständen den momentanen Zustand des Eingangs mit dem Zustand zum vorhergehenden Zeitpunkt. Unterscheiden sich die beiden, so hat man eine Schaltflanke erkannt und kann darauf reagieren. Solange sich der Tastenzustand nicht ändert, egal ob die Taste gedrückt oder losgelassen ist, unternimmt man nichts.

Die Erkennung des Zustandswechsels kann am einfachsten mit einer XOR (Exklusiv Oder) Verknüpfung durchgeführt werden.

A B Ergebnis

```
0 0 0
1 0 1
0 1 1
1 1 0
```

Nur dann, wenn sich der Zustand A vom Zustand B unterscheidet, taucht im Ergebnis eine 1 auf. Sind A und B gleich, so ist das Ergebnis 0.

A ist bei uns der vorhergehende Zustand eines Tasters, B ist der jetzige Zustand so wie er vom Port Pin eingelesen wurde. Verknüpft man die beiden mit einem XOR, so bleiben im Ergebnis genau an jenen Bitpositionen 1en übrig, an denen sich der jetzige Zustand vom vorhergehenden unterscheidet.

Nun ist bei Tastern aber nicht nur der erkannte Flankenwechsel interessant, sondern auch in welchen Zustand die Taste gewechselt hat:

- Ist dieser 0, so wurde die Taste gedrückt.
- Ist dieser 1, so wurde die Taste losgelassen.

Eine einfache UND Verknüpfung der Tastenflags mit dem XOR Ergebnis liefert diese Information

```

.include "m8def.inc"

.def key_old = r3
.def key_now = r4

.def temp1 = r17
.def temp2 = r18

.equ key_pin = PIND
.equ key_port = PORTD
.equ key_ddr = DDRD

.equ led_port = PORTB
.equ led_ddr = DDRB
.equ LED = 0

    ldi temp1, 1<<LED
    out led_ddr, temp1           ; den LED Port auf Ausgang

    ldi temp1, $00
    out key_ddr, temp1          ; den Key Port auf Eingang schalten
    ldi temp1, $FF
    out key_port, temp1        ; die Pullup Widerstände aktivieren

    mov key_old, temp1         ; bisher war kein Taster gedrückt

loop:
    in key_now, key_pin        ; den jetzigen Zustand der Taster holen
    mov temp1, key_now         ; und in temp1 sichern
    eor key_now, key_old       ; mit dem vorhergehenden Zustand XOR
    mov key_old, temp1         ; und den jetzigen Zustand für den nächsten
                                ; Schleifendurchlauf als alten Zustand merken

    breq loop                  ; Das Ergebnis des XOR auswerten:
                                ; wenn keine Taste gedrückt war
                                ; -> neuer Schleifendurchlauf

    and temp1, key_now         ; War das ein 1->0 Übergang, wurde der Taster
                                ; also gedrückt
                                ; (in key_now steht das Ergebnis vom XOR)

    brne loop                  ;

    in temp1, led_port         ; den Zustand der LED umdrehen
    com temp1
    out led_port, temp1

    jmp loop

```

Probiert man diese Implementierung aus, so stellt man fest: Sie funktioniert nicht besonders gut. Es kann vorkommen, dass bei einem Tastendruck die LED zwar kurzzeitig umschaltet aber gleich darauf wieder ausgeht. Genauso gut kann es passieren, dass die LED beim Loslassen einer Taste ebenfalls wieder den Zustand wechselt. Die Ursache dafür ist: Taster prellen.

16.2 Prellen

Das Prellen entsteht in der Mechanik der Tasten: Eine Kontaktfeder wird durch das Drücken des Tastelements auf einen anderen Kontakt gedrückt. Wenn die Kontaktfeder das Kontaktfeld berührt, federt sie jedoch nach. Dies kann soweit gehen, dass die Feder wieder vom Feld abhebt und den elektrischen Kontakt kurzzeitig wieder unterbricht. Auch wenn diese Effekte sehr kurz sind, sind sie für einen Mikrocontroller viel zu lang. Für ihn sieht die Situation so aus, dass beim Drücken der Taste eine Folge von: *Taste geschlossen, Taste offen, Taste geschlossen, Taste offen* Ereignissen am Port sichtbar sind, die sich dann nach einiger Zeit auf den Zustand *Taste geschlossen* einpendelt.



16.3 Entprellung

Aus diesem Grund müssen Tasten entprellt werden. Im Prinzip kann eine Entprellung sehr einfach durchgeführt werden. Ein 'Tastendruck' wird nicht bei der Erkennung der ersten Flanke akzeptiert, sondern es wird noch eine zeitlang gewartet. Ist nach Ablauf dieser Zeitdauer die Taste immer noch gedrückt, dann wird diese Flanke als Tastendruck akzeptiert und ausgewertet.

```
.include "m8def.inc"

.def key_old = r3
.def key_now = r4

.def temp1 = r17
.def temp2 = r18

.equ key_pin = PIND
.equ key_port = PORTD
.equ key_ddr = DDRD

.equ led_port = PORTB
.equ led_ddr = DDRB
.equ LED = 0

    ldi temp1, 1<<LED
    out led_ddr, temp1           ; den Led Port auf Ausgang

    ldi temp1, $00
    out key_ddr, temp1          ; den Key Port auf Eingang schalten
    ldi temp1, $FF
    out key_port, temp1         ; die Pullup Widerstände aktivieren

    mov key_old, temp1          ; bisher war kein Taster gedrückt

loop:
```

```
in    key_now, key_pin      ; den jetzigen Zustand der Taster holen
mov   temp1, key_now       ; und in temp1 sichern
eor   key_now, key_old     ; mit dem vorhergehenden Zustand XOR
mov   key_old, temp1      ; und den jetzigen Zustand für den nächsten
                               ; Schleifendurchlauf als alten Zustand merken

breq  loop                 ; Das Ergebnis des XOR auswerten:
                               ; wenn keine Taste gedrückt war
                               ; -> neuer Schleifendurchlauf

and   temp1, key_now       ; War das ein 1->0 Übergang, wurde der Taster
                               ; also gedrückt
                               ; (in key_now steht das Ergebnis vom XOR)

brne  loop                 ;

ldi   temp1, $FF          ; ein bisschen warten ...
wait1:
ldi   temp2, $FF
wait2:
dec   temp2
brne  wait2
dec   temp1
brne  wait1

                               ; ... und nachsehen, ob die Taste immer noch
                               ; gedrückt ist

in    temp1, key_pin
and   temp1, key_now
brne  loop

in    temp1, led_port      ; den Zustand der LED umdrehen
com   temp1
out   led_port, temp1

jmp   loop
```

Wie lange gewartet werden muss, hängt im wesentlichen von der mechanischen Qualität und dem Zustand des Tasters ab. Neue und qualitativ hochwertige Taster prellen wenig, ältere Taster prellen mehr. Grundsätzlich prellen aber alle mechanischen Taster irgendwann. Man sollte nicht dem Trugschluss verfallen, daß ein Taster nur weil er heute nicht erkennbar prellt, dieses auch in einem halben Jahr nicht tut.


```

or      key_state, iwr0      ;          11101011
and     iwr0, key_old       ;                               00000011
eor     key_state, iwr0     ;          11101000
and     iwr1, iwr0         ;                               00000010
or      key_press, iwr1     ; gedrückte Taste merken
;
;
pop     iwr1                ; Register wiederherstellen
pop     iwr0
pop     r0
out     SREG, r0
pop     r0
reti

init:
ldi     temp1, LOW(RAMEND)   ; Stackpointer initialisieren
out     SPL, temp1
ldi     temp1, HIGH(RAMEND)
out     SPH, temp1

ldi     temp1, 0xFF
out     led_dds, temp1

ldi     temp1, 0xFF         ; Tasten sind auf Eingang
out     key_port, temp1    ; Pullup Widerstände ein

ldi     temp1, 1<<CS02 | 1<<CS00 ; Timer mit Vorteiler 1024
out     TCCR0, temp1
ldi     temp1, 1<<TOIE0     ; Timer Overflow Interrupt einrichten
out     TIMSK, temp1

clr     key_old             ; die Register für die Tastenauswertung im
clr     key_state          ; Timer Interrupt initialisieren
clr     key_press

sei

ldi     leds, 0xFF
out     led_port, leds

main:
cli
mov     temp1, key_press   ; Einen ev. Tastendruck merken und ...
clr     key_press         ; Tastendruck zurücksetzen
sei

cpi     temp1, 0           ; Tastendruck auswerten. Wenn eine von
; 8 Tasten
breq    main              ; gedrückt worden wäre, wäre ein
; entsprechendes Bit in key_press gesetzt
; gewesen

eor     leds, temp1       ; Die zur Taste gehörende Led umschalten
out     led_port, leds
rjmp   main

```

16.4.2 Tastenentprellung, Abfrage und Autorepeat

Gerade bei Zahlenreihen ist oft eine **Autorepeat** Funktion eine nützliche Einrichtung: Drückt der Benutzer eine Taste wird eine Funktion ausgelöst. Drückt er eine Taste und hält sie gedrückt, so setzt nach kurzer Zeit der **Autorepeat** ein. Das System verhält sich so, als ob die Taste in schneller Folge immer wieder gedrückt und wieder losgelassen würde.

Leider muss hier für die Wartezeit ein Register im oberen Bereich benutzt werden. Der **ldi** Befehl macht dies notwendig. Alternativ könnte man die Wartezeiten beim Init in eines der unteren Register laden und von dort das *Repeat Timer* Register **key_rep** jeweils nachladen.

Alternativ wurde in diesem Code auch die Rolle des Registers **key_state** umgedreht. Ein gesetztes 1 Bit bedeutet hier, dass die zugehörige Taste zur Zeit gedrückt ist.

Insgesamt ist dieser Code eine direkte Umsetzung des von Herrn Danegger vorgestellten C-Codes. Durch die Möglichkeit eines Autorepeats bei gedrückter Taste erhöhen sich die Möglichkeiten im Aufbau von Benutzereingaben enorm. Das bisschen Mehraufwand im Vergleich zum vorher vorgestellten Code, rechtfertigt dies auf jeden Fall.

```
.include "m8def.inc"

.def iwr0          = r1
.def iwr1          = r2

.def key_state     = r4
.def key_press    = r5
.def key_rep_press = r6
.def key_rep       = r16

.def temp1        = r17

.equ KEY_PIN      = PIND
.equ KEY_PORT     = PORTD
.equ KEY_DDR      = DDRD

.equ KEY_REPEAT_START = 50
.equ KEY_REPEAT_NEXT  = 15

.def leds         = r20
.equ led_port    = PORTB
.equ led_ddr     = DDRB

.equ XTAL        = 4000000

    rjmp    init

.org OVF0addr
    rjmp    timer_overflow0

timer_overflow0:                ; Timer Overflow Interrupt

    push    r0                  ; temporäre Register sichern
    in      r0, SREG
    push    r0

    push    r16
    ; TCNT0 so vorladen, dass der nächste Overflow nach 10 ms auftritt.
    ldi     r16, -( XTAL / 1024 * 10 / 1000)
    ;
    ;           |           |           ^^^^^^^^^^^
    ;           |           |           = 10 ms
    ;           |           Vorteiler
    ;           Quartz-Takt
```

```

;
out    TCNT0, r16
pop    r16

get8key:
in     r0, KEY_PIN           ; Tasten einlesen
com    r0                    ; gedrückte Taste werden zu 1
eor    r0, key_state        ; nur Änderungen berücksichtigen
and    iwr0, r0              ; in iwr0 und iwrl zählen
com    iwr0
and    iwrl, r0
eor    iwrl, iwr0
and    r0, iwr0
and    r0, iwrl
eor    key_state, r0        ;
and    r0, key_state
or     key_press, r0        ; gedrückte Taste merken
tst    key_state            ; irgendeine Taste gedrückt ?
breq   get8key_rep         ; Nein, Zeitdauer zurücksetzen
dec    key_rep
brne   get8key_finish;     ; Zeit abgelaufen?
mov    key_rep_press, key_state
ldi    key_rep, KEY_REPEAT_NEXT
rjmp   get8key_finish

get8key_rep:
ldi    key_rep, KEY_REPEAT_START

get8key_finish:
pop    r0                    ; Register wiederherstellen
out    SREG, r0
pop    r0
reti

;
;

init:
ldi    temp1, LOW(RAMEND)    ; Stackpointer initialisieren
out    SPL, temp1
ldi    temp1, HIGH(RAMEND)
out    SPH, temp1

ldi    temp1, 0xFF
out    led_dds, temp1

ldi    temp1, 0xFF          ; Tasten sind auf Eingang
out    KEY_PORT, temp1     ; Pullup Widerstände ein

ldi    temp1, 1<<CS00 | 1<<CS02
out    TCCR0, temp1
ldi    temp1, 1<<TOIE0      ; Timer mit Vorteiler 1024
out    TIMSK, temp1

clr    key_state
clr    key_press
clr    key_rep_press
clr    key_rep

ldi    leds, 0xFF
out    led_port, leds

main:
; einen einzelnen Tastendruck auswerten

cli

```

```

mov     temp1, key_press
clr     key_press
sei

cpi     temp1, 0x01           ; Nur dann wenn Taste 0 gedrückt wurde
breq    toggle

                                           ; Tasten Autorepeat auswerten
cli
mov     temp1, key_rep_press
clr     key_rep_press
sei

                                           ; Nur dann wenn Taste 0 gehalten wurde
cpi     temp1, 0x01
breq    toggle

rjmp    main                 ; Hauptschleife abgeschlossen

toggle:
eor     leds, temp1          ; Die zur Taste gehörende Led umschalten
out     led_port, leds
rjmp    main

```

16.5 Fallbeispiel

Das folgende Programm hat durchaus praktischen Wert. Es zeigt auf dem LCD den ASCII Code dezimal und in hexadezimal an, sowie das zugehörige LCD-Zeichen. An den **PORTB** werden an den Pins 0 und 1 jeweils 1 Taster angeschlossen. Mit dem einen Taster kann der ASCII Code erhöht werden, mit dem anderen Taster wird der ASCII Code erniedrigt. Auf beiden Tastern liegt jeweils ein Autorepeat, sodass jeder beliebige Code einfach angesteuert werden kann. Insbesondere die ASCII Codes größer als 128 sind interessant :-)

```

#include "m8def.inc"

.def iwr0      = r1
.def iwr1      = r2

.def key_state = r4
.def key_press = r5
.def key_rep_press = r6
.def key_rep   = r16

.def temp1     = r17

.equ KEY_PIN   = PIND
.equ KEY_PORT  = PORTD
.equ KEY_DDR   = DDRD

.equ KEY_REPEAT_START = 40
.equ KEY_REPEAT_NEXT  = 15

.def code      = r20

.equ XTAL = 4000000

rjmp    init

.org OVF0addr
rjmp    timer_overflow0

```

```

timer_overflow0:                ; Timer Overflow Interrupt

    push    r0                  ; temporäre Register sichern
    in     r0, SREG
    push   r0

    push   r16
    ldi   r16, -( XTAL / 1024 * 10 / 1000 + 1 )
    out   TCNT0, r16
    pop   r16

get8key:
    in     r0, KEY_PIN          ; Tasten einlesen
    com   r0                    ; gedrückte Taste werden zu 1
    eor   r0, key_state        ; nur Änderungen berücksichtigen
    and   iwr0, r0              ; in iwr0 und iwrl zählen
    com   iwr0
    and   iwrl, r0
    eor   iwrl, iwr0
    and   r0, iwr0
    and   r0, iwrl
    eor   key_state, r0        ;
    and   r0, key_state
    or    key_press, r0        ; gedrückte Taste merken
    tst   key_state            ; irgendeine Taste gedrückt ?
    breq  get8key_rep          ; Nein, Zeitdauer zurücksetzen
    dec   key_rep
    brne  get8key_finish;      ; Zeit abgelaufen?
    mov   key_rep_press, key_state
    ldi   key_rep, KEY_REPEAT_NEXT
    rjmp  get8key_finish

get8key_rep:
    ldi   key_rep, KEY_REPEAT_START

get8key_finish:
    pop   r0                    ; Register wiederherstellen
    out   SREG, r0
    pop   r0
    reti

;
;

init:
    ldi   temp1, LOW(RAMEND)    ; Stackpointer initialisieren
    out   SPL, temp1
    ldi   temp1, HIGH(RAMEND)
    out   SPH, temp1

    ldi   temp1, 0xFF           ; Tasten sind auf Eingang
    out   KEY_PORT, temp1      ; Pullup Widerstände ein

    rcall lcd_init
    rcall lcd_clear

    ldi   temp1, 1<<CS00 | 1<<CS02
    out   TCCR0, temp1
    ldi   temp1, 1<<TOIE0      ; Timer mit Vorteiler 1024
    out   TIMSK, temp1

    clr   key_state
    clr   key_press
    clr   key_rep_press

```

```

    clr     key_rep

    ldi     code, 0x30
    rjmp   update

main:
    cli
    mov     temp1, key_press      ; normaler Tastendruck
    clr     key_press
    sei
    cpi     temp1, 0x01          ; Increment
    breq    increment
    cpi     temp1, 0x02          ; Decrement
    breq    decrement

    cli
    mov     temp1, key_rep_press  ; gedrückt und halten -> repeat
    clr     key_rep_press
    sei
    cpi     temp1, 0x01          ; Increment
    breq    increment
    cpi     temp1, 0x02          ; Decrement
    breq    decrement

    rjmp   main

increment:
    inc     code
    rjmp   update

decrement:
    dec     code

update:
    rcall   lcd_home
    mov     temp1, code
    rcall   lcd_number
    ldi     temp1, ' '
    rcall   lcd_data
    mov     temp1, code
    rcall   lcd_number_hex
    ldi     temp1, ' '
    rcall   lcd_data
    mov     temp1, code
    rcall   lcd_data

    rjmp   main

.include "lcd-routines.asm"

```

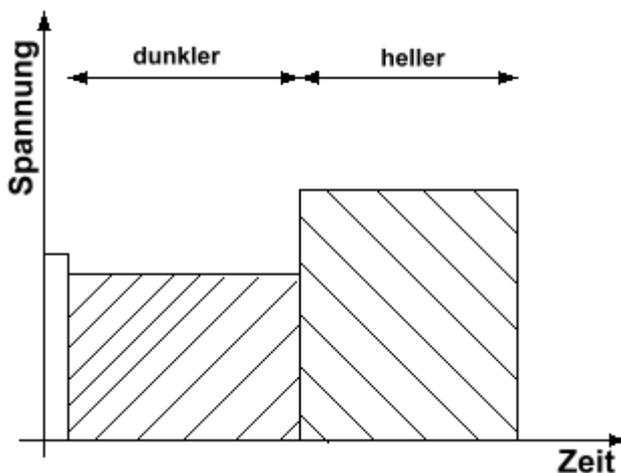
17 AVR-Tutorial: PWM

PWM - Dieses Kürzel steht für Puls Weiten Modulation.

17.1 Was bedeutet PWM?

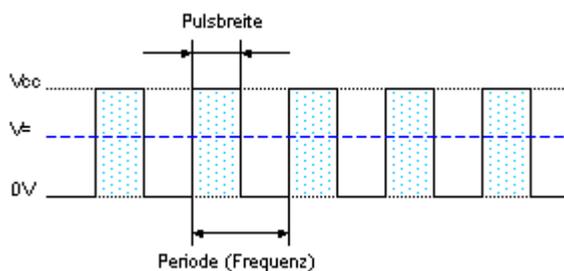
Viele elektrische Verbraucher können dadurch in ihrer Leistung reguliert werden, indem die Versorgungsspannung in weiten Bereichen verändert wird. Ein normaler Gleichstrommotor wird z.B. langsamer laufen, wenn er mit einer geringeren Spannung versorgt wird, bzw. schneller laufen, wenn er mit einer höheren Spannung versorgt wird. LEDs werden zwar nicht mit einer Spannung gedimmt, sondern mit dem Versorgungsstrom. Da dieser Stromfluss aber im Normalfall mit einem Vorwiderstand eingestellt wird, ist durch das Ohmsche Gesetz dieser Stromfluss bei konstantem Widerstand wieder direkt proportional zur Höhe der Versorgungsspannung.

Im wesentlichen geht es also immer um diese Kennlinie, trägt man die Versorgungsspannung entlang der Zeitachse auf:



Die Fläche unter der Kurve ist dabei ein direktes Mass für die Energie die dem System zugeführt wird. Bei geringerer Energie ist die Helligkeit geringer, bei höherer Energie entsprechend heller.

Jedoch gibt es noch einen zweiten Weg, die dem System zugeführte Energie zu verringern. Anstatt die Spannung abzusenken, ist es auch möglich die volle Versorgungsspannung über einen geringeren Zeitraum anzulegen. Man muß nur dafür Sorge tragen, dass im Endeffekt die einzelnen Pulse nicht mehr wahrnehmbar sind.



Die Fläche unter den Rechtecken hat in diesem Fall dieselbe Größe wie die Fläche unter der Spannung $V=$, glättet man die Spannung also mit einem Kondensator, ergibt sich eine niedrigere konstante Spannung. Die Rechtecke sind zwar höher, aber dafür schmaler. Die Flächen sind aber dieselben. Diese Lösung hat den Vorteil, dass keine Spannung geregelt werden muss, sondern der Verbraucher immer mit derselben Spannung versorgt wird.

Und genau das ist das Prinzip einer PWM. Durch die Abgabe von Pulsen wird die abgegebene Energiemenge gesteuert. Es ist auf einem μC wesentlich einfacher Pulse mit einem definiertem Puls/Pausen Verhältnis zu erzeugen als eine Spannung zu variieren.

