Anfängerkurs zum Erlernen der Assemblersprache von ATMEL-AVR-Mikroprozessoren

Gerhard Schmidt
http://www.avr-asm-tutorial.net
Januar 2008

Historie:
Vollständig überarbeitete Neufassung Dezember 2008 / Januar 2009
Originalversion vom September 2003

Inhaltsverzeichnis

1 Warum Assembler lernen?....1
2 Hardware für die AVR-Assembler-Programmierung....2
2.1 Das ISP-Interface der AVR-Prozessoren....2
2.2 Programmierer für den PC-Parallel-Port....3
2.3 Experimentierschaltung mit ATtiny13....4
2.4 Experimentalschaltung mit AT90S2313/ATtiny2313....5
2.5 Fertige Programmierboards für die AVR-Familie....6
3 Werkzeuge für die AVR-Assembler-Programmierung....8
3.1 Der Editor....8
3.2 Der Assembler....9
3.3 Das Programmieren des Chips....11
3.4 Das Simulieren im Studio....12
4 Register....17
4.1 Was ist ein Register?....17
4.2 Unterschiede der Register....18
4.3 Pointer-Register....19
4.4 Empfehlungen zur Registerwahl....20
5 Ports....21
5.1 Was ist ein Port?....21
5.2 Details wichtiger Ports in den AVR....24
5.3 Das Statusregister als wichtigster Port....25
6 SRAM....27
6.1 Verwendung von SRAM in AVR Assembler....27
6.2 Was ist SRAM?....27
6.3 Wozu kann man SRAM verwenden?....27
6.4 Wie verwendet man SRAM?....28
6.5 Verwendung von SRAM als Stack....30
7 Steuerung des Programmablaufes in AVR Assembler....33
7.1 Was passiert beim Reset?....33
7.2 Linearer Programmablauf und Verzweigungen....34
7.3 Zeitzusammenhänge beim Programmablauf....35
7.4 Makros im Programmablauf....36
7.5 Unterprogramme....36
7.6 Interrupts im Programmablauf....38
8 Rechnen in Assemblersprache....42
8.1 Zahlenarten in Assembler....42
8.2 Bitmanipulationen....44
8.3 Schieben und Rotieren....45
8.4 Addition, Subtraktion und Vergleich....46
8.5 Umwandlung von Zahlen - generell....49
8.6 Multiplikation....50
8.7 Division....54
8.8 Binäre Hardware-Multiplikation....58
8.9 Zahlenumwandlung in AVR-Assembler....66
8.10 Umgang mit Festkommazahlen in AVR Assembler....76
9 Tabellenanhang....81

1 Warum Assembler lernen?

Assembler oder Hochsprache, das ist hier die Frage. Warum soll man noch eine neue Sprache lernen, wenn man schon welche kann? Das beste Argument: Wer in Frankreich lebt und nur Englisch kann, kann sich zwar durchschlagen, aber so richtig heimisch und unkompliziert ist das Leben dann nicht. Mit verquasten Sprachkonstruktionen kann man sich zwar durchschlagen, aber elegant hört sich das meistens nicht an. Und wenn es schnell gehen muss, geht es eben öfter schief.

In der Kürze liegt die Würze

Assemblerbeinstruktionen übersetzen sich 1 zu 1 in Maschinenbefehle. Auf diese Weise macht der Prozessor wirklich nur das, was für den angepeilten Zweck tatsächlich erforderlich ist und was der Programmierer auch gerade will. Keine extra Schleifen und nicht benötigten Features stören und blasen den ausgeführten Code auf. Wenn es bei begrenztem Programmspeicher und komplexerem Programm auf jedes Byte ankommt, dann ist Assembler sowieso Pflicht. Kürzere Programme lassen sich wegen schlankerem Maschinencode leichter entwanzen, weil jeder einzelne Schritt Sinn macht und zu Aufmerksamkeit zwingt.