17.2 PWM und der Timer

Der Timer1 des Mega8 unterstützt direkt das Erzeugen von PWM. Beginnt der Timer beispielsweise bei 0 zu zählen, so schaltet er gleichzeitig einen Ausgangspin ein. Erreicht der Zähler einen bestimmten Wert X, so schaltet er den Ausgangspin wieder aus und zählt weiter bis zu seiner Obergrenze. Danach wiederholt sich das Spielchen, der Timer beginnt wieder bei 0 und schaltet gleichzeitig den Ausgangspin ein, etc., etc. Durch verändern von X kann man daher steuern, wie lange der Ausgangspin, im Verhältnis zur kompletten Zeit die der Timer benötigt um seine Obergrenze zu erreichen, eingeschaltet ist.

Dabei gibt es aber verwirrenderweise verschiedene Arten der PWM:

- Fast PWM
- Phasen-korrekte PWM
- Phasen- und Frequenzkorrekte PWM

Für die Details zu jedem PWM-Modus sei auf das Datenblatt verwiesen.

17.2.1 Fast PWM

Die Fast PWM gibt es beim Mega8 mit mehreren unterschiedlichen Bit-Zahlen. Bei den Bit-Zahlen geht es immer darum, wie weit der Timer zählt, bevor ein Rücksetzen des Timers auf 0 erfolgt

- Modus 5: 8 Bit Fast PWM - Der Timer zählt bis 255
- Modus 6: 9 Bit Fast PWM - Der Timer zählt bis 511
- Modus 7: 10 Bit Fast PWM - Der Timer zählt bis 1023
- Modus 14: Fast PWM mit beliebiger Schrittzahl (festgelegt durch **ICR1**)
- Modus 15: Fast PWM mit beliebiger Schrittzahl (festgelegt durch **OCR1A**)

Grundsätzlich funktioniert der Fast-PWM Modus so, dass der Timer bei 0 anfängt zu zählen, wobei natürlich der eingestellte Vorteiler des Timers berücksichtigt wird. Erreicht der Timer einen bestimmten Zählerstand (festgelegt durch die Register **OCR1A** und **OCR1B**) so wird eine Aktion ausgelöst. Je nach Festlegung kann der entsprechende μC Pin (OC1A und OC1B) entweder

- umgeschaltet
- auf 1 gesetzt
- auf 0 gesetzt

werden. Wird der OC1A/OC1B Pin so konfiguriert, dass er auf 1 oder 0 gesetzt wird, so wird automatisch der entsprechende Pin beim Timerstand 0 auf den jeweils gegenteiligen Wert gesetzt.

Der OC1A Pin befindet sich beim Mega8 am Port B, konkret am Pin **PB1**. Dieser Pin muss über das zugehörige Datenrichtungsregister **DDRB** auf Ausgang gestellt werden. Anders als beim UART geschieht dies nicht automatisch.

Das Beispiel zeigt den Modus 14. Dabei wird der Timer-Endstand durch das Register **ICR1** festgelegt. Weiters wird die Funktion des OC1A Pins so festgelegt, dass der Pin bei einem Timer Wert von 0 auf 1 gesetzt wird und bei Erreichen des im **OCR1A** Registers festgelegten Wertes auf 0 gesetzt wird. Der Vorteiler des Timers, bzw. der ICR-Wert wird zunächst so eingestellt, dass eine an **PB1** angeschlossene LED noch blinkt, die Auswirkungen unterschiedlicher Register Werte gut beobachtet werden können. Den Vorteiler zu verringern ist kein Problem, hier geht es aber darum, zu demonstrieren wie PWM funktioniert.

Hinweis: Wie überall im ATmega8 ist darauf zu achten, dass beim Beschreiben eines 16-Bit Registers zuerst das High-Byte und dann das Low-Byte geschrieben wird.

```
.include "m8def.inc"

.def temp1          = r17

.equ XTAL = 4000000

    rjmp    init

;.include "keys.asm"
;
;

init:
    ldi     temp1, LOW(RAMEND)      ; Stackpointer initialisieren
    out     SPL, temp1
    ldi     temp1, HIGH(RAMEND)
    out     SPH, temp1

;
; Timer 1 einstellen
;
; Modus 14:
;   Fast PWM, Top von ICR1
;
;   WGM13   WGM12   WGM11   WGM10
;   1       1       1       0
;
;   Timer Vorteiler: 256
;   CS12    CS11    CS10
;   1       0       0
;
; Steuerung des Ausgangsport: Set at BOTTOM, Clear at match
;   COM1A1  COM1A0
;   1       0
;

    ldi     temp1, 1<<COM1A1 | 1<<WGM11
    out     TCCR1A, temp1

    ldi     temp1, 1<<WGM13 | 1<<WGM12 | 1<<CS12
    out     TCCR1B, temp1

;
; den Endwert (TOP) für den Zähler setzen
; der Zähler zählt bis zu diesem Wert
;
    ldi     temp1, 0x6F
```

```

out      ICR1H, temp1
ldi      temp1, 0xFF
out      ICR1L, temp1

;
; der Compare Wert
; Wenn der Zähler diesen Wert erreicht, wird mit
; obiger Konfiguration der OC1A Ausgang abgeschaltet
; Sobald der Zähler wieder bei 0 startet, wird der
; Ausgang wieder auf 1 gesetzt
;
ldi      temp1, 0x3F
out      OCR1AH, temp1
ldi      temp1, 0xFF
out      OCR1AL, temp1

; Den Pin OC1A zu guter letzt noch auf Ausgang schalten
ldi      temp1, 0x02
out      DDRB, temp1

main:
rjmp     main

```

Wird dieses Programm laufen gelassen, dann ergibt sich eine blinkende LED. Die LED ist die Hälfte der Blinkzeit an und in der anderen Hälfte des Blinkzyklus aus. Wird der Compare Wert in **OCR1A** verändert, so lässt sich das Verhältnis von LED Einzeit zu Auszeit verändern. Ist die LED wie im I/O Kapitel angeschlossen, so führen höhere **OCR1A** Werte dazu, dass die LED nur kurz aufblitzt und in der restlichen Zeit dunkel bleibt.

```

ldi      temp1, 0x6D
out      OCR1AH, temp1
ldi      temp1, 0xFF
out      OCR1AL, temp1

```

Sinngemäß führen kleinere **OCR1A** Werte dazu, daß die LED länger leuchtet und die Dunkelphasen kürzer werden.

```

ldi      temp1, 0x10
out      OCR1AH, temp1
ldi      temp1, 0xFF
out      OCR1AL, temp1

```

Nachdem die Funktion und das Zusammenspiel der einzelnen Register jetzt klar ist, ist es Zeit aus dem Blinken ein echtes Dimmen zu machen. Dazu genügt es den Vorteiler des Timers auf 1 zu setzen:

```

ldi      temp1, 1<<WGM13 | 1<<WGM12 | 1<<CS10
out      TCCR1B, temp1

```

Werden wieder die beiden **OCR1A** Werte 0x6DFF und 0x10FF ausprobiert, so ist deutlich zu sehen, dass die LED scheinbar unterschiedlich hell leuchtet. Dies ist allerdings eine optische Täuschung. Die LED blinkt nach wie vor, nur blinkt sie so schnell, daß dies für uns nicht mehr wahrnehmbar ist. Durch Variation der Einschalt- zu Ausschaltzeit kann die LED auf viele verschiedene Helligkeitswerte eingestellt werden.

Theoretisch wäre es möglich die LED auf 0x6FFF verschiedene Helligkeitswerte einzustellen. Dies deshalb, weil in **ICR1** genau dieser Wert als Endwert für den Timer festgelegt worden ist. Dieser Wert könnte genauso gut kleiner oder größer eingestellt werden. Um eine LED zu dimmen ist der Maximalwert aber hoffnungslos zu hoch. Für diese Aufgabe reicht eine Abstufung von 256 oder 512 Stufen normalerweise völlig aus. Genau für diese Fälle gibt es die anderen Modi. Anstatt den Timer Endstand mittels **ICR1** festzulegen, genügt es den Timer einfach nur in den 8, 9 oder 10 Bit Modus zu konfigurieren und damit eine PWM mit 256 (8 Bit), 512 (9 Bit) oder 1024 (10 Bit) Stufen zu erzeugen.

17.2.2 Phasen-korrekte PWM

17.2.3 Phasen- und Frequenz-korrekte PWM

17.3 PWM in Software

Die Realisierung einer PWM mit einem Timer, wobei der Timer die ganze Arbeit macht, ist zwar einfach, hat aber einen Nachteil. Für jede einzelne PWM ist ein eigener Timer notwendig. Und davon gibt es in einem Mega8 nicht all zu viele.

Es geht auch anders: Es ist durchaus möglich viele PWM Stufen mit nur einem Timer zu realisieren. Der Timer wird nur noch dazu benötigt, eine stabile und konstante Zeitbasis zu erhalten. Von dieser Zeitbasis wird alles weitere abgeleitet.

17.3.1 Prinzip

Das Grundprinzip ist dabei sehr einfach: Eine PWM ist ja im Grunde nichts anderes als eine Blinkschleife, bei der das Verhältnis von Ein- zu Auszeit variabel eingestellt werden kann. Die Blinkfrequenz selbst ist konstant und ist so schnell, dass das eigentliche Blinken nicht mehr wahrgenommen werden kann. Das lässt sich aber auch alles in einer ISR realisieren:

- Ein Timer (Timer0) wird so aufgesetzt, dass er eine Overflow-Interruptfunktion (ISR) mit dem 256-fache der gewünschten Blinkfrequenz aufruft.
- In der ISR wird ein weiterer Zähler betrieben (*PWMCounter*), der ständig von 0 bis 255 zählt.
- Für jede zu realisierende PWM Stufe gibt es einen Grenzwert. Liegt der Wert des PWMCounters unter diesem Wert, so wird der entsprechende Port Pin eingeschaltet. Liegt er darüber, so wird der entsprechende Port Pin ausgeschaltet

Damit wird im Grunde nichts anderes gemacht, als die Funktionalität der Fast-PWM in Software nachzubilden. Da man dabei aber nicht auf ein einziges OCR Register angewiesen ist, sondern in gewissen Umfang beliebig viele davon implementieren kann, kann man auch beliebig viele PWM Stufen erzeugen.

17.3.2 Programm

Am **Port B** werden an den Pins **PB0** bis **PB5** insgesamt 6 LEDs gemäß der Verschaltung aus dem [I/O Artikel](#) angeschlossen. Jede einzelne LED kann durch setzen eines Wertes von 0 bis 127 in die zugehörigen Register *ocr_1* bis *ocr_6* auf einen anderen Helligkeitswert eingestellt werden. Die PWM-Frequenz (Blinkfrequenz) jeder LED beträgt: $(4000000 / 256) / 127 = 123\text{Hz}$. Dies reicht aus um das Blinken unter die Wahrnehmungsschwelle zu drücken und die LEDs gleichmässig erleuchtet erscheinen zu lassen.

```
.include "m8def.inc"

.def temp = r16

.def PWMCount = r17

.def ocr_1 = r18 ; Helligkeitswert Led1: 0 .. 127
.def ocr_2 = r19 ; Helligkeitswert Led2: 0 .. 127
.def ocr_3 = r20 ; Helligkeitswert Led3: 0 .. 127
.def ocr_4 = r21 ; Helligkeitswert Led4: 0 .. 127
.def ocr_5 = r22 ; Helligkeitswert Led5: 0 .. 127
```

```

.def ocr_6 = r23 ; Helligkeitswert Led6: 0 .. 127

.org 0x0000
    rjmp    main ; Reset Handler
.org OVFOaddr
    rjmp    timer0_overflow ; Timer Overflow Handler

main:
    ldi     temp, LOW(RAMEND) ; Stackpointer initialisieren
    out     SPL, temp
    ldi     temp, HIGH(RAMEND)
    out     SPH, temp

    ldi     temp, 0xFF ; Port B auf Ausgang
    out     DDRB, temp

    ldi     ocr_1, 0
    ldi     ocr_2, 1
    ldi     ocr_3, 10
    ldi     ocr_4, 20
    ldi     ocr_5, 80
    ldi     ocr_6, 127

    ldi     temp, 0b00000001 ; CS00 setzen: Teiler 1
    out     TCCR0, temp

    ldi     temp, 0b00000001 ; TOIE0: Interrupt bei Timer Overflow
    out     TIMSK, temp

    sei

loop: rjmp    loop

timer0_overflow: ; Timer 0 Overflow Handler
    inc     PWMCount ; den PWM Zähler von 0 bis
    cpi     PWMCount, 128 ; 127 zählen lassen
    brne    WorkPWM
    clr     PWMCount

WorkPWM:
    ldi     temp, 0b11000000 ; 0 .. Led an, 1 .. Led aus

    cp      PWMCount, ocr_1 ; Ist der Grenzwert für Led 1 erreicht
    brlt   OneOn
    ori    temp, $01

OneOn: cp      PWMCount, ocr_2 ; Ist der Grenzwert für Led 2 erreicht
    brlt   TwoOn
    ori    temp, $02

TwoOn: cp      PWMCount, ocr_3 ; Ist der Grenzwert für Led 3 erreicht
    brlt   ThreeOn
    ori    temp, $04

ThreeOn:cp     PWMCount, ocr_4 ; Ist der Grenzwert für Led 4 erreicht
    brlt   FourOn
    ori    temp, $08

FourOn: cp     PWMCount, ocr_5 ; Ist der Grenzwert für Led 5 erreicht
    brlt   FiveOn
    ori    temp, $10

FiveOn: cp     PWMCount, ocr_6 ; Ist der Grenzwert für Led 6 erreicht
    brlt   SetBits

```

```
ori    temp, $20

SetBits:
out    PORTB, temp
      ; Die neue Bitbelegung am Port ausgeben

reti
```

Würde man die LEDs anstatt direkt an ein Port anzuschliessen, über ein oder mehrere [Schieberegister](#) anschließen, so kann auf diese Art eine relativ große Anzahl an LEDs gedimmt werden. Natürlich müsste man die softwareseitige LED Ansteuerung gegenüber der hier gezeigten verändern, aber das PWM Prinzip könnte so übernommen werden.

17.4 Siehe auch

- [PWM](#)
- [AVR-GCC-Tutorial: PWM](#)
- [Soft-PWM](#) - optimierte Software-PWM in C
- [LED-Fading](#) - LED dimmen mit PWM

18 AVR-Tutorial: Schieberegister

Ab und an stellt sich folgendes Problem: Man würde wesentlich mehr Ausgangspins oder Eingangspins benötigen als der [Mikrocontroller](#) zur Verfügung stellt. Ein möglicher Ausweg ist eine Porterweiterung mit einem Schieberegister. Zwei beliebte Schieberegister sind beispielsweise der 74xx595 bzw. der 74xx165.

18.1 Porterweiterung für Ausgänge

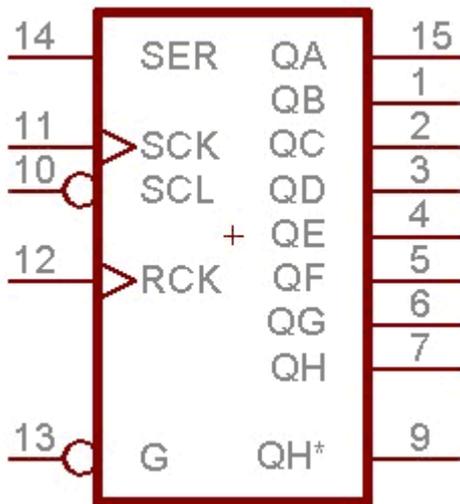
Um neue Ausgangspins zu gewinnen kann der [74xx595](#) verwendet werden. Dabei handelt es sich um ein *8-Bit 3-state Serial-in/Serial-out or Parallel-Out Schieberegister mit einem Ausgangsregister und einem asynchronen Reset*.

Hinter dieser kompliziert anmutenden Beschreibung verbirgt sich eine einfache Funktionalität: Das Schieberegister besteht aus zwei Funktionseinheiten: Dem eigentlichen Schieberegister und dem Ausgangsregister. In das Schieberegister können die Daten seriell hineingetaktet werden und durch ein bestimmtes Signal werden die Daten des Schieberegisters in das Ausgangsregister übernommen und können von dort auf die Ausgangspins geschaltet werden.

Im Einzelnen bedeuten die Begriffe:

Begriff	Erklärung
8-Bit	Acht Ausgangsbits
3-state	Die acht Registerausgänge können drei Zustände, Low, High und High-Impedanz annehmen. Siehe Ausgangsstufen Logik-ICs
Serial-in	Serieller Eingang des Schieberegisters
Serial-out	Serieller Ausgang des Schieberegisters
Parallel-Out	Parallele Ausgänge des Ausgangsregisters
Schieberegister	Serielle Daten werden durch den Baustein durchgeschoben
Ausgangsregister	Ein Speicher, welcher die Daten des Schieberegisters zwischenspeichern kann. Dieses besteht aus acht FlipFlops .
Asynchroner Reset	Die Daten im Schieberegister können asynchron zurückgesetzt werden.

18.1.1 Aufbau



Hinweis: Die Benennung der Pins in den Datenblättern verschiedener Hersteller unterscheidet sich zum Teil. Die Funktionen der Pins sind jedoch gleich.

Beispiele von Hersteller-Pinbenennungen

DIL Pin-Nummer	Funktion	Dieses Tutorial	Motorola / ON Semi	Philips / NXP	Fairchild	SGS	Texas Instruments
1	Ausgang B	QB	Q _B	Q ₁	Q _B	QB	Q _B
2	Ausgang C	QC	Q _C	Q ₂	Q _C	QC	Q _C
3	Ausgang D	QD	Q _D	Q ₃	Q _D	QD	Q _D
4	Ausgang E	QE	Q _E	Q ₄	Q _E	QE	Q _E
5	Ausgang F	QF	Q _F	Q ₅	Q _F	QF	Q _F
6	Ausgang G	QG	Q _G	Q ₆	Q _G	QG	Q _G
7	Ausgang H	QH	Q _H	Q ₇	Q _H	QH	Q _H
8	Masse, 0 V	[nicht dargestellt]	GND	GND	GND	GND	GND
9	Serieller Ausgang	QH*	SQ _H	Q ₇ '	Q' _H	QH'	Q _H '
10	Reset für Schieberegister	SCL	RESET	/MR	/SCLR	/SCLR	/SRCLR
11	Schiebetakt	SCK	SHIFT CLOCK	SH _{CP}	SCK	SCK	SRCLK
12	Speichertakt	RCK	LATCH CLOCK	ST _{CP}	RCK	RCK	RCLK
13	Ausgangssteuerung	G	OUTPUT ENABLE	/OE	/G	/G	/OE
14	Serieller Dateneingang	SER	A	D _S	SER	SI	SER
15	Ausgang A	QA	Q _A	Q ₀	Q _A	QA	Q _A
16	Betriebsspannung	[nicht dargestellt]	V _{CC}	V _{CC}	V _{CC}	V _{CC}	V _{CC}

Der Baustein besteht aus zwei Einheiten:

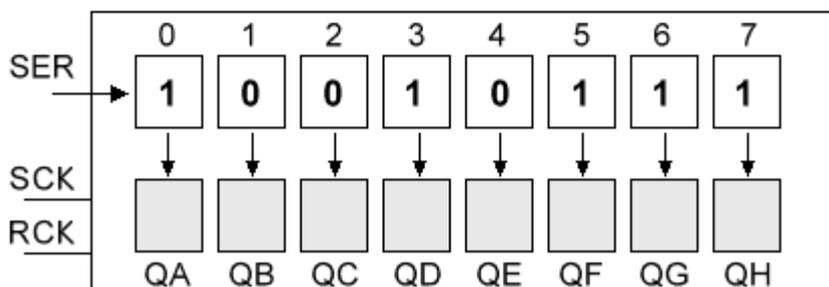
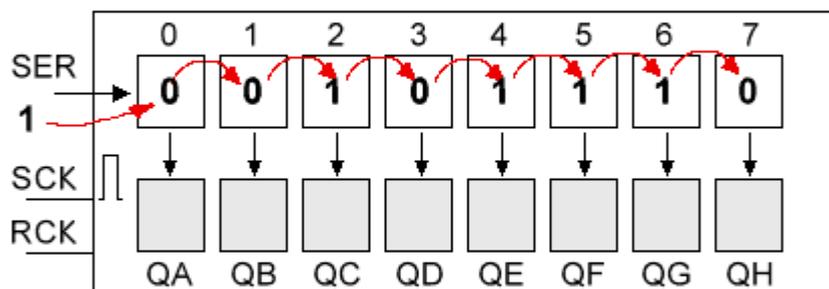
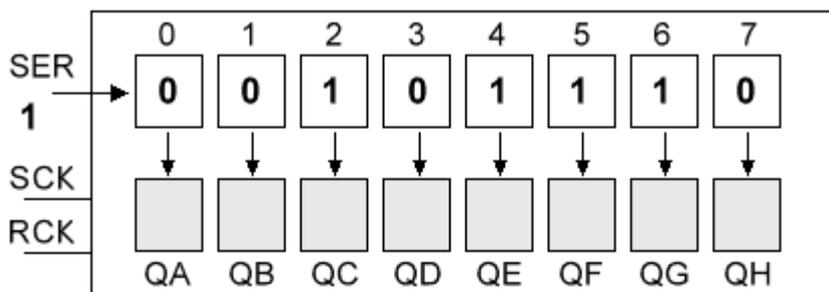
- dem Schieberegister
- dem Ausgangsregister

Im Schieberegister werden die einzelnen Bits durchgeschoben. Mit jeder positiven Taktflanke (LOW -> HIGH) an **SCK** wird eine Schiebeoperation durchgeführt.

Das Ausgangsregister hat die Aufgabe die Ausgangspins des Bausteins anzusteuern. Durch dieses Ausgangsregister ist es möglich, die Schiebeoperationen im Hintergrund durchzuführen, ohne dass IC Pins ihren Wert ändern. Erst wenn die Schiebeoperation abgeschlossen ist, wird der aktuelle Zustand der Schieberegisterkette durch einen Puls an **RCK** in das Ausgangsregister übernommen.

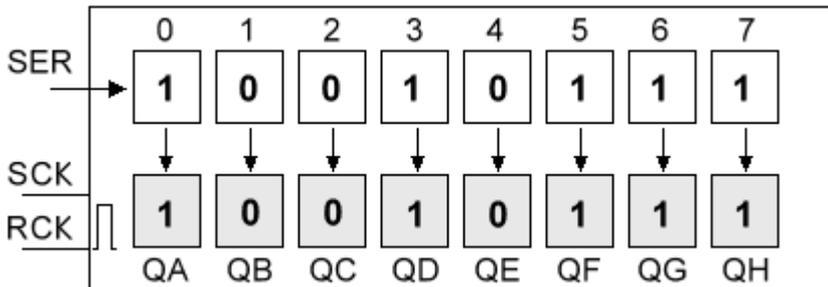
18.1.2 Funktionsweise

Am Eingang **SER** (Pin 14) wird das gewünschte nächste Datum (0 oder 1) angelegt. Durch einen positiven Puls an **SCK** (Pin 11) wird der momentan an **SER** anliegende Wert als neuer Wert für Bit 0, das unterste Bit des Schieberegisters, übernommen. Gleichzeitig werden alle anderen Bits im Schieberegister um eine Stelle verschoben: Das Bit 6 wird ins Bit 7 übernommen, Bit 5 ins Bit 6, Bit 4 ins Bit 5, etc. sodass das Bit 0 zur Aufnahme des **SER** Bits frei wird.



Eine Sonderstellung nimmt das ursprüngliche Bit 7 ein. Dieses Bit steht direkt auch am Ausgang **QH*** (Pin 9) zur Verfügung. Dadurch ist es möglich an ein Schieberegister einen weiteren Baustein 74xxx595 anzuschliessen und so beliebig viele Schieberegister hintereinander zu schalten (kaskadieren). Auf diese Art lassen sich Schieberegister mit beliebig vielen Stufen aufbauen.

Wurde das Schieberegister mit den Daten gefüllt, so wird mit einem LOW-HIGH Puls am Pin 12, **RCK** der Inhalt des Schieberegisters in das Ausgangsregister übernommen.



Mit dem Eingang **G** (Pin 13) kann das Ausgangsregister freigegeben werden. Liegt **G** auf 0, so führen die Ausgänge **QA** bis **QH** entsprechende Pegel. Liegt **G** auf 1, so schalten die Ausgänge **QA** bis **QH** auf **Tristate**. D.h. sie treiben aktiv weder LOW oder HIGH, sondern sind hochohmig wie ein Eingänge und nehmen jeden Pegel an, der ihnen von aussen aufgezwungen wird.

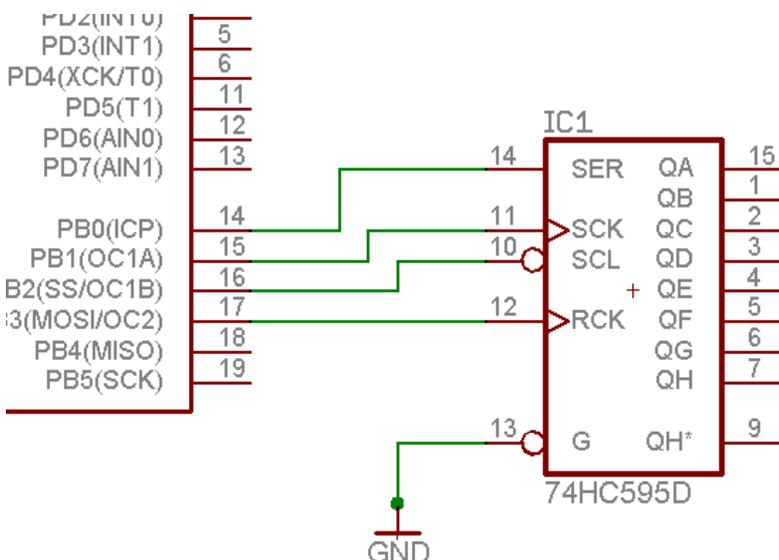
Bleibt nur noch der Eingang **SCL**(Pin 13). Mit ihm kann das Schieberegister im Baustein gelöscht, also auf eine definierte 0, gesetzt werden.

Die Programmierung eines 74xxx595 Schieberegisters gestaltet sich sehr einfach. Im Grunde gibt es 2 Möglichkeiten:

- Mittels **SPI** kann der **AVR** das Schieberegister direkt und autark ansteuern. Das ist sehr schnell und verbraucht nur wenig CPU-Leistung
- Sind die entsprechenden SPI-Pins am AVR nicht frei, so ist auch eine softwaremässige Ansteuerung des Schieberegisters mit einfachen Mitteln durchführbar.

18.1.3 Ansteuerung per Software

Für eine komplette Softwarelösung kann das Schieberegister an jede beliebige Port-Pin Kombination angeschlossen werden. Wir wählen die Pins **PB0**, **PB1**, **PB2** und **PB3** um dort die Schieberegisteranschlüsse **SER**, **SCK**, **SCL** und **RCK** anzuschliessen.



Die Programmierung gestaltet sich dann nach folgendem Schema: Die 8 Bits eines Bytes werden nacheinander an den Ausgang **PB0 (SER)** ausgegeben. Durch Generierung eines Pulses 0-1-0 an Pin **PB1 (SCK)** übernimmt das Schieberegister nacheinander die einzelnen Bits. Dabei ist zu beachten, dass die Ausgabe mit dem höherwertigen Bit beginnen muss, denn dieses Bit wandert ja am weitesten zur Stelle **QH**. Sind alle 8 Bits ausgegeben, so wird durch einen weiteren 0-1-0 Impuls am Pin **PB3 (RCK)** der Inhalt der Schieberegisterbits 0 bis 7 in die Ausgaberegister **QA bis QH** übernommen. Dadurch, dass am Schieberegister der Eingang **G** konstant auf 0-Pegel gehalten wird, erscheint dann auch die Ausgabe sofort an den entsprechenden Pins und kann zb. mit LEDs (low-current LEDs + Vorwiderstand verwenden) sichtbar gemacht werden.

Der Schieberegistereingang **SCL** wird auf einer 1 gehalten. Würde er auf 0 gehen, so würde die Schieberegisterkette gelöscht. Möchte man einen weiteren Prozessorpin einsparen, so kann man diesen Pin auch generell auf Vcc legen. Das Schieberegister könnte man in so einem Fall durch Einschreiben von 0x00 immer noch löschen.

```
.include "m8def.inc"

.def temp1 = r16
.def temp2 = r17

.equ SCHIEBE_DDR = DDRB
.equ SCHIEBE_PORT = PORTB
.equ RCK = 3
.equ SCK = 1
.equ SCL = 2
.equ SIN = 0

    ldi    temp1, LOW(RAMEND)      ; Stackpointer initialisieren
    out   SPL, temp1
    ldi    temp1, HIGH(RAMEND)
    out   SPH, temp1

;
; Die Port Pins auf Ausgang konfigurieren
;
    ldi    temp1, (1<<RCK) | (1<<SCK) | (1<<SCL) | (1<<SIN) ; Anm.1
    out   SCHIEBE_DDR, temp1

;
; die Clear Leitung am Schieberegister auf 1 stellen
;
    sbi    SCHIEBE_PORT, SCL

;
; Ein Datenbyte ausgeben
;
    ldi    temp1, 0b10101010
    rcall Schiebe
    rcall SchiebeOut

loop:
    rjmp  loop

;-----
;
; Die Ausgabe im Schieberegister in das Ausgaberegister übernehmen
;
; Dazu am RCK Eingang am Schieberegister einen 0-1-0 Puls erzeugen
;
SchiebeOut:
    sbi    SCHIEBE_PORT, RCK
    cbi    SCHIEBE_PORT, RCK
```

```

ret

;-----
;
; 8 Bits aus temp1 an das Schieberegister ausgeben
Schiebe:
    push    temp2
    ldi     temp2, 8           ; 8 Bits müssen ausgegeben werden

Schiebe_1:
    ;
    ; jeweils das höchstwertige Bit aus temp1 ins Carry-Flag schieben
    ; Je nach Zustand des Carry-Flags wird die Datenleitung entsprechend
    ; gesetzt oder gelöscht
    ;
    rol     temp1             ; MSB -> Carry
    brcs   Schiebe_One       ; Carry gesetzt? -> weiter bei Schiebe_One
    cbi    SCHIEBE_PORT, SIN ; Eine 0 ausgeben
    rjmp   Schiebe_Clock     ; und Sprung zur Clock Puls Generierung
Schiebe_One:
    sbi    SCHIEBE_PORT, SIN ; Eine 1 ausgeben

    ;
    ; einen Impuls an SCK zur Übernahme des Bits nachschieben
    ;
Schiebe_Clock:
    sbi    SCHIEBE_PORT, SCK ; Clock-Ausgang auf 1 ...
    cbi    SCHIEBE_PORT, SCK ; und wieder zurück auf 0

    dec    temp2             ; Anzahl der ausgegebenen Bits runterzählen
    brne   Schiebe_1         ; Wenn noch keine 8 Bits ausgegeben
                                ; -> Schleife bilden

    pop    temp2
    ret

```

Anm.1: Siehe [Bitmanipulation](#)

18.1.4 Ansteuerung per SPI-Modul

Noch schneller geht die Ansteuerung des Schieberegisters mittels [SPI](#)-Modul, welches in fast allen AVR's vorhanden ist. Hier wird der Pin **SCL** nicht benutzt, da das praktisch keinen Sinn hat. Er muss also fest auf VCC gelegt werden. (Oder mit den Reset-Pin des AVR's, das mit einer RC Schaltung versehen ist, verbunden werden. Damit erreicht man einen definierten Anfangszustand des Schieberegisters) Die Pins für **SCK** und **SIN** sind durch den jeweiligen AVR fest vorgegeben. **SCK** vom 74xxx595 wird mit **SCK** vom AVR verbunden sowie **SIN** mit **MOSI** (**Master Out, Slave In**). **MISO** (**Master In, Slave Out**) ist hier ungenutzt. Es kann NICHT als **RCK** verwendet werden, da es im SPI-Master Modus immer ein Eingang ist! Es kann aber als allgemeiner Eingang verwendet werden. Der AVR-Pin **SS** wird sinnvollerweise als **RCK** benutzt, da er sowieso als Ausgang geschaltet werden muss, sonst gibt es böse Überraschungen (siehe Datenblatt "SS Pin Functionality"). Dieser sollte mit einem Widerstand von 10K nach Masse, während der Start- und Initialisierungsphase, auf L-Potential gehalten werden. (SS ist während dieser Zeit noch im Tri-State und es könnte passieren, dass die zufälligen Daten des Schieberegisters in das Ausgangslatch übernommen werden) Je nach Bedarf kann man die Taktrate des SPI-Moduls zwischen 1/2 ... 1/128 des CPU-Taktes wählen. Es spricht kaum etwas dagegen mit maximaler Geschwindigkeit zu arbeiten. Die AVR's können zur Zeit mit maximal 20 MHz getaktet werden, d.h. es sind maximal 10 MHz SPI-Takt möglich. Das ist für ein 74xxx595 kein Problem. Die Übertragung von 8 Bit dauert dann gerade mal 800ns!

```

.include "m8def.inc"

.def templ = r16

; Die Definitionen müssen an den jeweiligen AVR angepasst werden

.equ SCHIEBE_DDR = DDRB
.equ SCHIEBE_PORT = PORTB
.equ RCK = PB2 ; SS
.equ SCK = PB5 ; SCK
.equ SIN = PB3 ; MOSI

    ldi templ, LOW(RAMEND) ; Stackpointer initialisieren
    out SPL, templ
    ldi templ, HIGH(RAMEND)
    out SPH, templ
;
; SCK, MOSI, SS als Ausgänge schalten
;
    in templ, SCHIEBE_DDR
    ori templ, (1<<SIN) | (1<<SCK) | (1<<RCK)
    out SCHIEBE_DDR, templ
;
; SPI Modul konfigurieren
;
    ldi templ, 0b01010000
    out SPCR, templ ; keine Interrupts, MSB first, Master
                    ; CPOL = 0, CPHA = 0
                    ; SCK Takt = 1/2 XTAL

    ldi templ, 1
    out SPSR, templ ; double speed aktivieren
    out SPDR, templ ; Dummy Daten, um SPIF zu setzen
;
; Ein Datenbyte ausgeben
;
    ldi templ, 0b10101010
    rcall Schiebe ; Daten schieben
    rcall SchiebeOut ; Daten in Ausgangsregister übernehmen

loop:
    rjmp loop

;-----
;
;
; Die Daten im Schieberegister in das Ausgaberegister übernehmen
;
; Dazu am RCK Eingang am Schieberegister einen 0-1-0 Puls erzeugen
;
SchiebeOut:
    sbis SPSR, 7 ; prüfe ob eine alte Übertragung beendet ist
    rjmp SchiebeOut
    sbi SCHIEBE_PORT, RCK
    cbi SCHIEBE_PORT, RCK
    ret

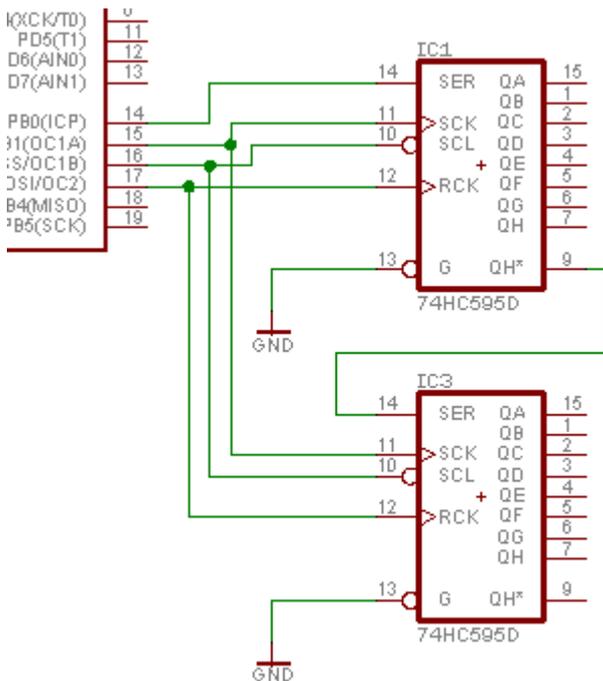
;-----
;
;
; 8 Bits aus templ an das Schieberegister ausgeben
;
Schiebe:
    sbis SPSR, 7 ; prüfe ob eine alte Übertragung beendet ist
    rjmp Schiebe
    out SPDR, templ ; Daten ins SPI Modul schreiben,
                    ; Übertragung beginnt automatisch

```

ret

18.1.5 Kaskadieren von Schieberegistern

Um ein Schieberegister anzuschließen genügen also im einfachsten Fall 4 freie Prozessorpins (3 wenn **SCL** nicht benutzt wird) um weitere 8 Ausgangsleitungen zu bekommen. Genügen diese 8 Leitungen nicht, so kann ohne Probleme ein weiteres Schieberegister an das bereits Vorhandene angeschlossen werden:



Das nächste Schieberegister wird mit seinem Dateneingang **SER** einfach an den dafür vorgesehenen Ausgang **QH*** des vorhergehenden Schieberegisters angeschlossen. Die Steuerleitungen **SCK**, **RCK** und **SCL** werden parallel zu den bereits vorhandenen geschaltet. Konzeptionell erhält man dadurch ein Schieberegister mit einer Breite von 16 Bit. Werden weiter Bausteine in derselben Manier angeschlossen, so erhöht sich die Anzahl der zur Verfügung stehenden Ausgabeleitungen mit jedem Baustein um 8 ohne dass sich die Anzahl der am Prozessor notwendigen Ausgabepins erhöhen würde. Um diese weiteren Register zu nutzen, muss man in der reinen Softwarelösung nur mehrfach die Funktion **Schiebe** aufrufen, um alle Daten auszugeben. Am Ende werden dann mit **SchiebeOut** die Daten in die Ausgangsregister übernommen.

Bei der SPI Lösung werden ebenfalls ganz einfach mehrere Bytes über SPI ausgegeben, ehe dann mittels **RCK** die in die Schieberegisterkette eingetakteten Bits in das Ausgangsregister übernommen werden. Um das Ganze ein wenig zu vereinfachen, soll hier eine Funktion zur Ansteuerung mehrerer kaskadierter Schieberegister über das SPI-Modul gezeigt werden. Dabei wird die Ausgabe mehrerer Bytes über eine Schleife realisiert, mehrfache Aufrufe der Funktion sind damit nicht nötig. Statt dessen übergibt man einen Zeiger auf einen Datenblock im RAM sowie die Anzahl der zu übertragenden Bytes. Ausserdem wird die Datenübernahme durch **RCK** standardkonform integriert. Denn bei nahezu allen ICs mit SPI wird ein sog. CS-Pin verwendet (Chip Select) Dieser Pin ist meist LOW aktiv, d.h. wenn er HIGH ist, ignoriert der IC alle Signale an **SCK** und **MOSI** und gibt keine Daten an **MISO** aus. Ist er LOW, dann ist der IC aktiv und funktioniert normal. Bei der steigenden Flanke an **CS** werden die Daten ins Ausgangsregister übernommen. Die Funktion ist sehr schnell, da die Zeit während der die Übertragung eines Bytes

läuft, dazu genutzt wird, den Schleifenzähler zu verringern und zu prüfen sowie neue Sendedaten zu laden. Zwischen den einzelnen Bytes gibt es somit nur eine Pause von max. 6 Systemtakt.

```
.include "m8def.inc"
.def temp1 = r16

; Die Definitionen müssen an den jeweiligen AVR angepasst werden

.equ SCHIEBE_DDR = DDRB
.equ SCHIEBE_PORT = PORTB
.equ RCK = PB2 ; SS
.equ SCK = PB5 ; SCK
.equ SIN = PB3 ; MOSI

;-----
;
; Datensegment im RAM
;
;-----

.dseg
.org $60
Schiebedaten: .byte 2

;-----
;
; Programmsegment im FLASH
;
;-----

.cseg
    ldi temp1, LOW(RAMEND) ; Stackpointer initialisieren
    out SPL, temp1
    ldi temp1, HIGH(RAMEND)
    out SPH, temp1
;
; SCK, MOSI, SS als Ausgänge schalten
;
    in temp1, SCHIEBE_DDR
    ori temp1, (1<<SIN) | (1<<SCK) | (1<<RCK)
    out SCHIEBE_DDR, temp1

    sbi SCHIEBE_PORT, RCK ; Slave select inaktiv
;
; SPI Modul konfigurieren
;
    ldi temp1, 0b01010000
    out SPCR, temp1 ; keine Interrupts, MSB first, Master
                    ; CPOL = 0, CPHA =0
                    ; SCK Takt = 1/2 XTAL

    ldi r16, 1
    out SPSR, r16 ; Double Speed
    out SPDR, temp1 ; Dummy Daten, um SPIF zu setzen

; den Datenblock mit Daten füllen

    ldi temp1, $F0
    sts Schiebedaten, temp1
    ldi temp1, $55
    sts Schiebedaten+1, temp1

loop:
; den Datenblock ausgeben
```

```

ldi    r16,2
ldi    z1,low(Schiebedaten)
ldi    zh,high(Schiebedaten)
rcall  Schiebe_alle           ; Daten ausgeben

rjmp   loop                  ; nur zur Simulation

;-----
;
; N Bytes an das Schieberegister ausgeben und in das Ausgaberegister übernehmen
;
; r16: Anzahl der Datenbytes
; Z: Zeiger auf Datenblock im RAM
;
;-----
Schiebe_alle:
    cbi    SCHIEBE_PORT, RCK    ; RCK LOW, SPI Standardverfahren
    push  r17

Schiebe_alle_2:
    ld    r17,Z+
Schiebe_alle_3:
    sbis  SPSR,SPIF            ; prüfe ob eine alte Übertragung beendet ist
    rjmp  Schiebe_alle_3
    out   SPDR,r17             ; Daten ins SPI Modul schreiben,
                                ; Übertragung beginnt automatisch

    dec   r16
    brne  Schiebe_alle_2

Schiebe_alle_4:
    sbis  SPSR,SPIF            ; prüfe ob die letzte Übertragung beendet ist
    rjmp  Schiebe_alle_4

    pop   r17
    sbi   SCHIEBE_PORT, RCK    ; RCK inaktiv, Datenübernahme
    ret

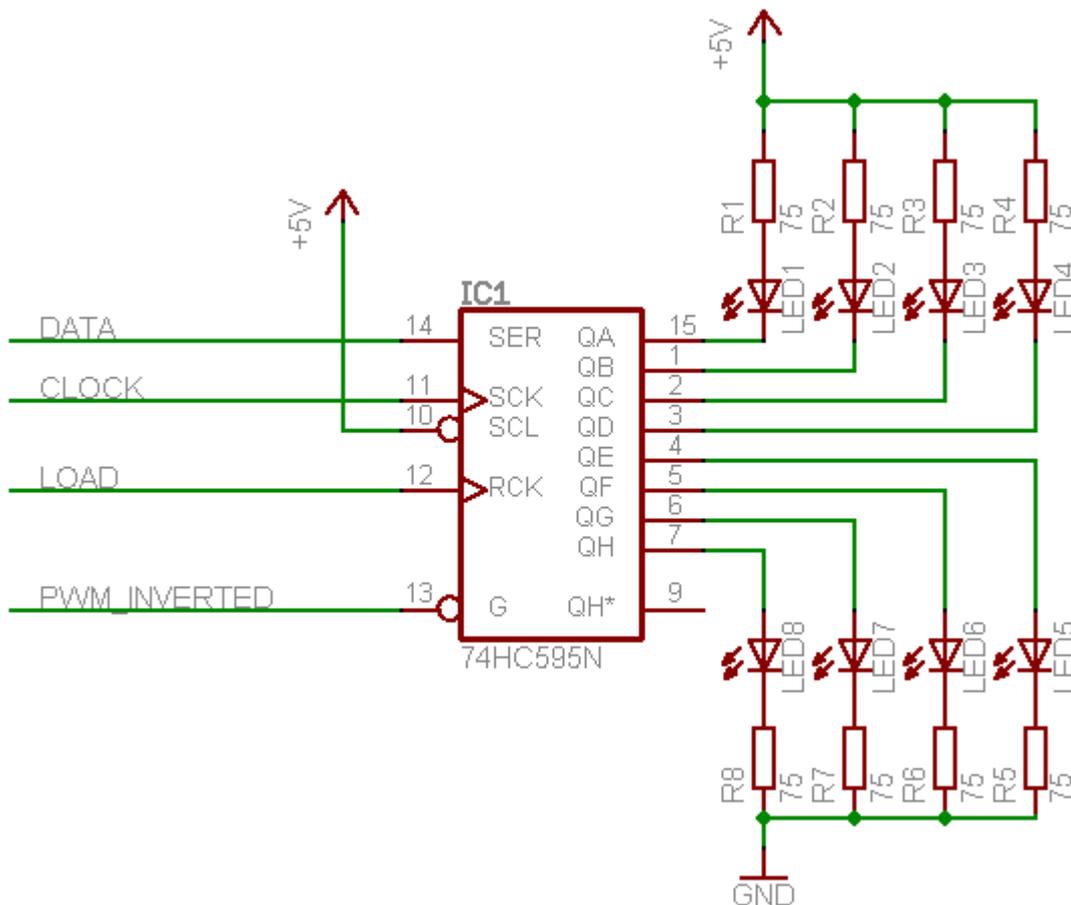
```

Der Nachteil von Schieberegistern ist allerdings, dass sich die Zeit zum Setzen aller Ausgabeleitungen mit jedem weiteren Baustein immer weiter erhöht. Dies deshalb, da ja die einzelnen Bits im Gänsemarsch durch alle Bausteine geschleust werden müssen und für jeden einzelnen Schiebevorgang etwas Zeit notwendig ist. Ein Ausweg ist die Verwendung des SPI-Moduls, welches schneller arbeitet als die reine Softwarelösung. Ist noch mehr Geschwindigkeit gefragt, so sind mehr Port-Pins nötig. Kann ein kompletter Port mit 8 Pins für die Daten genutzt werden, sowie ein paar weitere Steuerleitungen, so können ein oder mehrere 74xxx573 eine Alternative sein, um jeweils ein vollständiges Byte auszugeben. Natürlich kann der 74xxx573 (oder ein ähnliches Schieberegister) auch mit dem 74xxx595 zusammen eingesetzt werden, beispielsweise in dem über das Schieberegister verschiedene 74xxx595 nacheinander aktiviert werden. Weitere Tips und Tricks dazu gibt es vielleicht in einem weiteren Tutorial...