Schnell wie Hund

Da kein unnötiger Code ausgeführt wird, sind Assembler-Programme maximal schnell. Jeder Schritt ist von voraussehbarer Dauer. Bei zeitkritischen Anwendungen, wie z.B. bei Zeitmessungen ohne Hardware-Timer, die bis an die Grenzen der Leistungsfähigkeit des Prozessors gehen sollen, ist Assembler ebenfalls zwingend. Soll es gemütlich zugehen, können Sie programmieren wie Sie wollen.

Assembler ist leicht erlernbar

Es stimmt nicht, dass Assembler komplizierter und schwerer erlernbar ist als Hochsprachen. Das Erlernen einer einzigen Assemblersprache macht Sie mit den wichtigsten Grundkonzepten vertraut, das Erlernen von anderen Assembler-Dialekten ist dann ein Leichtes. Der erste Code sieht nicht sehr elegant aus, mit jedem Hunderter an Quellcode sieht das schon schöner aus. Schönheitspreise kriegt man erst ab einigen Tausend Zeilen Quellcode. Da viele Features prozessorabhängig sind, ist Optimierung eine reine Übungsangelegenheit und nur von der Vertrautheit mit der Hardware und dem Dialekt abhängig. Die ersten Schritte fallen in jeder neu erlernten Sprache nicht leicht und nach wenigen Wochen lächelt man über die Holprigkeit und Umständlichkeit seiner ersten Gehversuche. Manche Assembler-Instruktionen lernt man eben erst nach Monaten richtig nutzen.

AVR sind ideal zum Lernen

Assemblerprogramme sind gnadenlos, weil sie davon ausgehen, dass der Programmierer jeden Schritt mit Absicht so und nicht anders macht. Alle Schutzmechanismen muss man sich selber ausdenken und auch programmieren, die Maschine macht bedenkenlos jeden Unsinn mit. Kein Fensterchen warnt vor ominösen Schutzverletzungen, es sei denn man hat das Fenster selber programmiert. Denkfehler beim Konstruieren sind aber genauso schwer aufzudecken wie bei Hochsprachen. Das Ausprobieren ist bei den ATMEL-AVR aber sehr leicht, da der Code rasch um einige wenige Diagnostikzeilen ergänzt und mal eben in den Chip programmiert werden kann. Vorbei die Zeiten mit EPROM löschen, programmieren, einsetzen, versagen und wieder von vorne nachdenken. Änderungen sind schnell gemacht, kompiliert und entweder im Studio simuliert, auf dem STK-Board ausprobiert oder in der realen Schaltung einprogrammiert, ohne dass sich ein IC-Fuß verbogen oder die UV-Lampe gerade im letzten Moment vor der großen Erleuchtung den Geist aufgegeben hat.

Ausprobieren

Nur Mut bei den ersten Schritten. Wenn Sie schon eine Programmiersprache können, vergessen Sie sie erst mal gründlich, weil sonst die allerersten Schritte schwerfallen. Hinter jeder Assemblersprache steckt auch ein Prozessorkonzept, und große Teile der erlernten Hochsprachenkonzepte machen in Assembler sowieso keinen Sinn. Die ersten fünf Instruktionen gehen schwer, dann geht es exponentiell leichter. Nach den ersten 10 Zeilen nehmen Sie den ausgedruckten Instruction Set Summary mal für eine Stunde mit in die Badewanne und wundern sich ein wenig, was es so alles zu Programmieren und zum Merken gibt. Versuchen Sie zu Anfang keine Mega-Maschine zu programmieren, das geht in jeder Sprache gründlich schief. Heben Sie erfolgreich programmierte Codezeilen gut dokumentiert auf, Sie brauchen sie sowieso bald wieder.

Viel Lernerfolg.

2 Hardware für die AVR-Assembler-Programmierung

Damit es beim Lernen von Assembler nicht zu trocken zugeht, braucht es etwas Hardware zum Ausprobieren. Gerade wenn man die ersten Schritte macht, muss der Lernerfolg schnell sichtbar sein.