18.1.6 Acht LEDs mit je 20mA pro Schieberegister

Will man nun acht [LEDs](#) mit dem Schieberegister ansteuern, kann man diese direkt über Vorwiderstände anschliessen. Doch ein genauer Blick ins Datenblatt verrät, dass der 74xx595 nur maximal 70mA über VCC bzw. GND ableiten kann. Und wenn man den IC nicht gnadenlos quälen, und damit die Lebensdauer und Zuverlässigkeit drastisch reduzieren will, gibt es nur zwei Auswege.

- Den Strom pro LED auf $70/8 = 8,75\text{mA}$ begrenzen; Das reicht meistens aus um die LEDs schön leuchten zu lassen, vor allem bei low-current und ultrahellen LEDs
- Wenn doch 20 mA pro LED gebraucht werden, kann man die folgende Trickschaltung anwenden.



Der Trick besteht darin, dass 4 LEDs ihren Strom über das Schieberegister von VCC beziehen (HIGH aktiv) während die anderen vier ihren Strom über GND leiten (LOW aktiv). Damit bleiben ganz offiziell für jede LED $70/4 = 17,5\text{mA}$. Um die Handhabung in der Software zu vereinfachen muss nur vor der Ausgabe der Daten das jeweilige Byte mit $0x0F$ XOR verknüpft werden, bevor es in das Schieberegister getaktet wird. Dadurch werden die LOW-aktiven LEDs richtig angesteuert und die Datenhandhabung in der Software muss nur mit HIGH-aktiven rechnen.

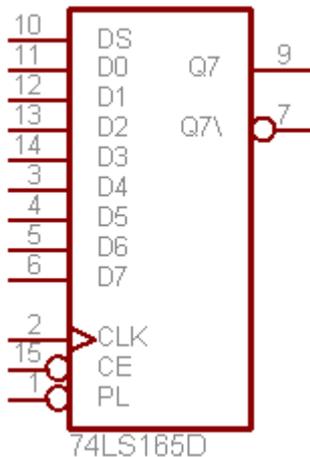
Achtung! Die Widerstände sind auf blaue LEDs mit 3,3V Flussspannung ausgelegt. Bei roten, gelben und grünen [LEDs](#) ist die Flussspannung geringer und dementsprechend muss der Vorwiderstand grösser sein.

Ausserdem wird der G Eingang verwendet, um die Helligkeit aller LEDs per [PWM](#) zu steuern. Beachtet werden muss, dass die PWM im invertierten Modus generiert werden muss, da der Eingang G LOW aktiv ist.

18.2 Porterweiterung für Eingänge

Ein naher Verwandter des 75xx595 ist der [74xx165](#), er ist quasi das Gegenstück. Hierbei handelt es sich um ein *8-bit parallel-in/serial-out shift register*. Auf deutsch ein 8 Bit Schieberegister mit parallelem Eingang und seriellen Ausgang. Damit kann man eine grosse Anzahl Eingänge sehr einfach und preiswert zu seinem Mikrocontroller hinzufügen.

18.2.1 Aufbau



Der Aufbau ist sehr ähnlich zum 74xx595. Allerdings gibt es kein Register zum Zwischenspeichern. Das ist auch gar nicht nötig, da der IC ja einen parallelen Eingang hat. Der muss nicht zwischengespeichert werden. Es gibt hier also wirklich nur das Schieberegister. Dieses wird über den Eingang PL mit den parallelen Daten geladen. Dann können die Daten seriell mit Takten an CLK aus dem Ausgang Q7 geschoben werden.

18.2.2 Funktionsweise

DS ist der serielle Dateneingang, welcher im Falle von kaskadierten Schieberegistern mit dem Ausgang des vorhergehenden ICs verbunden wird.

D0..D7 sind die parallelen Dateneingänge.

Mittels des Eingangs PL (**P**arallel **L**oad) werden die Daten vom parallelen Eingang in das Schieberegister übernommen, wenn dieses Signal LOW ist. Hier muss man aber ein klein wenig aufpassen. Auf grund der Schaltungsstruktur ist der Eingang PL mit dem Takt CLK verknüpft (obwohl es dafür keinen logischen Grund gibt :-0). Damit es nicht zu unerwünschten Fehlschaltungen kommt, muss der Takt CLK während des Ladens auf HIGH liegen. Wird PL wieder auf HIGH gesetzt, sind die Daten geladen. Das erste Bit liegt direkt am Ausgang Q7 and. Die restlichen Bits können nach und nach durch das Register geschoben werden.

Der Eingang CE (**C**lock **E**nable) steuert, ob das Schieberegister auf den Takt CLK reagieren soll oder nicht. Ist CE gleich HIGH werden alle Takte an CLK ignoriert. Bei LOW werden mit jeder positiven Flanke die Daten um eine Stufe weiter geschoben.

Wird am Eingang CLK eine LOW-HIGH Flanke angelegt und ist dabei CE auf LOW, dann werden die Daten im Schieberegister um eine Position weiter geschoben: DS->Q0, Q0->Q1, Q1->Q2, Q2->Q3, Q3->Q4, Q4->Q5, Q5->Q6, Q6->Q7. Q0..Q6 sind interne Signale, siehe [Datenblatt](#).

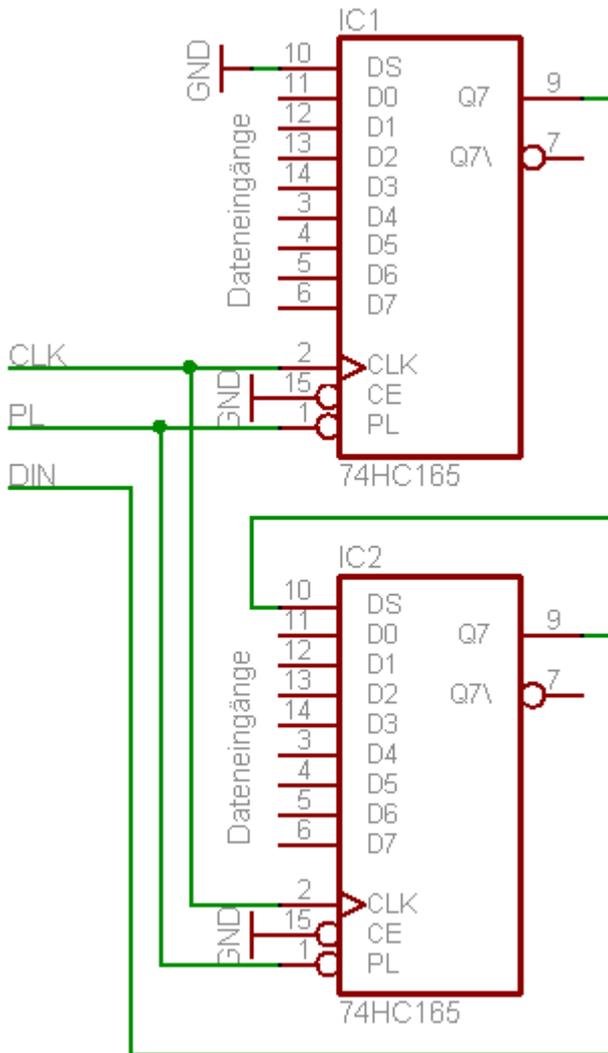
Q7 ist der serielle Ausgang des Schieberegisters. Dort Werden Takt für Takt die Daten ausgegeben. Hier wird normalerweise der Eingang des Mikrocontrollers oder der Eingang des nächsten Schieberegisters angeschlossen.

Q7\ ist der invertierte Ausgang des Schieberegisters. Er wird meist nicht verwendet.

18.2.3 Schaltung

Um nun beispielsweise zwei Schieberegister zu kaskadieren um 16 Eingangspins zu erhalten sollte man folgende Verschaltung vornehmen. Beachten sollte man dabei, dass

- der serielle Eingang DS des ersten Schieberegisters (hier IC1) auf einen festen Pegel gelegt wird (LOW oder HIGH).
- der serielle Datenausgang bei der Benutzung des SPI-Moduls an MISO und nicht an MOSI angeschlossen wird.



Nachfolgend werden zwei Beispiele gezeigt, welche die Ansteuerung nach bekanntem Muster übernehmen. Nur dass hier eben Daten gelesen anstatt geschrieben werden. Zu beachten ist, dass hier ein anderer Modus der SPI-Ansteuerung verwendet werden muss, weil der Baustein das nötig macht. Das muss beachtet werden, wenn auch Schieberegister für Ausgänge verwendet werden. Dabei muss jeweils vor dem Zugriff auf die Ein- oder Ausgangsregister der Modus des Taktes (CPOL) umgeschaltet werden.

18.2.4 Ansteuerung per Software

```

; Porterweiterung für Eingänge mit Schieberegister 74xx165
; Ansteuerung per Software

.include "m8def.inc"

.def temp1 = r16
.def temp2 = r17
.def temp3 = r18

; Pins anpassen, frei wählbar

.equ SCHIEBE_DDR = DDRB
.equ SCHIEBE_PORT = PORTB
.equ SCHIEBE_PIN = PINB
.equ CLK = PB3
.equ PL = PB1
.equ DIN = PB2

;-----
;
; Datensegment im RAM
;
;-----

.dseg
.org 0x60
Daten: .byte 2 ; Speicherplatz für Eingangsdaten

;-----
;
; Programmsegment im FLASH
;
;-----

.cseg
    ldi    temp1, LOW(RAMEND) ; Stackpointer initialisieren
    out    SPL, temp1
    ldi    temp1, HIGH(RAMEND)
    out    SPH, temp1

; CLK und PL als Ausgänge schalten

    ldi    temp1, (1<<clk) | (1<<pl)
    out    SCHIEBE_DDR, temp1

    sbi    schiebe_port, clk ; Takt im Ruhezustand immer auf 1
                                ; komische Schaltung im 74xx165

; Zwei Bytes einlesen

    ldi    ZL, low(Daten)
    ldi    ZH, high(Daten)
    ldi    temp1, 2
    rcall  schiebe_eingang

loop:
    rjmp   loop

;-----
;
; N Bytes seriell einlesen
;

```

```
; temp1 : N, Anzahl der Bytes
; Z      : Zeiger auf einen Datenbereich im SRAM
;-----

schiebe_eingang:
    push    temp2          ; Register sichern
    push    temp3

    cbi     schiebe_port, pl ; Daten parallel laden
    sbi     schiebe_port, pl

schiebe_eingang_byte_schleife:

    ldi     temp3, 8       ; Bitzähler
schiebe_eingang_bit_schleife:
    lsl     temp2          ; Daten weiterschieben

; das IO Bit Din in das niederwertigste Bit von temp2 kopieren

    sbic    schiebe_pin, din ; wenn Null, nächsten Befehl überspringen
    ori     temp2, 1        ; nein, Bit setzen

    cbi     SCHIEBE_PORT, CLK ; Taktausgang auf 0
    sbi     SCHIEBE_PORT, CLK ; und wieder zurück auf 1, dabei Daten schieben

    dec     temp3          ; Bitzähler um eins verringern
    brne   schiebe_eingang_bit_schleife ; wenn noch keine 8 Bits ausgegeben,
                                        ; nochmal

    st      z+,temp2       ; Datenbyte speichern
    dec     temp1          ; Anzahl Bytes um eins verringern
    brne   schiebe_eingang_byte_schleife ; wenn noch mehr Bytes zu lesen
                                        ; sind

    pop     temp3
    pop     temp2
    ret
```

18.2.5 Ansteuerung per SPI-Modul

```

; Porterweiterung für Eingänge mit Schieberegister 74xx165
; Ansteuerung per SPI-Modul

.include "m8def.inc"

.def temp1 = r16
.def temp2 = r17
.def temp3 = r18

; Pins anpassen
; diese müssen mit den SPI-Pins des AVR Typs übereinstimmen!

.equ SCHIEBE_DDR = DDRB
.equ SCHIEBE_PORT = PORTB
.equ PL = PB2 ; SS
.equ CLK = PB5 ; SCK
.equ DIN = PB4 ; MISO

;-----
;
; Datensegment im RAM
;
;-----

.dseg
.org 0x60
Daten: .byte 2 ; Speicherplatz für Eingangsdaten

;-----
;
; Programmsegment im FLASH
;
;-----

.cseg
    ldi temp1, LOW(RAMEND) ; Stackpointer initialisieren
    out SPL, temp1
    ldi temp1, HIGH(RAMEND)
    out SPH, temp1

; CLK und PL als Ausgänge schalten

    ldi temp1, (1<<CLK) | (1<<PL)
    out SCHIEBE_DDR, temp1
;
; SPI Modul konfigurieren
;
    ldi temp1, 0b01011000
    out SPCR, temp1 ; keine Interrupts, MSB first, Master
                    ; CPOL = 1, CPHA = 0
                    ; SCK Takt = 1/2 XTAL

    ldi temp1, 1
    out SPSR, temp1 ; double speed aktivieren
    out SPDR, temp1 ; Dummy Daten, um SPIF zu setzen

; Zwei Bytes einlesen

    ldi ZL, low(Daten)
    ldi ZH, high(Daten)
    ldi temp1, 2
    rcall schiebe_eingang

```

```
loop:
    rjmp    loop

;-----
;
; N Bytes seriell einlesen
;
; temp1 : N, Anzahl der Bytes
; Z      : Zeiger auf einen Datenbereich im SRAM
;-----
schiebe_eingang:
    push    temp2                ; Register sichern

    ; CLK ist im Ruhezustand schon auf HIGH, CPOL=1

    cbi     schiebe_port, pl      ; Daten parallel laden
    sbi     schiebe_port, pl

schiebe_eingang_1:
    sbis    SPSR,7               ; prüfe ob eine alte Übertragung beendet ist
    rjmp    schiebe_eingang_1

schiebe_eingang_byte_schleife:
    out     SPDR,temp1           ; beliebige Daten ins SPI Modul schreiben
    ; um die Übertragung zu starten

schiebe_eingang_2:
    sbis    SPSR,7               ; auf das Ende der Übertragung warten
    rjmp    schiebe_eingang_2

    in     temp2, spdr           ; Daten lesen
    st     z+,temp2              ; Datenbyte speichern
    dec    temp1                 ; Anzahl Bytes um eins verringern
    brne   schiebe_eingang_byte_schleife ; wenn noch mehr Bytes zu lesen
    ; sind

    pop    temp2
    ret
```

18.3 Bekannte Probleme

AVR Studio 4.12 (Build 498) hat Probleme bei der korrekten Simulation des SPI-Moduls.

- Der Double-Speed Modus funktioniert nicht.
- Das Bit SPIF im Register SPSR, welches laut Dokumentation nur lesbar ist, ist im Simulator auch schreibbar! Das kann zu Verwirrung und Fehlern in der Simulation führen.

Hardwareprobleme

- Wenn das SPI-Modul aktiviert wird, wird **NICHT** automatisch SPIF gesetzt, es bleibt auf Null. Damit würde die erste Abfrage in *Schiebe_aller* in einer Endlosschleife hängen bleiben. Deshalb muss nach der Initialisierung des SPI-Moduls ein Dummy Byte gesendet werden, damit am Ende der Übertragung SPIF gesetzt wird
- Da das SPI-Modul in Senderichtung nur einfach gepuffert ist, ist es nicht möglich absolut lückenlos Daten zu senden, auch wenn man mit **nop** eine feste minimale Zeit zwischen zwei Bytes warten würde. Zwischen zwei Bytes muss immer eine Pause von mind. 2 Systemtaktungen eingehalten werden.

18.4 Weblinks

- [AVR151: Setup And Use of The SPI](#) Atmel Application Note (PDF)

19 AVR-Tutorial: SRAM

19.1 SRAM - Der Speicher des Controllers

Nachdem in einem der vorangegangenen Kapitel eine [Software-PWM](#) vorgestellt und in einem weiteren Kapitel darüber gesprochen wurde, wie man mit [Schieberegistern](#) die Anzahl an I/O-Pins erhöhen kann, wäre es naheliegend, beides zu kombinieren und den ATmega8 mal 20 oder 30 LEDs ansteuern zu lassen. Wenn es da nicht ein Problem gäbe: die Software-PWM hält ihre Daten in Registern, so wie das praktisch alle Programme bisher machten. Während allerdings 6 PWM-Kanäle noch problemlos in den Registern untergebracht werden konnten, ist dies mit 30 oder noch mehr PWM-Kanälen nicht mehr möglich. Es gibt schlicht und ergreifend nicht genug Register.

Es gibt aber einen Ausweg. Der ATmega8 verfügt über 1kByte **SRAM** (statisches RAM). Dieses RAM wurde bereits indirekt durch den **Stack** benutzt. Bei jedem Aufruf eines Unterprogrammes, sei es über einen expliziten **CALL** (bzw. **RCALL**) oder einen Interrupt, wird die Rücksprungadresse irgendwo gespeichert. Dies geschieht genau in diesem SRAM. Auch **PUSH** und **POP** operieren in diesem Speicher.

Ein Programm darf Speicherzellen im **SRAM** direkt benutzen und dort Werte speichern bzw. von dort Werte einlesen. Es muss nur darauf geachtet werden, dass es zu keiner Kollision mit dem Stack kommt, in dem z.B. die erwähnten Rücksprungadressen für Unterprogramme gespeichert werden. Da viele Programme aber lediglich ein paar Byte **SRAM** brauchen, der Rücksprungstack von der oberen Grenze des **SRAM** nach unten wächst und der ATmega8 immerhin über **1kByte SRAM** verfügt, ist dies in der Praxis kein all zu großes Problem.

19.2 Das **.DSEG** und **.BYTE**

Um dem Assembler mitzuteilen, dass sich der folgende Abschnitt auf das SRAM bezieht, gibt es die Direktive **.DSEG** (Data Segment). Alle nach einer **.DSEG** Direktive folgenden Speicherreservierungen werden vom Assembler im SRAM durchgeführt.

Die Direktive **.BYTE** stellt dabei eine derartige Speicherreservierung dar. Es ermöglicht, der Speicherreservierung einen Namen zu geben und es erlaubt auch, nicht nur 1 Byte sondern eine ganze Reihe von Bytes unter einem Namen zu reservieren.

```

.DSEG                ; Umschalten auf das SRAM Datensegment
Counter: .BYTE 1     ; 1 Byte unter dem Namen 'Counter' reservieren
Test:    .BYTE 20    ; 20 Byte unter dem Namen 'Test' reservieren

```

19.3 spezielle Befehle

Für den Zugriff auf den **SRAM**-Speicher gibt es spezielle Befehle. Diese holen entweder den momentanen Inhalt einer Speicherzelle und legen ihn in einem Register ab oder legen den Inhalt eines Registers in einer **SRAM**-Speicherzelle ab.