Hier werden mit wenigen einfachen Schaltungen im Eigenbau die ersten Hardware-Grundlagen beschrieben. Um es vorweg zu nehmen: es gibt von der Hardware her nichts einfacheres als einen AVR mit den eigenen Ideen zu bestücken. Dafür wird ein Programmiergerät beschrieben, das einfacher und billiger nicht sein kann. Wer dann Größeres vorhat, kann die einfache Schaltung stückweise erweitern.

Wer sich mit Löten nicht herumschlagen will und nicht jeden Euro umdrehen muss, kann ein fertiges Programmier-Board erstehen. Die Eigenschaften solcher Boards werden hier ebenfalls beschrieben.

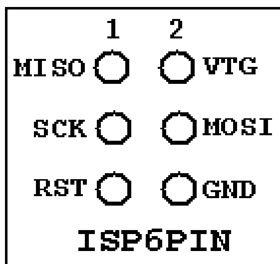
2.1 Das ISP-Interface der AVR-Prozessoren

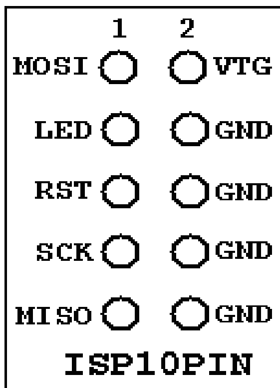
Bevor es ins Praktische geht, zunächst ein paar grundlegende Informationen zum Programmieren der Prozessoren. Nein, man braucht keine drei verschiedenen Spannungen, um das Flash-EEPROM eines AVR zu beschreiben und zu lesen. Nein, man braucht keinen weiteren Mikroprozessor, um ein Programmiergerät für einfache Zwecke zu bauen. Nein, man braucht keine 10 I/O-Ports, um so einem Chip zu sagen, was man von ihm will. Nein, man muss den Chip nicht aus der Schaltung auslöten, in eine andere Fassung stecken, ihn dann dort programmieren und alles wieder rückwärts. Geht alles viel einfacher.

Für all das sorgt ein in allen Chips eingebautes Interface, über das der Inhalt des Flash-Programmspeichers sowie des eingebauten EEPROM's beschrieben und gelesen werden kann. Das Interface arbeitet seriell und braucht genau drei Leitungen:

- SCK: Ein Taktsignal, das die zu schreibenden Bits in ein Schieberegister im AVR eintaktet und zu lesende Bits aus einem weiteren Schieberegister austaktet,
- MOSI: Das Datensignal, das die einzutaktenden Bits vorgibt,
- MISO: Das Datensignal, das die auszutaktenden Bits zum Lesen durch die Programmiersoftware ausgibt.

Damit die drei Pins nicht nur zum Programmieren genutzt werden können, wechseln sie nur dann in den Programmiermodus, wenn das RESET-Signal am AVR (auch: RST oder Restart genannt) auf logisch Null liegt. Ist das nicht der Fall, können die drei Pins als beliebige I/O-Signalleitungen dienen. Wer die drei Pins





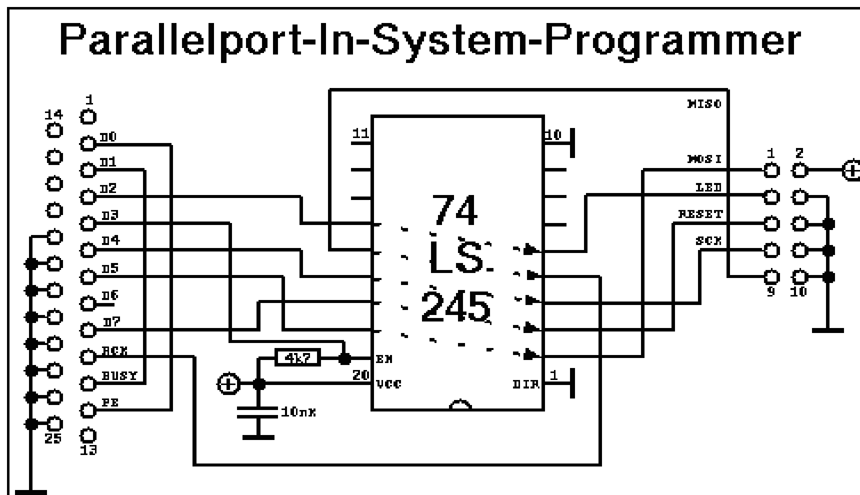
mit dieser Doppelbedeutung benutzen möchte und das Programmieren des AVR in der Schaltung selbst vornehmen möchte, muss z.B. einen Multiplexer verwenden oder Schaltung und Programmieranschluss durch Widerstände voneinander entkoppeln. Was nötig ist, richtet sich nach dem, was die wilden Programmierimpulse mit dem Rest der Schaltung anstellen können.

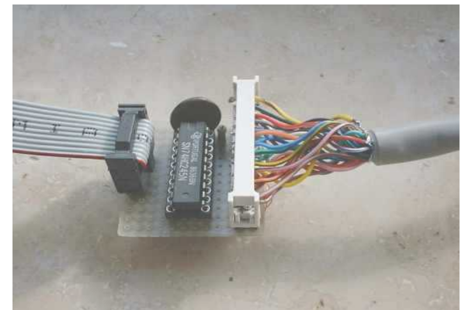
Nicht notwendig, aber bequem ist es, die Versorgungsspannung von Schaltung und Programmier-Interface gemeinsam zu beziehen und dafür zwei weitere Leitungen vorzusehen. GND versteht sich von selbst, VTG bedeutet Voltage Target und ist die Betriebsspannung des Zielsystems. Damit wären wir bei der 6-Draht-ISP-Programmierleitung. Die ISP6-Verbinder haben die nebenstehende, von ATMEL standardisierte Pinbelegung.

Und wie das so ist mit Standards: immer gab es schon welche, die früher da waren, die alle verwenden und an die sich immer noch (fast) alle halten. Hier ist das der 10-polige ISP-Steckverbinder. Er hat noch zusätzlich einen LED-Anschluss, über den die Programmiersoftware mitteilen kann, dass sie fertig mit dem Programmieren ist. Auch nicht schlecht, mit einer roten LED über einen Widerstand gegen die Versorgungsspannung ein deutliches Zeichen dafür zu setzen, dass die Programmiersoftware ihren Dienst versieht.

2.2 Programmierer für den PC-Parallel-Port

So, Lötkolben anwerfen und ein Programmiergerät bauen. Es ist denkbar einfach und dürfte mit Standardteilen aus der gut sortierten Bastelkiste schnell aufgebaut sein.





Ja, das ist alles, was es zum Programmieren braucht. Den 25-poligen Stecker steckt man in den Parallelport des PC's, den 10-poligen ISP-Stecker an die AVR-Experimentierschaltung. Wer gerade keinen 74LS245 zur Hand hat, kann auch einen 74HC245 verwenden. Allerdings sollten dann die unbenutzten Eingänge an Pin 11, 12 und 13 einem definierten Pegel zugeführt werden, damit sie nicht herumklappern, unnütz Strom verbraten und HF erzeugen.