19.3.1 LDS

Liest die angegebene **SRAM**-Speicherzelle und legt den gelesenen Wert in einem Register ab.

```
LDS r17, Counter      ; liest die Speicherzelle mit dem Namen
                     ; 'Counter'
                     ; und legt den gelesenen Wert im Register r17 ab
```

19.3.2 STS

Legt den in einem Register gespeicherten Wert in einer **SRAM**-Speicherzelle ab.

```
STS Counter, r17     ; Speichert den Inhalt von r17 in der
                     ; Speicherzelle 'Counter'
```

19.3.3 Beispiel

Eine mögliche Implementierung der [Software-PWM](#), die den PWM-Zähler sowie die einzelnen OCR-Grenzwerte im **SRAM** anstelle von Registern speichert, könnte z.B. so aussehen:

```
.include "m8def.inc"

.def temp = r16
.def temp1 = r17
.def temp2 = r18

.org 0x0000
    rjmp    main                ; Reset Handler
.org OVF0addr
    rjmp    timer0_overflow     ; Timer Overflow Handler

main:
    ldi    temp, LOW(RAMEND)    ; Stackpointer initialisieren
    out    SPL, temp
    ldi    temp, HIGH(RAMEND)
    out    SPH, temp

    ldi    temp, 0xFF          ; Port B auf Ausgang
    out    DDRB, temp

    ldi    temp2, 0
    sts    OCR_1, temp2
    ldi    temp2, 1
    sts    OCR_2, temp2
    ldi    temp2, 10
    sts    OCR_3, temp2
    ldi    temp2, 20
```

```

    sts     OCR_4, temp2
    ldi     temp2, 80
    sts     OCR_5, temp2
    ldi     temp2, 127
    sts     OCR_6, temp2

    ldi     temp, 0b00000001      ; CS00 setzen: Teiler 1
    out     TCCR0, temp

    ldi     temp, 0b00000001      ; TOIE0: Interrupt bei Timer Overflow
    out     TIMSK, temp

    sei

loop:   rjmp    loop

timer0_overflow:                 ; Timer 0 Overflow Handler
    lds     temp1, PWMCount      ; den PWM-Zaehler aus dem Speicher holen
    inc     temp1                ; Zaehler erhoehen
    cpi     temp1, 128          ; wurde 128 erreicht ?
    brne   WorkPWM             ; Nein
    clr     temp1               ; Ja: PWM-Zaehler wieder auf 0

WorkPWM:
    sts     PWMCount, temp1      ; den PWM-Zaehler wieder speichern
    ldi     temp, 0b11000000     ; 0 .. LED an, 1 .. LED aus

    lds     temp2, OCR_1
    cp      temp1, temp2        ; Ist der Grenzwert für LED 1 erreicht
    brlt   OneOn
    ori     temp, $01

OneOn:   lds     temp2, OCR_2
    cp      temp1, temp2        ; Ist der Grenzwert für LED 2 erreicht
    brlt   TwoOn
    ori     temp, $02

TwoOn:   lds     temp2, OCR_3
    cp      temp1, temp2        ; Ist der Grenzwert für LED 3 erreicht
    brlt   ThreeOn
    ori     temp, $04

ThreeOn: lds     temp2, OCR_4
    cp      temp1, temp2        ; Ist der Grenzwert für LED 4 erreicht
    brlt   FourOn
    ori     temp, $08

FourOn:  lds     temp2, OCR_5
    cp      temp1, temp2        ; Ist der Grenzwert für LED 5 erreicht
    brlt   FiveOn
    ori     temp, $10

FiveOn:  lds     temp2, OCR_6
    cp      temp1, temp2        ; Ist der Grenzwert für LED 6 erreicht
    brlt   SetBits
    ori     temp, $20

SetBits:                               ; Die neue Bitbelegung am Port ausgeben
    out     PORTB, temp

    reti

.DSEG                                  ; das Folgende kommt ins SRAM

```

```

PWMCount: .BYTE 1 ; Der PWM-Counter (0 bis 127)
OCR_1: .BYTE 1 ; 6 Bytes für die OCR-Register
OCR_2: .BYTE 1
OCR_3: .BYTE 1
OCR_4: .BYTE 1
OCR_5: .BYTE 1
OCR_6: .BYTE 1

```

19.4 Spezielle Register

19.4.1 Der Z-Pointer (R30 und R31)

Das Registerpärchen **R30** und **R31** kann zu einem einzigen logischen Register zusammengefasst werden und heisst dann **Z-Pointer**. Diesem kann eine spezielle Aufgabe zukommen, indem er als Adressangabe fungieren kann, von welcher Speicherzelle im SRAM ein Ladevorgang (bzw. Speichervorgang) durchgeführt werden soll. Anstatt die Speicheradresse wie beim **LDS** bzw. **STS** direkt im Programmcode anzugeben, kann diese Speicheradresse zunächst in den **Z-Pointer** geladen werden und der Lesevorgang (Schreibvorgang) über diesen **Z-Pointer** abgewickelt werden. Dadurch wird aber die **SRAM**-Speicheradresse berechenbar, dann natürlich kann mit den Registern **R30** und **R31**, wie mit den anderen Registern auch, Arithmetik betrieben werden. Besonders komfortabel ist dies, da im Ladebefehl noch zusätzliche Manipulationen angegeben werden können, die oft benötigte arithmetische Operationen implementieren.

19.4.2 LD

- **LD rxx, Z**
- **LD rxx, Z+**
- **LD rxx, -Z**

Lädt das Register **rx** mit dem Inhalt der Speicherzelle, deren Adresse im **Z-Pointer** angegeben ist. Bei den Varianten mit **Z+** bzw. **-Z** wird zusätzlich der **Z-Pointer** *nach* der Operation um 1 erhöht bzw. *vor* der Operation um 1 vermindert.

19.4.3 LDD

- **LDD rxx, Z+q**

Hier erfolgt der Zugriff wieder über den **Z-Pointer** wobei vor dem Zugriff zur Adressangabe im **Z-Pointer** noch das Displacement **q** addiert wird.

Enthält also der **Z-Pointer** die Adresse \$1000 und sei **q** der Wert \$28, so wird mit einer Ladeanweisung

```
LDD r18, Z + $28
```

der Inhalt der Speicherzellen $\$1000 + \$28 = \$1028$ in das Register r18 geladen.

Der Wertebereich für **q** erstreckt sich von 0 bis 63.

19.4.4 ST

- **ST Z, rxx**
- **ST Z+, rxx**
- **ST -Z, rxx**

Speichert den Inhalt des Register **rx** in der Speicherzelle, deren Adresse im **Z-Pointer** angegeben ist. Bei den Varianten mit **Z+** bzw. **-Z** wird zusätzlich der **Z-Pointer nach** der Operation um 1 erhöht bzw. **vor** der Operation um 1 vermindert.

19.4.5 STD

- **STD Z+q, rxx**

Hier erfolgt der Zugriff wieder über den **Z-Pointer** wobei vor dem Zugriff zur Adressangabe im **Z-Pointer** noch das Displacement **q** addiert wird.

Enthält also der **Z-Pointer** die Adresse \$1000 und sei **q** der Wert \$28, so wird mit einer Speicheranweisung

```
STD Z + $28, r18
```

der Inhalt des Registers r18 in der Speicherzellen \$1000 + \$28 = \$1028 gespeichert.

Der Wertebereich für **q** erstreckt sich von 0 bis 63.

19.4.6 Beispiel

Durch Verwendung des **Z-Pointers** ist es möglich die Interrupt Funktion wesentlich kürzer und vor allem ohne ständige Wiederholung von im Prinzip immer gleichem Code zu formulieren. Man stelle sich nur mal vor wie dieser Code aussehen würde, wenn anstelle von 6 PWM Stufen, deren 40 gebraucht würden. Mit dem **Z-Pointer** ist es möglich diesen auf das erste der OCR Bytes zu setzen und dann in einer Schleife eines nach dem anderen abzuarbeiten. Nach dem Laden des jeweiligen OCR Wertes, wird der **Z-Pointer** automatisch durch den **LD**-Befehl auf das nächste zu verarbeitende OCR Byte weitergezählt.

```
.include "m8def.inc"

.def temp = r16
.def temp1 = r17
.def temp2 = r18
.def temp3 = r19

.org 0x0000
    rjmp    main                ; Reset Handler
.org OVF0addr
    rjmp    timer0_overflow     ; Timer Overflow Handler

main:
    ldi    temp, LOW(RAMEND)    ; Stackpointer initialisieren
    out    SPL, temp
    ldi    temp, HIGH(RAMEND)
    out    SPH, temp

    ldi    temp, 0xFF          ; Port B auf Ausgang
    out    DDRB, temp
```

```

ldi    r30,LOW(OCR)           ; den Z-Pointer mit dem Start
                                ; der OCR Bytes laden
ldi    r31,HIGH(OCR)

ldi    temp2, 0
st     Z+, temp2
ldi    temp2, 1
st     Z+, temp2
ldi    temp2, 10
st     Z+, temp2
ldi    temp2, 20
st     Z+, temp2
ldi    temp2, 80
st     Z+, temp2
ldi    temp2, 127
st     Z+, temp2

ldi    temp2, 0               ; den PWM Counter auf 0 setzen
sts    PWMCount, temp2

ldi    temp, 0b00000001      ; CS00 setzen: Teiler 1
out    TCCR0, temp

ldi    temp, 0b00000001      ; TOIE0: Interrupt bei Timer Overflow
out    TIMSK, temp

sei

loop:   rjmp    loop

timer0_overflow:             ; Timer 0 Overflow Handler
lds    temp1, PWMCount      ; den PWM Zaehler aus dem Speicher holen
inc    temp1                ; Zaehler erhoehen
cpi    temp1, 128           ; wurde 128 erreicht ?
brne   WorkPWM             ; Nein
clr    temp1               ; Ja: PWM Zaehler auf 0 setzen

WorkPWM:
sts    PWMCount, temp1      ; den PWM Zaehler wieder speichern

ldi    r30,LOW(OCR)         ; den Z-Pointer mit dem Start
                                ; der OCR Bytes laden
ldi    r31,HIGH(OCR)
ldi    temp3, $01          ; das Bitmuster für PWM Nr. i
ldi    temp, 0b11000000    ; 0 .. Led an, 1 .. Led aus

pwmloop:
ld     temp2, Z+           ; den OCR Wert für PWM Nr. i holen
                                ; und Z-Pointer erhöhen
cp     temp1, temp2        ; ist der Grenzwert für
                                ; PWM Nr. i erreicht?

brne   LedOn
or     temp, temp3

LedOn:
lsl    temp3               ; das Bitmuster schieben
cpi    temp3, $40          ; alle Bits behandelt ?
brne   pwmloop            ; nächster Schleifendurchlauf

out    PORTB, temp         ; Die neue Bitbelegung am Port ausgeben
reti

.DSEG                       ; das Folgende kommt ins SRAM

PWMCount: .BYTE 1          ; der PWM Zaehler (0 bis 127)

```

OCR: `.BYTE 6` ; 6 Bytes für die OCR Register

19.4.7 X-Pointer, Y-Pointer

Neben dem **Z-Pointer** gibt es noch den **X-Pointer** bzw. **Y-Pointer**. Sie werden gebildet von den Registerpärchen

- **X-Pointer**: r26, r27
- **Y-Pointer**: r28, r29
- **Z-Pointer**: r30, r31

Alles über den **Z-Pointer** gesagte gilt sinngemäß auch für den **X-Pointer** bzw. **Y-Pointer** mit einer Ausnahme: Mit dem **X-Pointer** ist kein Zugriff **LDD/STD** mit einem Displacement möglich.

19.5 Siehe auch

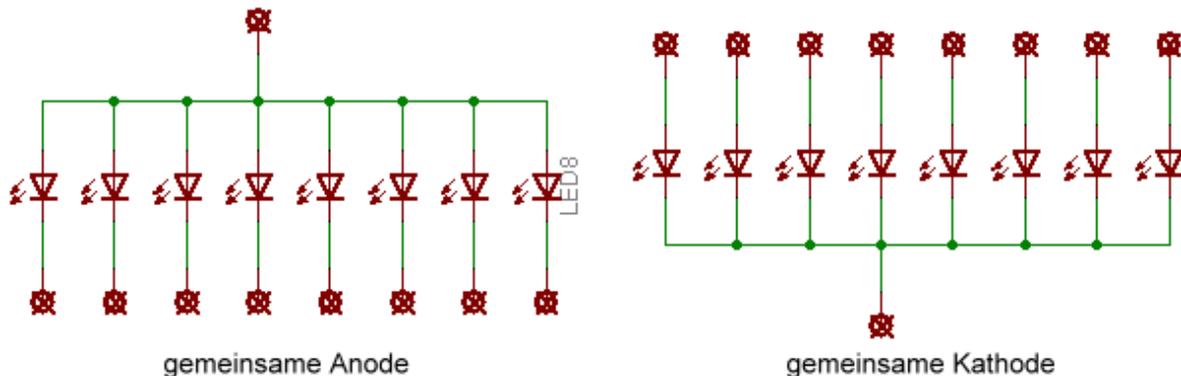
- [Adressierung](#)

20 AVR-Tutorial: 7-Segment-Anzeige

Die Ausgabe von Zahlenwerten auf ein Text-LCD ist sicherlich das Nonplusultra, aber manchmal liegen die Dinge sehr viel einfacher. Um beispielsweise eine Temperatur anzuzeigen ist ein LCD etwas Overkill. In solchen Fällen kann die Ausgabe auf ein paar 7-Segmentanzeigen gemacht werden. Ausserdem haben 7-Segmentanzeigen einen ganz besonderen Charme :-)

20.1 Typen von 7-Segment Anzeigen

Eine einzelne 7-Segmentanzeige besteht aus sieben (mit Dezimalpunkt acht) einzelnen [LEDs](#) in einem gemeinsamen Gehäuse. Aus praktischen Gründen wird einer der beiden Anschlüsse jeder LED mit den gleichen Anschlüssen der anderen LED verbunden und gemeinsam aus dem Gehäuse herausgeführt. Das spart Pins am Gehäuse und später bei der Ansteuerung. Dementsprechend spricht man von Anzeigen mit *gemeinsamer Anode* (engl. common anode) bzw. *gemeinsamer Kathode* (engl. common cathode) .

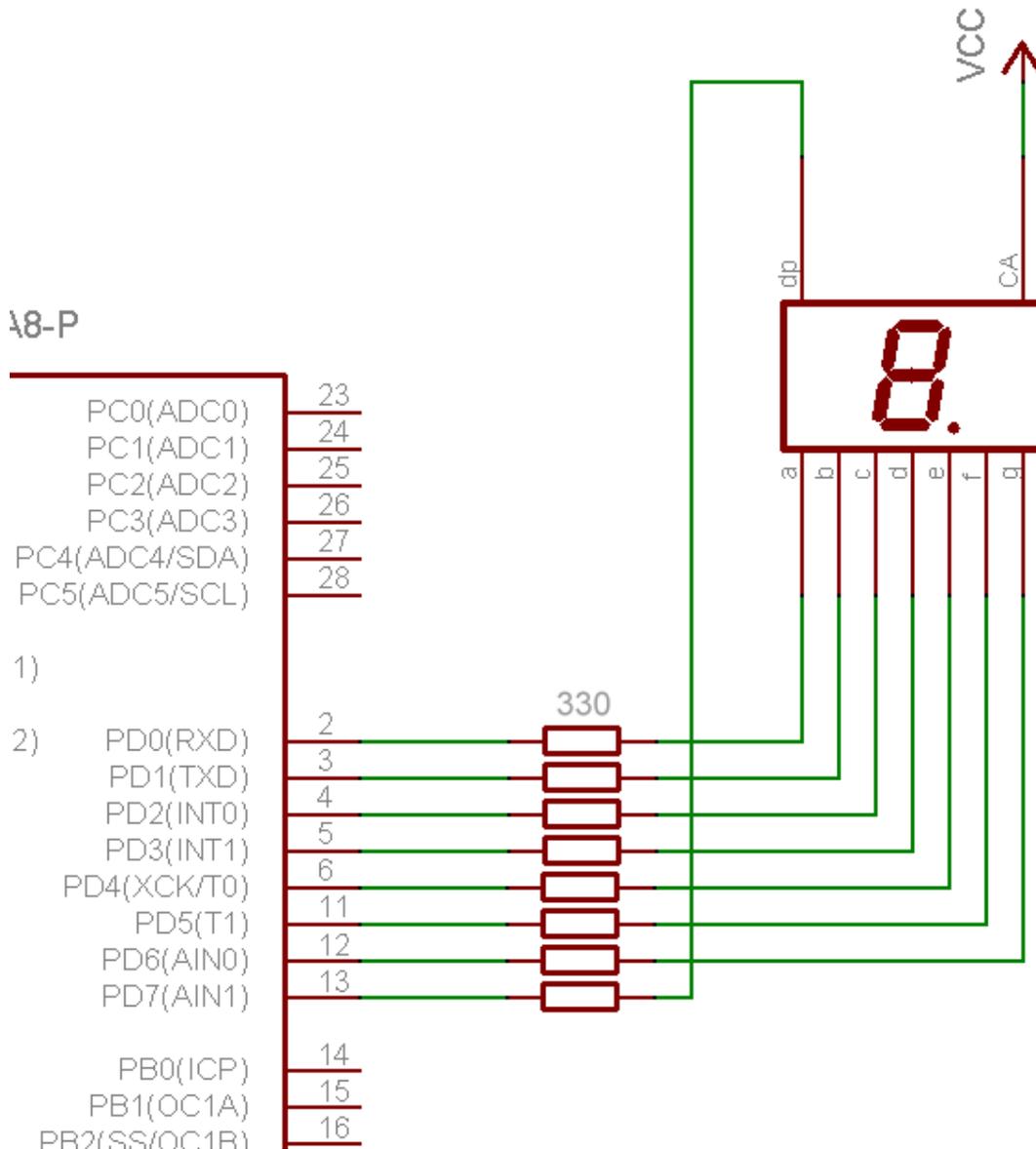


Interne Verschaltung der 7-Segmentanzeigen

20.2 Eine einzelne 7-Segment Anzeige

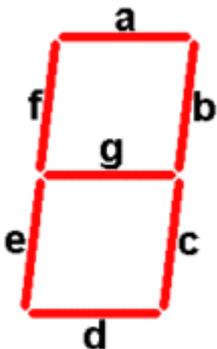
20.2.1 Schaltung

Eine einzelne 7-Segmentanzeige wird nach dem folgenden Schema am **Port D** des Mega8 angeschlossen. Port D wurde deshalb gewählt, da er am Mega8 als einziger Port aus den vollen 8 Bit besteht. Die 7-Segmentanzeige hat eine gemeinsame Anode.



Ansteuerung einer einzelnen 7-Segmentanzeige

Welcher Pin an der Anzeige welchem Segment (a-g) bzw. dem Dezimalpunkt entspricht wird am besten dem Datenblatt zur Anzeige entnommen. Im Folgenden wird von dieser Segmentbelegung ausgegangen:



Pinbelegung der 7-Segmentanzeige

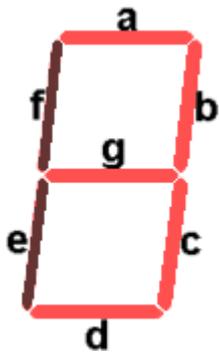
Wird eine andere Belegung genutzt dann ist das prinzipiell möglich, jedoch müsste das in der Programmierung berücksichtigt werden.

Da eine 7-Segmentanzeige konzeptionell sieben einzelnen LEDs entspricht, ergibt sich im Prinzip keine Änderung in der Ansteuerung einer derartigen Anzeige im Vergleich zur LED Ansteuerung wie sie im [AVR-Tutorial: IO-Grundlagen](#) gezeigt wird. Genau wie bei den einzelnen LEDs wird eine davon eingeschaltet, indem der zugehörige Port Pin auf 0 gesetzt wird. Aber anders als bei einzelnen LED möchte man mit einer derartigen Anzeige eine Ziffernanzeige erhalten. Dazu ist es lediglich notwendig, für eine bestimmte Ziffer die richtigen LEDs einzuschalten.

20.2.2 Codetabelle

Die Umkodierung von einzelnen Ziffern in ein bestimmtes Ausgabemuster bezeichnet man als Codetabelle. Die auszugebende Ziffer wird als Offset zum Anfang dieser Tabelle aufgefasst und aus der Tabelle erhält man ein Byte (Code), welches direkt auf den Port ausgegeben werden kann und das entsprechende Bitmuster enthält, sodass die für diese Ziffer notwendigen LED ein- bzw. ausgeschaltet sind.

Beispiel: Um die Ziffer **3** anzuzeigen, müssen auf der Anzeige die Segmente **a**, **b**, **c**, **d** und **g** aufleuchten. Alle anderen Segmente sollen dunkel sein.



Darstellung der Ziffer "3"

Aus dem Anschlußschema ergibt sich, dass die dazu notwendige Ausgabe am Port binär **10110000** lauten muss. Untersucht man dies für alle Ziffern, so ergibt sich folgende Tabelle:

```
.db 0b11000000 ; 0: a, b, c, d, e, f
.db 0b11111001 ; 1: b, c
.db 0b10100100 ; 2: a, b, d, e, g
.db 0b10110000 ; 3: a, b, c, d, g
.db 0b10011001 ; 4: b, c, f, g
.db 0b10010010 ; 5: a, c, d, f, g
.db 0b10000010 ; 6: a, c, d, e, f, g
.db 0b11111000 ; 7: a, b, c
.db 0b10000000 ; 8: a, b, c, d, e, f, g
.db 0b10010000 ; 9: a, b, c, d, f, g
```

20.2.3 Programm

Das Testprogramm stellt nacheinander die Ziffern 0 bis 9 auf der 7-Segmentanzeige dar. Die jeweils auszugebende Zahl steht im Register **count** und wird innerhalb der Schleife um jeweils 1 erhöht. Hat das Register den Wert 10 erreicht, so wird es wieder auf 0 zurückgesetzt. Nach der Erhöhung folgt eine Warteschleife, welche dafür sorgt, dass bis zur nächsten Ausgabe eine gewisse Zeit vergeht. Normalerweise macht man keine derartigen langen Warteschleifen, aber hier geht es ja nicht ums Warten sondern um die Ansteuerung einer 7-Segmentanzeige. Einen Timer dafür zu benutzen wäre zunächst zuviel Aufwand.

Die eigentliche Ausgabe und damit der in diesem Artikel interessante Teil findet jedoch direkt nach dem Label *loop* statt. Die bereits bekannte Codetabelle wird mittels **.db** Direktive (**d**efine **b**yte) in den [Flash-Speicher](#) gelegt. Der Zugriff darauf erfolgt über den Z-Pointer und dem Befehl **lpm**. Zusätzlich wird vor dem Zugriff noch der Wert des Registers **count** und damit der aktuelle Zählerwert zum Z-Pointer addiert.

Beachtet werden muss nur, dass der Zählerwert verdoppelt werden muss. Dies hat folgenden Grund: Wird die Tabelle so wie hier gezeigt mittels einzelnen **.db** Anweisungen aufgebaut, so fügt der Assembler sog. **Padding Bytes** zwischen die einzelnen Bytes ein, damit jede **.db** Anweisung auf einer geraden Speicheradresse liegt. Dies ist eine direkte Folge der Tatsache, dass der Flash-Speicher **wortweise** (16 Bit) und nicht **byteweise** (8 Bit) organisiert ist. Da aber von einem **.db** in der Tabelle zum nächsten **.db** eine Differenz von 2 Bytes vorliegt, muss dies in der Berechnung berücksichtigt werden. Im zweiten Beispiel auf dieser Seite wird dies anders gemacht. Dort wird gezeigt wie man durch eine andere Schreibweise der Tabelle das Erzeugen der Padding Bytes durch den Assembler verhindern kann.

Interessant ist auch, dass in der Berechnung ein Register benötigt wird, welches den Wert 0 enthält. Dies deshalb, da es im AVR keinen Befehl gibt der eine Konstante mit gleichzeitiger Berücksichtigung des Carry-Bits addieren kann. Daher muss diese Konstante zunächst in ein Register geladen werden und erst dann kann die Addition mithilfe dieses Registers vorgenommen werden. Das Interessante daran ist nun, dass dieser Umstand in sehr vielen Programmen vorkommt und es sich bei der Konstanten in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle um die Konstante 0 handelt. Viele Programmierer reservieren daher von vorne herein ein Register für diesen Zweck und nennen es das Zero-Register. Sinnvollerweise legt man dieses Register in den Bereich r0..r15, da diese Register etwas zweitklassig sind (ldi, cpi etc. funktionieren nicht damit).

```
.include "m8def.inc"

.def zero = r1
.def count = r16
.def temp1 = r17

.org 0x0000
    rjmp    main                ; Reset Handler
;
main:
    ldi    temp1, LOW(RAMEND)   ; Stackpointer initialisieren
    out    SPL, temp1
    ldi    temp1, HIGH(RAMEND)
    out    SPH, temp1
;
    ldi    temp1, $FF           ; die Anzeige hängt am Port D
    out    DDRD, temp1         ; alle Pins auf Ausgang
;
    ldi    count, 0             ; und den Zähler initialisieren
    mov    zero, count
;
loop:
```

20 AVR-Tutorial: 7-Segment-Anzeige

```
ldi    ZL, LOW(Codes*2) ; die Startadresse der Tabelle in den
ldi    ZH, HIGH(Codes*2) ; Z-Pointer laden

mov    temp1, count     ; die wortweise Adressierung der Tabelle
add    temp1, count     ; berücksichtigen

add    ZL, temp1        ; und ausgehend vom Tabellenanfang
adc    ZH, zero         ; die Adresse des Code Bytes berechnen

lpm                                ; dieses Code Byte in
                                ; das Register r0 laden

out    PORTD, r0        ; und an die Anzeige ausgeben
;

inc    count            ; den Zähler erhöhen, wobei der Zähler
cpi    count, 10       ; immer nur von 0 bis 9 zählen soll
brne   wait
ldi    count, 0

;
wait:  ldi    r17, 10    ; und etwas warten, damit die Ziffer auf
wait0: ldi    r18, 0     ; der Anzeige auch lesbar ist, bevor die
wait1: ldi    r19, 0     ; nächste Ziffer gezeigt wird
wait2: dec    r19
brne   wait2
dec    r18
brne   wait1
dec    r17
brne   wait0

;
rjmp   loop            ; auf zur nächsten Ausgabe
;
Codes: ; Die Codetabelle für die Ziffern 0 bis 9
        ; sie regelt, welche Segmente für eine
        ; bestimmte Ziffer eingeschaltet werden
        ; müssen
        ;
        .db    0b11000000 ; 0: a, b, c, d, e, f
        .db    0b11111001 ; 1: b, c
        .db    0b10100100 ; 2: a, b, d, e, g
        .db    0b10110000 ; 3: a, b, c, d, g
        .db    0b10011001 ; 4: b, c, f, g
        .db    0b10010010 ; 5: a, c, d, f, g
        .db    0b10000010 ; 6: a, c, d, e, f, g
        .db    0b11111000 ; 7: a, b, c
        .db    0b10000000 ; 8: a, b, c, d, e, f, g
        .db    0b10010000 ; 9: a, b, c, d, f, g
```

20.4 Mehrere 7-Segment Anzeigen (Multiplexen)

Mit dem bisherigen Vorwissen könnte man sich jetzt daran machen, auch einmal drei oder vier Anzeigen mit dem Mega8 anzusteuern. Leider gibt es da ein Problem, denn für eine Anzeige sind acht Portpins notwendig - vier Anzeigen würden demnach 32 Portpins benötigen. Die hat der Mega8 aber nicht. Dafür gibt es aber mehrere Auswege. Schieberegister sind bereits in einem anderen [Tutorial](#) beschrieben. Im folgenden werden wir uns daher das [Multiplexen](#) einmal näher ansehen.

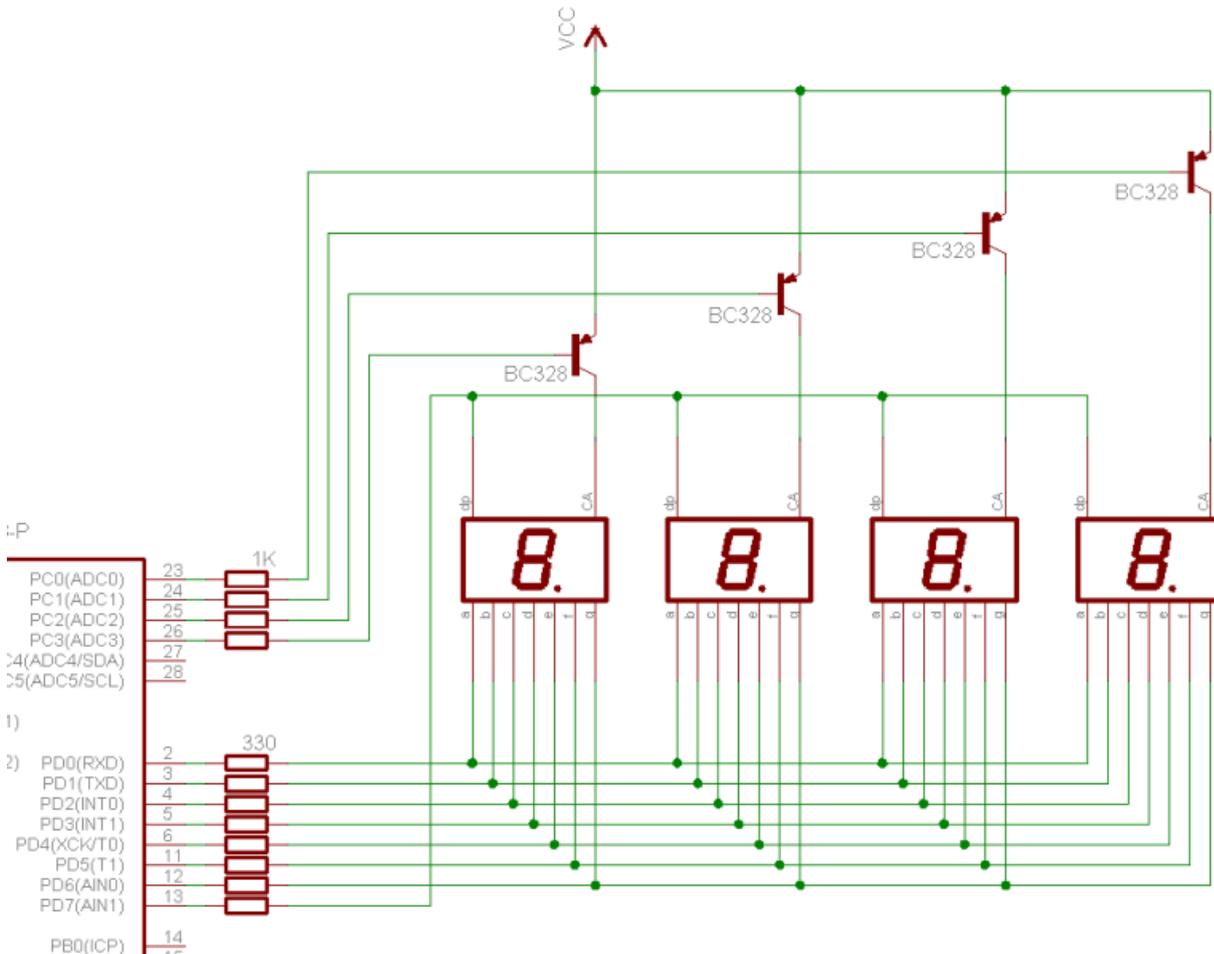
Multiplexen bedeutet, dass nicht alle vier Anzeigen gleichzeitig eingeschaltet sind, sondern immer nur Eine für eine kurze Zeit. Geschieht der Wechsel zwischen den Anzeigen schneller als wir Menschen das wahrnehmen können, so erscheinen uns alle vier Anzeigen gleichzeitig in Betrieb zu sein obwohl immer nur Eine für eine kurze Zeit aufleuchtet. Dabei handelt es sich praktisch um eine [LED-Matrix](#). Die vier Anzeigen können sich dadurch die einzelnen Segmentleitungen teilen und alles was benötigt wird sind 4 zusätzliche Steuerleitungen für die 4 Anzeigen, mit denen jeweils eine Anzeige eingeschaltet wird. Dieses Ein/Ausschalten wird mit einem npn-Transistor in der Versorgungsspannung jeder Anzeige realisiert, die vom Mega8 am **PortC** angesteuert werden.

Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die vier Anzeigen nicht mehr ganz so hell leuchten wie die eine einzelne Anzeige ohne Multiplexen. Bei wenigen Anzeigen ist dies praktisch kaum sichtbar, erst bei mehreren Anzeigen wird es deutlich. Um dem entgegen zu wirken lässt man pro Segment einfach mehr Strom fließen, bei LEDs dürfen dann 20mA überschritten werden. Als Faustregel gilt, dass der n-fache Strom für die (1/n)-fache Zeit fließen darf. Details finden sich im Datenblatt unter dem Punkt **Peak-Current** (Spitzenstrom) und **Duty-Cycle** ([Tastverhältnis](#)).

Ein weiter Aspekt ist die Multiplexfrequenz. Sie muss hoch genug sein, um ein Flimmern der Anzeige zu vermeiden. Das menschliche Auge ist träge, im Kino reichen 24 Bilder pro Sekunde, beim Fernseher sind es 50. Um auf der sicheren Seite zu sein, dass auch Standbilder ruhig wirken, sollen jedes Segment mit mindestens 100 Hz angesteuert werden, es also mindestens alle 10ms angeschaltet ist. In Ausnahmefällen können aber selbst 100 Hz können noch flimmern, z.B. wenn die Anzeige schnell bewegt wird.

Neben dem Flimmern gibt es aber noch ein anderes Problem wenn insgesamt zu viele Anzeigen gemultiplext werden. Die Pulsströme durch die LEDs werden einfach zu hoch. Die meisten LEDs kann man bis 8:1 multiplexen, manchmal auch bis 16:1. Hier fließt aber schon ein Pulsstrom von 320mA (16 x 20mA), was nicht mehr ganz ungefährlich ist. **Strom lässt sich durch Multiplexen nicht sparen**, denn die verbrauchte Leistung ändert sich beim n-fachen Strom für 1/n der Zeit nicht. Kritisch wird es aber, wenn das Multiplexen deaktiviert wird (Ausfall der Ansteuerung durch Hardware- oder Softwarefehler) und der n-fache Strom dauerhaft durch eine Segment-LED fließt. Bei 320mA werden die meisten LEDs innerhalb von Sekunden zerstört. Hier muss sichergestellt werden, dass sowohl Programm (Breakpoint im Debugger) als auch Schaltung (Reset, Power-On) diesen Fall verhindern. Prinzipiell sollte man immer den Pulsstrom und die Multiplexfrequenz einmal überschlagen, bevor der LötKolben angeworfen wird.

20.4.1 Schaltung



Ansteuerung von vier 7-Segmentanzeigen per Multiplex

Sollten die Anzeigen zu schwach leuchten so können, wie bereits beschrieben, die Ströme durch die Anzeigen erhöht werden. Dazu werden die 330 Ohm Widerstände kleiner gemacht. Da hier 4 Anzeigen gemultiplext werden, würden sich Widerstände in der Größenordnung von 100 Ohm anbieten. Auch kann dann der Basiswiderstand der Transistoren verkleinert werden.

20.4.2 Programm

Das folgende Programm zeigt eine Möglichkeit zum Multiplexen. Dazu wird ein Timer benutzt, der in regelmässigen Zeitabständen einen Overflow [Interrupt](#) auslöst. Innerhalb der Overflow Interrupt Routine wird

- die momentan erleuchtete Anzeige abgeschaltet
- das Muster für die nächste Anzeige am Port D ausgegeben
- die nächste Anzeige durch eine entsprechende Ausgabe am Port C eingeschaltet

Da Interruptfunktionen kurz sein sollten, holt die Interrupt Routine das auszugebende Muster für jede Stelle direkt aus dem SRAM, wo sie die Ausgabefunktion hinterlassen hat. Dies hat 2 Vorteile:

- Zum einen braucht die Interrupt Routine die Umrechnung einer Ziffer in das entsprechende Bitmuster nicht selbst machen
- Zum anderen ist die Anzeigefunktion dadurch unabhängig von dem was angezeigt wird. Die Interrupt Routine gibt das Bitmuster so aus, wie sie es aus dem SRAM liest.

Die Funktion `out_number` ist in einer ähnlichen Form auch schon an anderer Stelle vorgekommen: Sie verwendet die Technik der fortgesetzten Subtraktionen um eine Zahl in einzelne Ziffern zu zerlegen. Sobald jede Stelle feststeht, wird über die Codetabelle das Bitmuster aufgesucht, welches für die Interrupt Funktion an der entsprechenden Stelle im SRAM abgelegt wird.

Achtung: Anders als bei der weiter oben gezeigten Variante wurde die Codetabelle ohne Padding Bytes angelegt. Dadurch ist es auch nicht notwendig derartige Padding Bytes in der Programmierung zu berücksichtigen.

Der Rest ist wieder die übliche Portinitialisierung, Timerinitialisierung und eine einfache Anwendung, indem ein 16 Bit Zähler laufend erhöht und über die Funktion `out_number` ausgegeben wird. Wie schon im ersten Beispiel, wurde auch hier kein Aufwand getrieben: Zähler um 1 erhöhen und mit Warteschleifen eine gewisse Verzögerungszeit einhalten. In einer realen Applikation wird man das natürlich nicht so machen, sondern ebenfalls einen Timer für diesen Teilaspekt der Aufgabenstellung einsetzen.

Weiterhin ist auch noch interessant. Die Overflow Interrupt Funktion ist wieder so ausgelegt, dass sie völlig transparent zum restlichen Programm ablaufen kann. Dies bedeutet, dass alle verwendeten Register beim Aufruf der Interrupt Funktion gesichert und beim Verlassen wiederhergestellt werden. Dadurch ist man auf der absolut sicheren Seite, hat aber den Nachteil etwas Rechenzeit für manchmal unnötige Sicherungs- und Aufräumarbeiten zu 'verschwenden'. Stehen genug freie Register zur Verfügung, dann wird man natürlich diesen Aufwand nicht treiben, sondern ein paar Register ausschließlich für die Zwecke der Behandlung der 7-Segment Anzeige abstellen und sich damit den Aufwand der Registersicherung sparen (mit Ausnahme von **SREG** natürlich!).

```
.include "m8def.inc"

.def temp = r16
.def temp1 = r17
.def temp2 = r18

.org 0x0000
    rjmp     main           ; Reset Handler
.org OVf0addr
    rjmp     multiplex

;
;*****
; Die Multiplexfunktion
;
; Aufgabe dieser Funktion ist es, bei jedem Durchlauf eine andere Stelle
; der 7-Segmentanzeige zu aktivieren und das dort vorgesehene Muster
; auszugeben
; Die Funktion wird regelmässig in einem Timer Interrupt aufgerufen
;
multiplex:
    push    temp           ; Alle verwendeten Register sichern
    push    temp1
    in      temp, SREG
    push    temp
    push    ZL
    push    ZH
```

```

ldi    temp1, 0           ; Die 7 Segment ausschalten
out    PORTC, temp1

                                ; Das Muster für die nächste Stelle
                                ; ausgeben
                                ; Dazu zunächst mal berechnen, welches
                                ; Segment als nächstest ausgegeben
                                ; werden muss

ldi    ZL, LOW( Segment0 )
ldi    ZH, HIGH( Segment0 )
lds    temp, NextSegment
add    ZL, temp
adc    ZH, temp1

ld     temp, Z           ; das entsprechende Muster holen
                                ; und ausgeben

out    PORTD, temp

lds    temp1, NextDigit  ; Und die betreffende Stelle einschalten
out    PORTC, temp1

lds    temp, NextSegment
inc    temp
lsl    temp1           ; beim nächsten Interrupt kommt reihum
cpi    temp1, $10      ; die nächste Stelle dran.
brne   multil
ldi    temp, 0
ldi    temp1, $01

multil:
sts    NextSegment, temp
sts    NextDigit, temp1

pop    ZH           ; die gesicherten Register
                                ; wiederherstellen

pop    ZL
pop    temp
out    SREG, temp
pop    temp1
pop    temp
reti

;
;*****
; 16 Bit-Zahl aus dem Registerpaar temp (=low), temp1 (=high) ausgeben
; die Zahl muss kleiner als 10000 sein, da die Zehntausenderstelle
; nicht berücksichtigt wird.
; Werden mehr als 4 7-Segmentanzeigen eingesetzt, dann muss dies
; natürlich auch hier berücksichtigt werden
;
out_number:
push   temp
push   temp1

ldi    temp2, -1       ; Die Tausenderstelle bestimmen
_out_tausend:
inc    temp2
subi   temp, low(1000) ; -1000
sbci   temp1, high(1000)
brcc   _out_tausend

ldi    ZL, low(2*Codes) ; fuer diese Ziffer das Codemuster fuer
ldi    ZH, high(2*Codes) ; die Anzeige in der Codetabelle
                                ; nachschlagen

```

```

add    ZL, temp2

lpm
sts    Segment3, r0      ; und dieses Muster im SRAM ablegen
                        ; die OvI Routine sorgt dann fuer
                        ; die Anzeige

ldi    temp2, 10

_out_hundert:          ; die Hunderterstelle bestimmen
dec    temp2
subi   temp, low(-100)  ; +100
sbci   temp1, high(-100)
brcs   _out_hundert

ldi    ZL, low(2*Codes) ; wieder in der Codetabelle das
ldi    ZH, high(2*Codes) ; entsprechende Muster nachschlagen
add    ZL, temp2

lpm
sts    Segment2, r0     ; und im SRAM hinterlassen

ldi    temp2, -1

_out_zehn:             ; die Zehnerstelle bestimmen
inc    temp2
subi   temp, low(10)    ; -10
sbci   temp1, high(10)
brcc   _out_zehn

ldi    ZL, low(2*Codes) ; wie gehabt: Die Ziffer in der
ldi    ZH, high(2*Codes) ; Codetabelle aufsuchen
add    ZL, temp2

lpm
sts    Segment1, r0     ; und entsprechend im SRAM ablegen

_out_einer:           ; bleiben noch die Einer
subi   temp, low(-10)   ; -10
sbci   temp1, high(-10)

ldi    ZL, low(2*Codes) ; ... Codetabelle
ldi    ZH, high(2*Codes)
add    ZL, temp

lpm
sts    Segment0, r0     ; und ans SRAM ausgeben

pop    temp1
pop    temp

ret

;
;*****
;
main:
ldi    temp, LOW(RAMEND) ; Stackpointer initialisieren
out    SPL, temp
ldi    temp, HIGH(RAMEND)
out    SPH, temp

;
ldi    temp, $FF
out    DDRD, temp

;
ldi    temp, $0F
out    DDRC, temp

```

```

;                                     initialisieren der Steuerung für die
;                                     Interrupt Routine

    ldi    temp, 1
    sts    NextDigit, temp

    ldi    temp, 0
    sts    NextSegment, temp

    ldi    temp, ( 1 << CS01 ) | ( 1 << CS00 )
    out    TCCR0, temp

    ldi    temp, 1 << TOIE0
    out    TIMSK, temp

    sei

    ldi    temp, 0
    ldi    temp1, 0

loop:
    inc    temp
    brne  _loop
    inc    temp1

_loop:
    call   out_number

    cpi    temp, low( 4000 )
    brne  wait
    cpi    temp1, high( 4000 )
    brne  wait

    ldi    temp, 0
    ldi    temp1, 0

wait:
wait0:
wait1:
wait2:
    ldi    r21, 1
    ldi    r22, 0
    ldi    r23, 0
    dec    r23
    brne  wait2
    dec    r22
    brne  wait1
    dec    r21
    brne  wait0

    rjmp  loop

Codes:
    .db    0b11000000, 0b11111001    ; 0: a, b, c, d, e, f
                                           ; 1: b, c
    .db    0b10100100, 0b10110000    ; 2: a, b, d, e, g
                                           ; 3: a, b, c, d, g
    .db    0b10011001, 0b10010010    ; 4: b, c, f, g
                                           ; 5: a, c, d, f, g
    .db    0b10000010, 0b11111000    ; 6: a, c, d, e, f, g
                                           ; 7: a, b, c
    .db    0b10000000, 0b10010000    ; 8: a, b, c, d, e, f, g
                                           ; 9: a, b, c, d, f, g

    .DSEG
NextDigit:    .byte 1                ; Bitmuster für die Aktivierung
                                           ; des nächsten Segments
NextSegment:  .byte 1                ; Nummer des nächsten aktiven Segments
Segment0:     .byte 1                ; Ausgabemuster für Segment 0
Segment1:     .byte 1                ; Ausgabemuster für Segment 1

```

```
Segment2:  .byte 1      ; Ausgabemuster für Segment 2  
Segment3:  .byte 1      ; Ausgabemuster für Segment 3
```

21 AVR-Artikel

21.1 AVR Fuses

Regelmäßig wiederkehrende Beiträge im Forum zeigen, dass die Fuses der [AVR](#) doch einige Tücken in sich bergen. Dieser Artikel kann die **Recherche im Datenblatt** nicht ersetzen, sondern soll lediglich helfen, auf die Problemstellen aufmerksam zu werden.