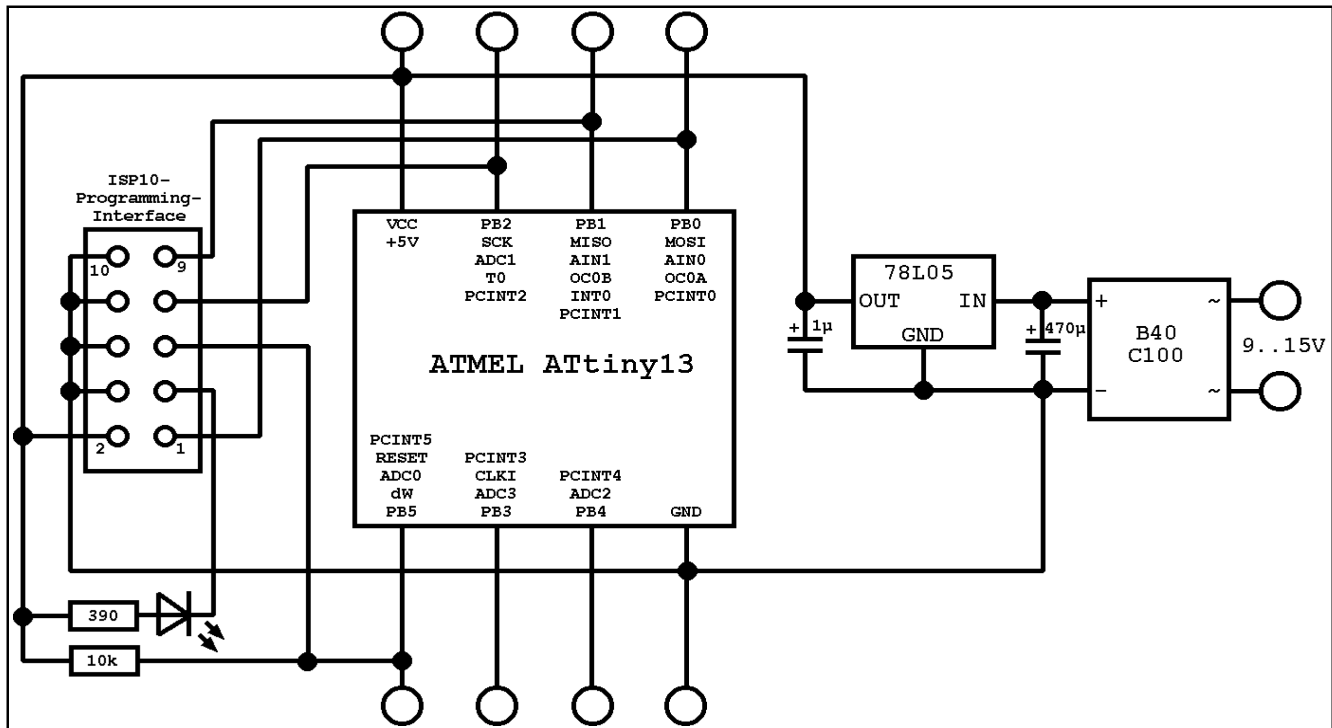
Die Schaltung ist fliegend aufgebaut. Das 10-adrige Flachbandkabel führt zu einem 10-Pin-ISP-Stecker, das Rundkabel zum Printerport.

Den Rest erledigt die alte ISP-Software von ATMEL, PonyProg2000 oder andere Software. Allerdings ist bei der Brennsoftware auf die Unterstützung neuerer AVR-Typen zu achten.

Wer eine serielle Schnittstelle hat (oder einen USB-Seriell-Wandler) kann sich zum Programmieren aus dem Studio oder anderer Brenner-Software auch den kleinen, süßen AVR910-Programmer bauen (Bauanleitung und Schaltbild siehe die Webseite von Klaus Leidinger:
http://www.klaus-leidinger.de/mp/Mikrocontroller/AVR-Prog/AVR-Programmer.html