21.1.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Bei einem neuen μC ist es grundsätzlich notwendig im Datenblatt genau dieses μCs den Auslieferungszustand der Fuses zu ermitteln. So werden beispielsweise die ATmega mit aktiviertem internen Oszillator ausgeliefert und man darf sich dementsprechend nicht wundern, wenn der μC einfach nicht mit dem angeschlossenen Quarz (XTAL) oszillieren will.

Neueinsteigern wird das Programmieren mit einem "nutzerfreundlichen" Programmer mit GUI empfohlen: z.B. [AVR-Studio](#) STK500/AVRISP-Plugin, [AVR-Studio](#) AVRProg (für AVR910 Programmer) oder [PonyProg](#). Hier sollten die Fuses erst einmal vom μC ausgelesen werden. Im Vergleich mit dem Datenblatt kann man dann feststellen, ob nun die dargestellten Häkchen invertiert sind oder nicht. Dann ändert man nur die relevanten Bits und schreibt diese in den Controller.

Bei Atmel AVR μCs heisst eine Fuse setzen (programmieren) übrigens, dieses Bit auf Null zu setzen, das wird manchmal gerne falsch verstanden (siehe auch Erklärung in den Forumbeiträgen [hier](#) und [hier](#)).

Empfehlenswert ist es auch, den [AVR Fuse Calculator](#) zu Rate ziehen, um die richtigen Fuse Einstellungen zu finden.

21.1.2 Kompatibilitätsfuses und manchmal lästige Defaults

Einige Prozessoren haben eine Werkseinstellung, die zu Problemen führen kann. Wenn der Prozessor JTAG unterstützt (ab Mega16 aufwärts), so ist ab Werk die JTAG Schnittstelle eingeschaltet, was dazu führt, daß einige Portpins nicht wie gewohnt funktionieren (nämlich die an denen das JTAG Interface herausgeführt wird). In so einem Fall ist es das Beste, die entsprechende Fuse **JTAGEN** umzusetzen, um so das JTAG Interface abzuschalten, wenn es nicht gebraucht wird.

Auf einem Mega128 ist ab Werk immer die sog. M103 Kompatibilitätsfuse gesetzt. Diese Fuse muß unbedingt abgeschaltet werden, ansonsten verhält sich der Prozessor wie ein Mega103 mit völlig anderer Speicherbelegung. Wird in so einen Prozessortyp ein für den Mega128 programmiertes Programm geladen, so stürzt das Programm beim ersten Unterprogrammaufruf ab, weil der Stack an einer völlig falschen Stelle sitzt.

21.1.3 SPIEN, DWEN und RSTDISBL

Für Anfänger gilt der gut gemeinte Ratschlag: Finger weg von SPIEN, RSTDISBL und DWEN!

Besonders "heimtückisch" ist die auf einigen AVR (Tiny12,13 Tiny26, Mega8 .?) vorhandene Möglichkeit, den Resetpin zum I/O-Pin zu machen. Wird **RSTDISBL** programmiert, hat man mit seriellen [ISP-Programmieradaptern](#) keinen Zugriff mehr. Man sollte diese Option daher nur nutzen, wenn der zusätzliche I/O-Pin wirklich benötigt wird und der Zugriff auf den µC durch einen funktionierenden [Bootloader](#) gesichert ist oder man einen [HV-Programmer](#) zur Hand hat. Rücksetzen kann man diese Fuse allerdings nur mehr mit einem [HV-Programmer](#), ein [Bootloader](#) kann prinzipiell keine Fuses ändern.

Die Fuse **SPIEN** fuer serielles "low voltage" ISP kann per ISP nicht verändert werden. Hat man SPIEN per JTAG oder high-Voltage programming deaktiviert, sollte man wieder den Ursprungszustand herstellen, falls der Controller danach wieder per ISP programmiert werden soll.

Auch **DWEN** bietet bei modernen AVR-Controllern (z.B. ATmega48, 88, 168, einigen ATtiny) die Möglichkeit sich "auszusperren". Wenn die [debugWIRE](#)-Schnittstelle aktiviert ist, ist keine "low voltage" ISP-Programmierung mehr möglich. [debugWIRE](#) kann nur über die [debugWIRE](#)-Schnittstelle (JTAGICE MKII oder AVR Dragon) oder [High-Voltage-Programming](#) deaktiviert werden.

Siehe auch:

- [Fusebits Tutorial auf elektronik-projekt.de](#)

21.1.4 Taktquellen Fuse Einstellung

Neben dem Abschalten des Resetpins kann man sich allerdings noch durch ungeschicktes Setzen der Taktquelle aus dem Controller aussperren. Dies ist die häufigste Variante, mit der sich Neulinge aus einem AVR aussperren. Dabei wird irrtümlich anstelle eines *externen Quarzes* ein *externer Quarzoszillator* (Taktquelle, external Clock) mithilfe der Fusebits eingestellt. Beide Varianten benötigen aber eine unterschiedliche Anpassungsschaltung innerhalb des Mikrocontrollers. Mit der Folge, dass ein externer Quarz bei Aktivierung Anpassungsschaltung für einen Quarzoszillator (oder generell für einen externen Takt) einfach nicht mehr anschwingt. Der Mikrocontroller hat somit keine Taktquelle und arbeitet nicht mehr.

Bei vielen AVR Mikrocontrollern findet sich im Datenblatt folgende Tabelle:

Device Clocking Options Select	CKSEL3..0
External Crystal/Ceramic Resonator	1111 - 1010
External Low-frequency Crystal	1001
External RC Oscillator	1000 - 0101
Calibrated Internal RC Oscillator	0100 - 0001
External Clock	0000

Für einen externen Quarz ist die Einstellung *External Crystal/Ceramic Resonator* notwendig, also eine Einstellung von *1111*. Unglücklicherweise ist bei den vielen Fusebit Einstellprogrammen nicht auf den ersten Blick offensichtlich, ob ein gesetztes Häkchen nun eine 1 oder eine 0 bedeutet. Anstatt auf *1111* werden die Fusebits auf *0000* gesetzt und damit ein *External Clock* eingestellt. Ein *External Clock* ist aber ein Quarzoszillator. Ein Quarz wird an so einer Einstellung nicht ins Schwingen kommen.

21.1.4.1 Reaktivieren bei fehlerhaften Taktquellen-Fuse-Einstellungen

Retten kann man einen AVR bei jeder falschen Taktquellen-Fuseeinstellung (Clock statt Quarz etc.), indem man an XTAL1 einen Takt anlegt. Falls ein weiterer AVR zur Verfügung steht, einfach einen Pin als Ausgang und in Endlosschleife auf high/low/high etc. Jede andere Art Frequenzgenerator funktioniert auch (simpelst ein Quarzoszillator - die Teile mit 4 "Beinchen"). Die Frequenz ist dabei eher unkritisch (<16 bzw. 20 MHz), evtl. ISP-Frequenz anpassen auf $\leq 1/4$ XTAL1-Frequenz. Ausgang des "Generators" an XTAL1 des "verfusten" AVR. Eventuell im Aufbau noch vorhandene Taktquelle (z.B. Quarz) sicherheitshalber abklemmen. Dann per ISP auf richtige Taktquelle einstellen. GND bei allen genutzten Teilen verbinden, VCC fuer die gesamte Schaltung am Besten aus einer Quelle. Alle SEL und SUT auf "1" dürfte bei Verwendung eines Quarzes erstmal weiterhelfen. (Die Reset-Disable-Fuse und Debugwire-Enable-Fuse kann mit dieser Methode nicht zurückgesetzt werden.)

Die CKDIV8-Fuse ist im Auslieferungszustand "programmed"=0, hat also ein Häkchen in PonyProg. Das bedeutet, dass die Quarzfrequenz intern durch 8 vorgeteilt wird.

Siehe auch:

- [AVR-Preserver](#) von Klaus Leidinger (4 MHz mit Quarzoszillator).
- [Evertool von Martin Thomas](#)
- [Reaktivieren mit dem 1 kHz Kalibriersignal eines Oszilloskops](#) (Idee von Jörg im Forum)

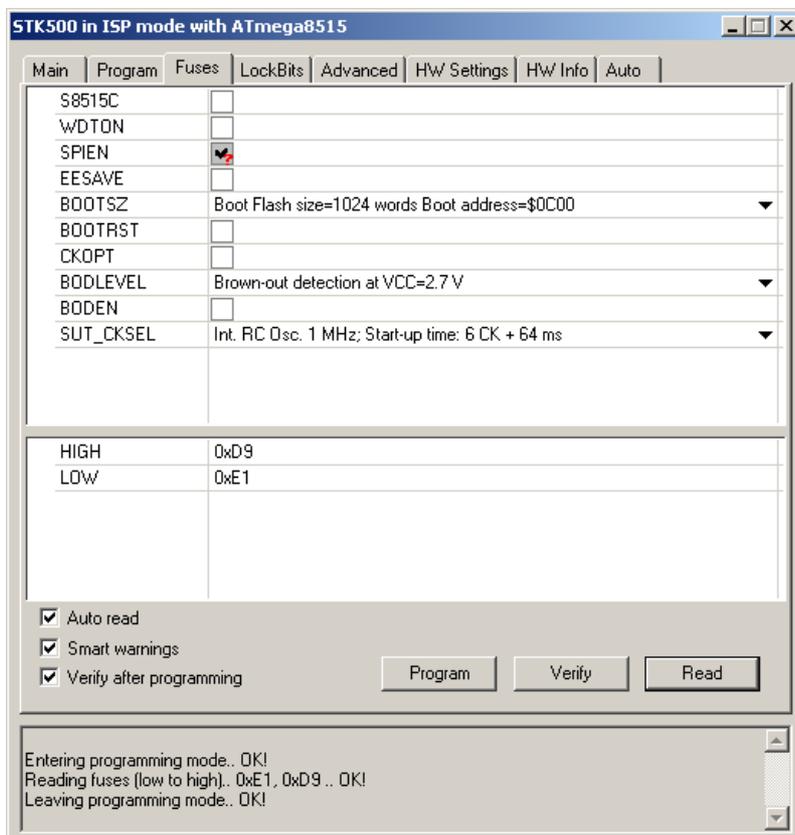
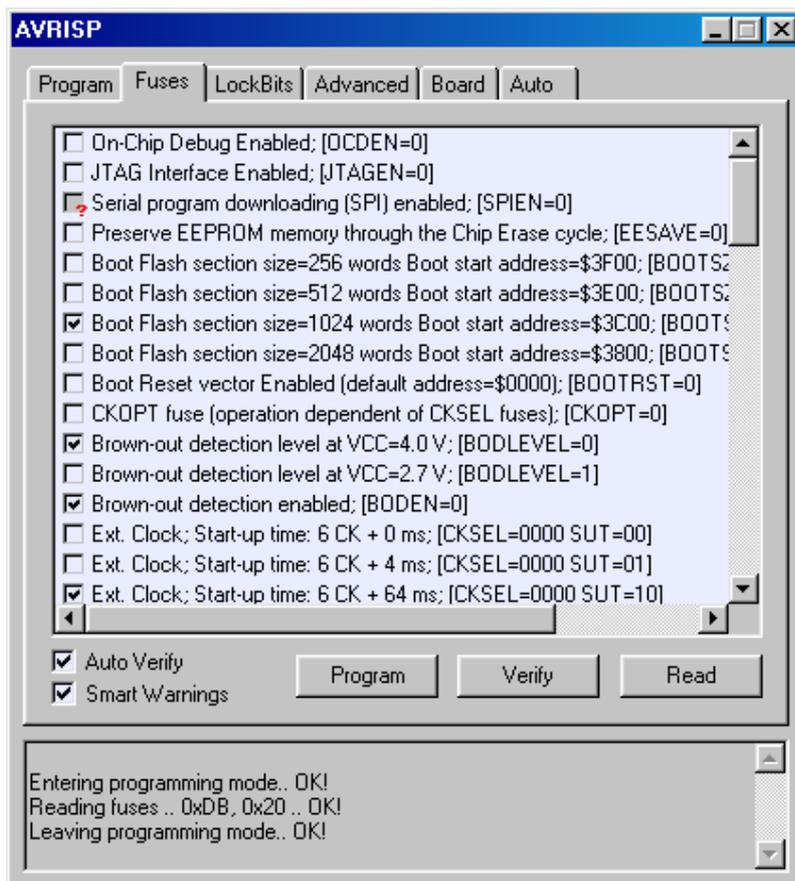
21.2.5 Vergleich der Fuses bei verschiedenen Programmen

Die Darstellung der Fuses in den verschiedenen Bedienprogrammen für ISP Geräte weicht voneinander ab und das kann den Anfänger ganz schön irritieren (mich hat es ;-). Daher hier ein Vergleich ausgelesener Werte bei drei verschiedenen Bedienprogrammen und dem gleichen programmierten AVR (ATmega32 mit externer Clock).

Achtung: Das ist nur ein Beispiel! Schaut euch euer Board an, lest in eurer Dokumentation und übernehmt NICHT einfach die angezeigten Beispielwerte!

Am gelungensten finde ich die Darstellung in AVR Studio - man klickt vorne an, was man will (Häkchen gesetzt oder nicht) und "hinten" kümmert sich AVR Studio um die Fusebits. Ähnlich komfortabel arbeitet der AVR Fuse Calculator von Mark Hämmerling (s.u.), nur dass man die eingestellten Werte noch von Hand-zu-Fuss in seinen ISP Programmer übertragen muss.

21.2.5.1 AVR Studio



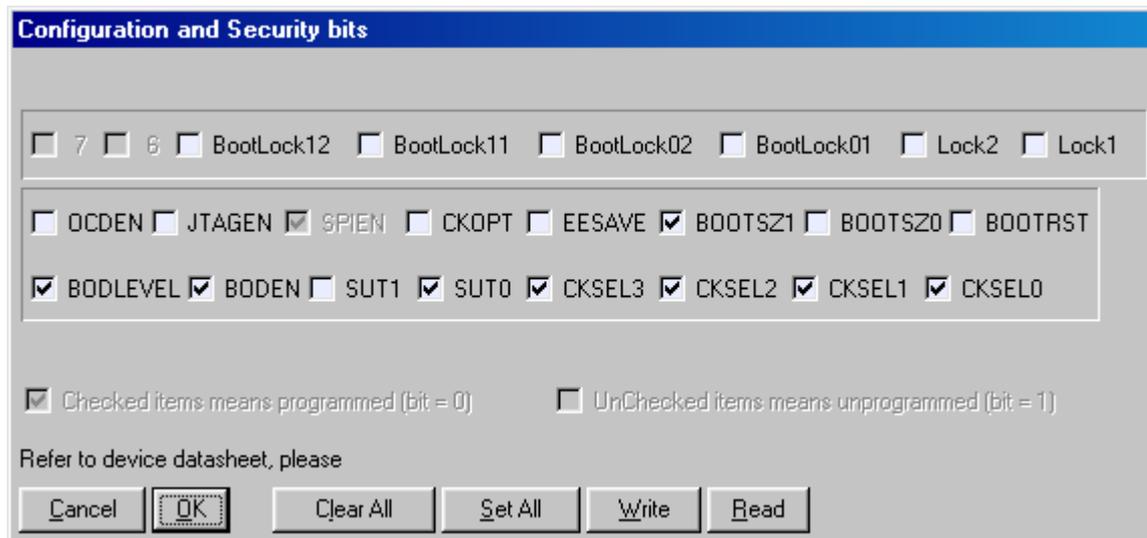
links AVR Studio 4.12, rechts AVR Studio 4.13 (mit direkter Eingabemöglichkeit der Fuses in Hexadezimalwerten)

21.2.5.2 Ponyprog2000

Achtung: Die Abbildung soll nur das grundsätzliche Aussehen der Einstelldialogs zeigen. Es ist **keine** Empfehlung für irgendeine bestimmte Einstellung. Die gewünschte Einstellung **muss** aus dem Datenblatt ermittelt werden!

Vor dem Einstellen der Wunschkonfiguration muss die vorhandene Einstellung per READ aus dem AVR ausgelesen werden (die neuste Version macht das jetzt automatisch). Macht man das nicht, kann (und wird ([1])) es zur Blockade des AVR kommen.

Weiter ist zu beachten, dass bei PonyProg ein gesetztes Häkchen einer 0 im Datenblatt entspricht!



CKSEL0 - CKSEL3: Sind diese, wie in der Abbildung gezeigt, gesetzt, dann wird bei einem ATmega8/ATmega16 ein externer Takt (Oszillator, sonstiger Taktgeber) benutzt. Für einen Quarz sind im PonyProg die Häkchen bei CKSEL0 - CKSEL3 **nicht** gesetzt. Für andere Prozessoren **im Datenblatt** die korrekte Einstellung ermitteln. Im Zweifel gilt **immer** das Datenblatt.

An dieser Stelle noch mal die **Warnung**: Die Beschaltung der CKSEL Fuses ist kritisch! Lieber mit dem Datenblatt 3 mal abklären ob die Einstellung stimmt. Dabei aber beachten:

- Ein Quarz ist **kein** "external clock". Für einen Quarz wird im Datenblatt die Bezeichnung "crystal oszillator" benutzt.
- Bei PonyProg wird eine 1 aus dem Datenblatt durch ein **nicht** gesetztes Häkchen symbolisiert.
- Vor dem Neusetzen der Fuse-Bits **unbedingt** vorher die momentane Einstellung vom Chip auslesen lassen! Bei einem nagelneuen Prozessor sind die Fuse Bits so gesetzt, dass er mit dem internen Taktgenerator auf 1Mhz arbeitet. Das Muster der Häkchen mit dem vorgegebenen Muster für diese Einstellung im Datenblatt vergleichen (diese Einstellung ist im Datenblatt als *Default* markiert) um sicher verstanden zu haben, wie das mit den Häkchen funktioniert. Erst dann die Änderung vornehmen und neu schreiben.
- Fuse Bits werden immer alle gleichzeitig gelesen und geschrieben! Daher **immer** vor dem Verändern von Fusebits die momentan im Mikrokontroller gespeicherten Fusebits auslesen - die gewünschten Änderungen durchführen - und erst dann die veränderten Werte zurückschreiben!

Falls man sich doch vertut und dem Prozessor eine falsche Einstellung gegeben hat, dann wird er vom Brennprogramm nicht mehr erkannt, egal welches Programm dies ist. Widerstehen sie aber der Versuchung, dieselbe Einstellung mit einem anderen Prozessor noch einmal zu versuchen. Der ver-fuste Prozessor ist nicht defekt und die falsche Fuse Stellung wird auch mit einem anderen Prozessor nicht funktionieren. Der ver-fuste Prozessor kann [wiederbelebt](#) werden!

21.2.5.3 AVRDUDE

AVRDUDE ist ein Konsolenprogramm und liefert den Zustand der Fuses als HEX-Wert:

avrdude.exe: Version 5.1

Copyright (c) 2000-2005 Brian Dean, <http://www.bdmicro.com/>

System wide configuration file is "D:\WINAVR\BIN\avrdude.conf"

```
Using Port           : com1
Using Programmer     : stk500v2
AVR Part            : ATMEGA32
Chip Erase delay    : 9000 us
PAGEL              : PD7
BS2                : PA0
RESET disposition   : dedicated
RETRY pulse        : SCK
serial program mode : yes
parallel program mode : yes
Timeout            : 200
StabDelay          : 100
CmdexeDelay        : 25
SyncLoops          : 32
ByteDelay          : 0
PollIndex          : 3
PollValue          : 0x53
Memory Detail      :
```

Memory Type	Block Mode	Poll Delay	Size	Indx	Page Paged	Size	Size	#Pages	MinW	Polled MaxW	
ReadBack											
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
EEPROM	4	10	64	0	no	1024	4	0	9000	9000	0xff
Flash	33	6	64	0	yes	32768	128	256	4500	4500	0xff
LFUSE	0	0	0	0	no	1	0	0	2000	2000	0x00
HFUSE	0	0	0	0	no	1	0	0	2000	2000	0x00
LOCK	0	0	0	0	no	1	0	0	2000	2000	0x00
SIGNATURE	0	0	0	0	no	3	0	0	0	0	0x00
CALIBRATION	0	0	0	0	no	1	0	0	0	0	0x00

```
Programmer Type : STK500V2
Description      : Atmel STK500 V2
Hardware Version: 15
Firmware Version: 2.10
Topcard         : Unknown
Vtarget         : 0.0 V
Varef           : 5.0 V
Oscillator      : 3.686 MHz
SCK period      : 0.1 us
```

avrdude.exe: AVR device initialized and ready to accept instructions

Reading | ##### | 100% 0.00s

```
avrdude.exe: Device signature = 0x1e9502
avrdude.exe: safemode: lfuse reads as 20
```

```
avrdude.exe: safemode: hfuse reads as DB
avrdude.exe: safemode: lfuse reads as 20
avrdude.exe: safemode: hfuse reads as DB
avrdude.exe: safemode: Fuses OK
```

avrdude.exe done. Thank you.

Der Zustand der Fuses steht in diesen Zeilen:

```
Reading | #####
avrdude.exe: Device signature = 0x1e9502
avrdude.exe: safemode: lfuse reads as 20
avrdude.exe: safemode: hfuse reads as DB

avrdude.exe: safemode: lfuse reads as 20
avrdude.exe: safemode: hfuse reads as DB
avrdude.exe: safemode: Fuses OK

avrdude.exe done. Thank you.

stef@wendy ~
$ avrdude -p m32 -c stk500v2 -n -v_
```

Zur Entschlüsselung kann man prima den Online-Rechner [AVR Fuse Calculator](http://palmavr.sourceforge.net/cgi-bin/fc.cgi) von Mark Hämmerling nehmen.

AVR Fuse Calculator - SeaMonkey

Part name: **ATmega32**

	Low	High	
Default:	0xF1	0x99	Apply default values
Current:	0x20	0xDB	Apply hex. values

Quick Configuration

- Ext. Clock: Start-up time: 6 CK + 64 ms; [CKSEL=0000 SUT=10]
- Brown-out detection enabled: [BODEN=0]
- Brown-out detection level at VCC=4.0 V; [BODLEVEL=0]
- none or unprogrammed ---
- Boot Flash section size=1024 words Boot start address=\$3C00; [BOOTSZ=01]
- none or unprogrammed ---
- none or unprogrammed ---
- Serial program downloading (SPI) enabled; [SPIEN=0]
- none or unprogrammed ---
- none or unprogrammed ---

Low	High
<input checked="" type="checkbox"/> BODLEVEL	<input type="checkbox"/> OCDEN
<input checked="" type="checkbox"/> BODEN	<input type="checkbox"/> JTAGEN
	<input checked="" type="checkbox"/> SPIEN
<input checked="" type="checkbox"/> CKSEL3	<input type="checkbox"/> EESAVE
<input checked="" type="checkbox"/> CKSEL2	<input checked="" type="checkbox"/> BOOTSZ1
<input checked="" type="checkbox"/> CKSEL1	<input type="checkbox"/> BOOTSZ0
<input checked="" type="checkbox"/> CKSEL0	<input type="checkbox"/> BOOTRST

Apply fuse bits

- = Unprogrammed (1)
- = Programmed (0)

No responsibility is taken for the correctness of the presented information!
For help, just hover the pointer over the corresponding element.
Copyright © 2006 Mark Hämmerling.

Oder man steuert AVRDUDE über eine grafisches User Interface (GUI) z.B. mit dem von Torsten Brischalle in JAVA geschriebenen [AVR8 Burn-O-Mat](#) (Windows, Linux, Mac OS X und andere OS mit JAVA Runtime Umgebung).

Mittels der Kommandozeile kann man avrdude wie folgt verwenden um die Fuses zu schreiben:

```
avrdude -c PROGRAMMER -P PORT -p PART -U lfuse:w:0xFF:m -U hfuse:w:0xD9:m
```

21.2.6 Tipps + Tricks

- [Fuses im Programm auslesen](#) von Andreas Kaiser

21.2 Relais mit Logik ansteuern

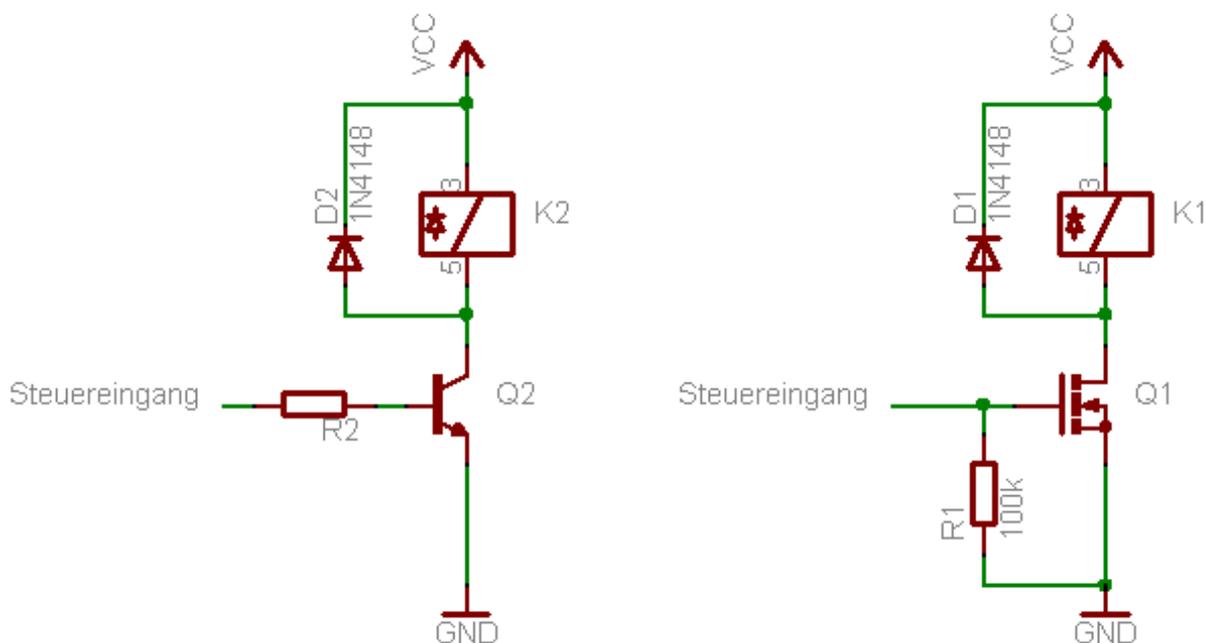
21.2.1 Einleitung

Häufig sollen mit μ C-Schaltungen "größere Dinge bewegt werden", das heißt ein höherer Laststrom oder Netzspannung geschaltet werden. Dieser Artikel soll dem Anfänger dabei helfen, beliebige Probleme zu umgehen. Die hier für Relais aufgeführten Maßnahmen sollen natürlich sinngemäß auch bei anderen induktiven Lasten in Betracht gezogen werden.

21.2.2 Schaltstufen

Wenn normale Bauelemente zum Einsatz kommen sollen, endet man erfahrungsgemäß bei Schaltungen, bei denen mit der Logikspannung ein [Bipolartransistor](#) oder [MOSFET](#) im Schaltbetrieb angesteuert wird und die in der Regel höhere Betriebsspannung der Relaisspule geschaltet wird.

Dies sieht dann bei kleinen Lasten beispielsweise so aus:



Links im Bild ist die Ansteuerung mit einem NPN-Bipolartransistor gezeigt. Hier wird mit einem Steuersignal durch den Vorwiderstand der Steuerstrom erzeugt, der den Transistor Q2 durchgeschaltet. Die maximal schaltbare Spannung hängt von dem Transistor ab, bei höheren Lastströmen ist darauf zu achten daß möglicherweise der Steuerstrom nicht mehr hoch genug ist um den Laststrom sicher zu schalten. Deshalb ist die Stromverstärkung des Transistor beachten. Voll durchgesteuert oder voll gesperrt sind die Lieblingszustände des Schalttransistors, bei unvollständiger Ansteuerung (Linearbetrieb) fällt am Transistor eine erhöhte Verlustleistung ab und die erzeugt bisweilen viel Wärme.

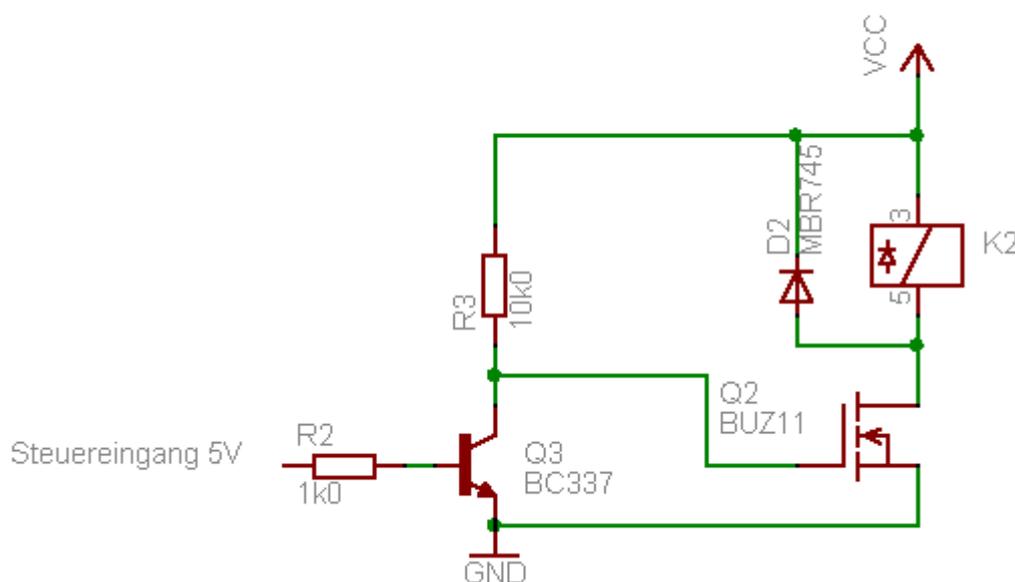
Schaltstrom [mA] Transistortyp	Steuerspannung [V]	Bauteilwert
500 Q2=BC337	5	R2=470Ω
	3,3	R2=270Ω
100 Q2=BC846(SMD)	5	R2=2,2kΩ
	3,3	R2=1,3kΩ

Werden andere Transistoren eingesetzt oder muss für das Relais mehr Strom zur Verfügung gestellt werden, dann findet sich hier die Berechnung des [Basiswiderstands](#).

Rechts im Bild wird das Relais mit einem MOSFET gesteuert. Der Vorteil ist hier der wesentlich geringere Steuerstrom im statischen HIGH Zustand (praktisch Null). Wichtig ist hier R1. Dieser Pull-Down-Widerstand sorgt dafür, dass der MOSFET sicher sperrt wenn der steuernde [Mikrocontroller](#) sich im Reset befindet oder gerade programmiert wird. Dann sind nämlich die IO-Pins als Eingänge geschaltet und das Gate des MOSFET würde "in der Luft hängen" (engl. float). R1 verhindert das.

Schaltstrom [mA] Transistortyp	Steuerspannung [V]
500 Q1=BS170	5-10
200 Q1=BSS138(SMD)	3,3-10

Bei großen zu schaltenden Leistungen kommt daher oft vor dem Schalttransistor/FET ein Treiber zum Einsatz. Grosse MOSFETs brauchen meist 10-15V Gatespannung um voll durchzusteuern, deshalb wird ein [Pegelwandler](#) benötigt und wir haben etwas mehrstufiges. Ausnahmen sind sogenannte *Logic Level MOSFETs*, welche schon mit 4,5V praktisch voll durchgesteuert sind.



Zu beachten ist hier, daß durch den Treiber eine Invertierung stattfindet, d.h. ist der Steuereingang HIGH ist der MOSFET gesperrt und die Last wird nicht von Strom durchflossen. R2 ist die Basisstrombegrenzung, er wird so gewählt daß der Transistor gerade so übersteuert wird um sicherzugehen daß er komplett und schnell durchgesteuert wird. R3 begrenzt den Kollektorstrom des Treibertransistors, wenn dieser leitet, das Gate des MOSFET Q2 liegt dann auf 0V. Wenn er nicht leitet wird über R3 das Gate des MOSFET geladen und dieser ist dann leitend. Die hier gezeigte Schaltung kann bis zu 30A schalten, allerdings braucht der MOSFET Q2 ab ca. 5A einen Kühlkörper. Die Versorgungsspannung VCC kann 10V bis 20V betragen.

Achtung! Diese Schaltung ist nur für langsame Ansteuerung mit ein paar Dutzend Hertz geeignet. PWM mit Frequenzen von 50 Hz und höher ist damit nicht möglich, da die erste Schaltstufe dafür viel zu langsam ist. Der Leistungstransistor kann nicht schnell ein und aus geschaltet werden, dadurch befindet er sich während der Umschaltung im Linearbetrieb und erzeugt viel Verlustleistung (=Wärme). Für PWM muss ein schneller MOSFET-Treiber eingesetzt werden.

Gemeinsam ist diesen Schaltungen allerdings, daß sie sich prima für ohmsche Lasten eignen, aber bei induktiven Lasten gerne Probleme bereiten:

- Die Logikschaltung stürzt beim Schalten gelegentlich oder immer ab, insbesondere beim Abschalten
- Bauteile verabschieden sich beim ersten Schalten oder nach einigen problemlosen Schaltvorgängen
- sonstiges unreproduzierbares Verhalten.

21.2.3 Entstörung

Das Hauptproblem ist die Gegeninduktionsspannung der Spule, eine Eigenschaft die in Schaltnetzteilen erwünscht sein mag, mit ihren u.U. mehreren hundert Volt im Logiksystem sich aber eher schädlich auswirkt. Beim Abschalten von Induktivitäten bricht deren Magnetfeld zusammen. Die im Magnetfeld gespeicherte Energie kann nicht einfach verschwinden. Damit wird die Induktivität zur Energiequelle, welche sehr hohe Spannungen erzeugen kann (Prinzip der Zündspule).

Diese Störungen können durch Schaltungsergänzungen gemildert oder beseitigt werden.

21.2.3.1 Freilaufdiode

In den obigen Bildern ist die Freilaufdiode als D1 und D2 sichtbar. Dieses Bauteil ist ein absolutes **Muß** bei induktiven Lasten. Teilweise in Relais schon eingebaut, handelt es sich um eine [Diode](#), die für die Betriebsspannung in Sperrrichtung eingebaut ist. Mit ihr wird die Selbstinduktionsspannung der induktiven Last im Abschaltmoment kurzgeschlossen. Die verwendete Diode sollte als Fast Recovery Diode spezifiziert sein und mindestens die Versorgungsspannung als Sperrspannung verkraften (plus Reserve von 20% und mehr). Der zulässige Durchlassstrom muss nicht so hoch ausfallen, da die meisten Relais nur mit geringen Frequenzen schalten (einige Hertz). Hier reicht es, wenn der zulässige Pulsstrom der Diode dem Nennstrom des Relais entspricht. Eine kleine 1N4148 kann somit bis zu 1A schalten. Einfache Gleichrichterioden (z.B. 1N400x) sind hier im Nachteil und sollten nicht verwendet werden, da sie zu lange für die "Entsperrung" brauchen. Schnelle Schaltdioden (1N4148) oder Schottkydioden sind das Mittel der Wahl.

Gelegentlich sieht man auch Dioden in Sperrrichtung über die Schaltstrecke (Kollektor-Emitter, Source-Drain), die machen sowas ähnliches. Das klappt aber nur bei Halb- und Vollbrücken! Einfache Emitterschaltungen wie sie hier gezeigt sind brauchen eine Diode antiparallel zum Relais!

Wenn ein schnelles Abschalten des Relais gewünscht ist, wie zum Beispiel beim Schalten hoher Ströme, sind andere Maßnahmen besser geeignet, um die Selbstinduktionsspannung sicher zu begrenzen. Siehe dazu [weiter unten](#).

21.2.3.2 Entkopplung der Versorgungsspannungen

Es schadet in der Regel nicht die Spannungsversorgung für die Logikschaltung gut zu stabilisieren und zu filtern. Die Schaltstufe kann oft mit eher "rohen" Spannungen betrieben werden, also direkt vom Kondensator der die gleichgerichtete Trafospannung glättet. (Allerdings kann auch bisschen Filterung da nicht schaden, um Störspannungen durch die Schaltstufe nicht ungedämpft weiterzugeben.)

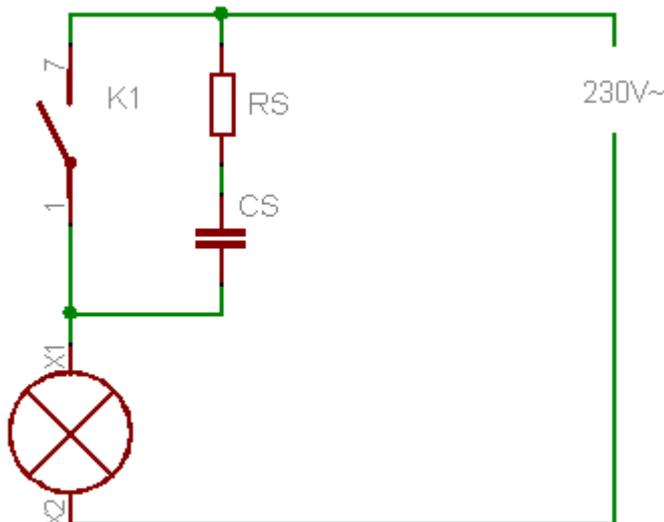
21.2.3.3 Spannungsbegrenzung

Parallel zur Schaltstrecke und/oder parallel zur Last können Varistoren angeschlossen werden (anstelle der Diode), welche die Spannung am Bauteil begrenzen. Dabei muss beachtet werden, dass die maximal zulässige Kollektor- bzw. Drainspannung nicht überschritten wird. Betriebsspannung und Induktionsspannung der Relaispule liegen in Reihe, sodass gilt

$$UCE_{max} \geq VCC + V_{Varistor}$$

Suppressordioden eignen sich auch, sie schalten etwas schneller können aber AFAIK nicht soviel Pulsleistung aufnehmen.

21.3.2.4 Löschglieder



Im Englischen heisst das [Snubber](#) Network. Durch eine Beschaltung der Schaltkontakte des Relais mit einem RC-Serienglied werden hochfrequente Überschwingeffekte beim Schalten gedämpft. Snubberglieder sind fast immer sinnvoll. Prinzipiell kann man sagen, daß der Widerstand R_s hochfrequente Anteile verbraucht und der Kondensator dafür sorgt, daß dieser Vorgang nur kurz beim Umschalten erfolgt, aber kein kontinuierlicher Stromfluss erfolgt. Wichtig ist dabei, dass der Widerstand ausreichend dimensioniert ist um die auftretende Verlustleistung auszuhalten. Ebenso muss der Kondensator eine ausreichende Spannungsfestigkeit aufweisen, bei Netzspannung sollten es mindestens 400V sein.

21.2.4 Links

- [Entwicklungshilfe für Snubber, englisch](#)

21.2.4.1 Zur Freilaufdiode

- [Coil Suppression Can Reduce Relay Life \(pdf\)](#)
- [The application of relay coil suppression with DC relays \(pdf\)](#)

22 Anhang

22.1 Screenshots

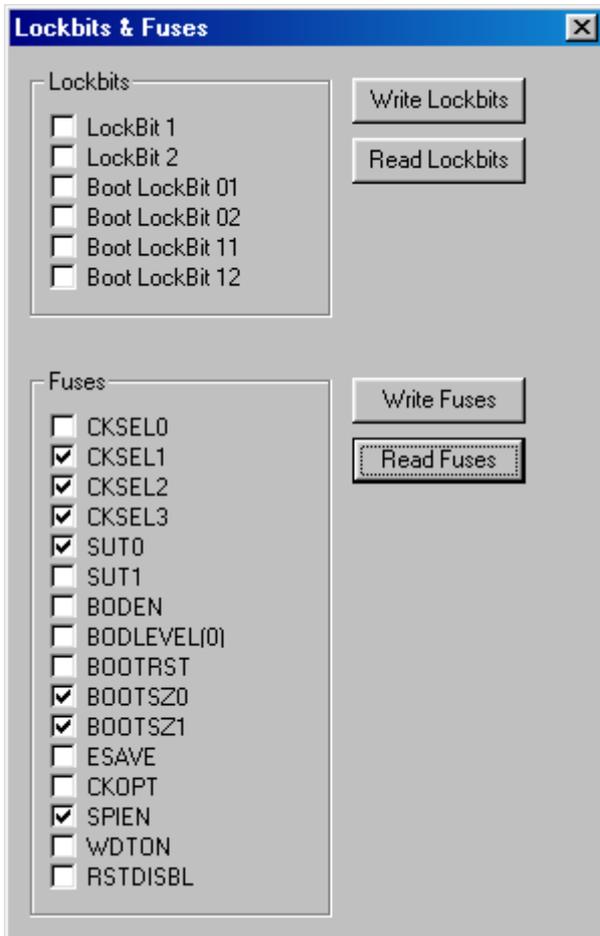


Abbildung 1: Kap. 3.3.3 - Screenshot: Vorher

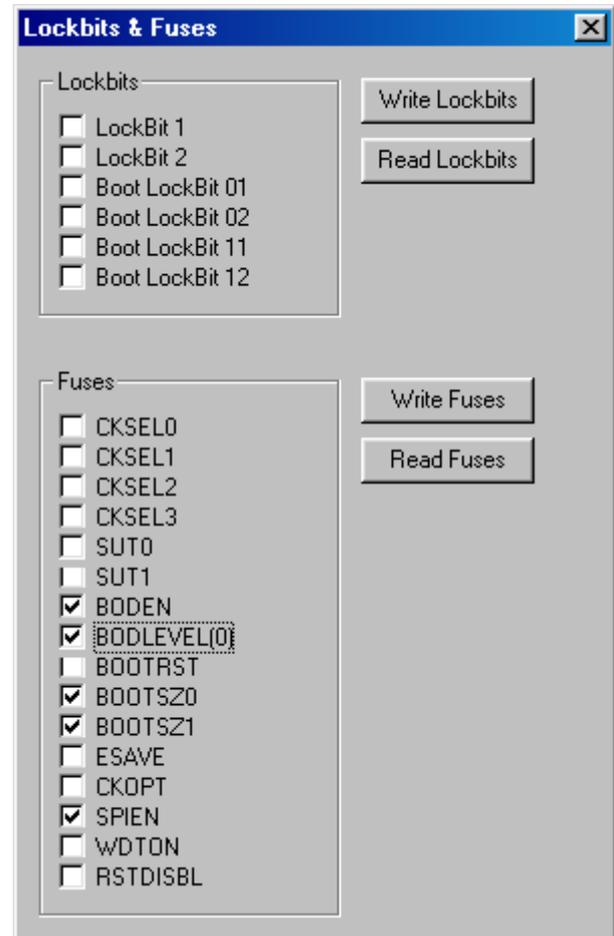


Abbildung 2: Kap. 3.3.3 - Screenshot: Nachher