2.3 Experimentierschaltung mit ATtiny13

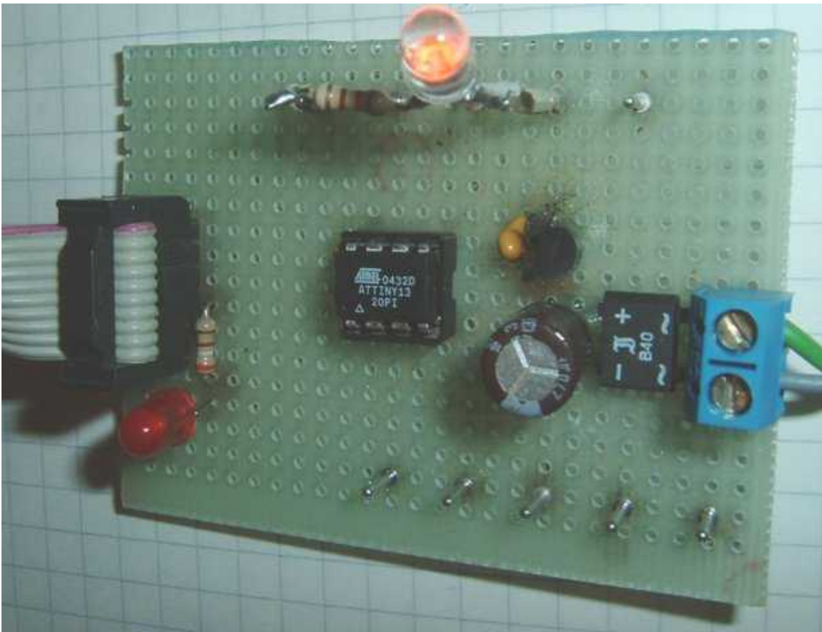
Dies ist ein sehr kleines Experimentierboard, das Tests mit den vielseitigen Innereien des ATtiny13 ermöglicht.



Das Bild zeigt

- das ISP10-Programmier-Interface auf der linken Seite, mit einer Programmier-LED, die über einen Widerstand von 390 Ω an die Betriebsspannung angeschlossen ist,
- den ATtiny13, dessen Reset-Eingang an Pin 1 mit einem Widerstand von 10 kΩ an die Betriebsspannung führt,
- den Stromversorgungsteil mit einem Brückengleichrichter, der mit 9..15 V aus einem ungeregelten Netzteil oder einem Trafo gespeist werden kann, und einem kleinen 5 V-Spannungsregler.

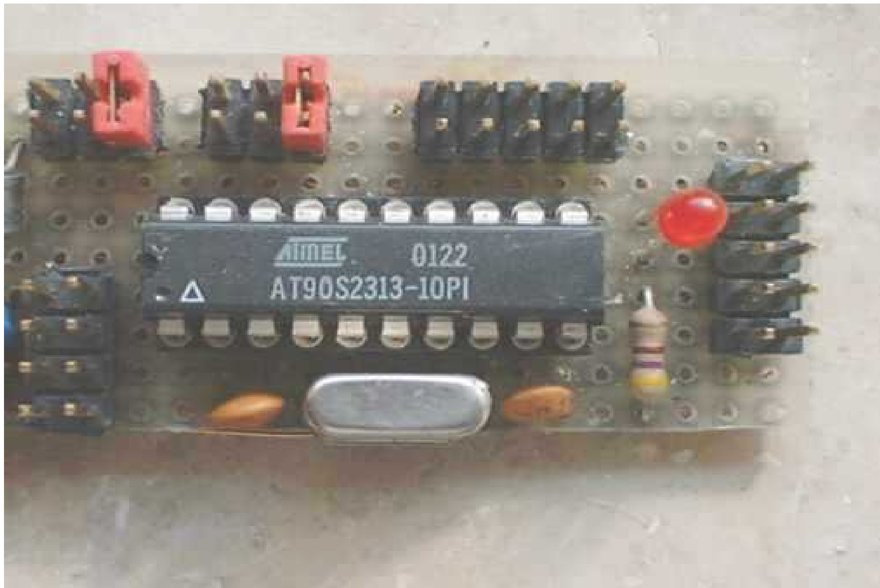
Der ATtiny13 braucht keinen externen Quarz oder Taktgenerator, weil er einen internen 9,6 MHz-RC-Oszillator hat und von der Werksausstattung her mit einem Vorteiler von 8 bei 1,2 MHz arbeitet.



Die Hardware kann auf einem kleinen Experimentierboard aufgebaut werden, wie auf dem Bild zu sehen. Alle Pins des ATtiny13 sind hier über Lötnägel zugänglich und können mit einfachen Steckverbindern mit externer Hardware verbunden werden (im Bild zum Beispiel eine LED mit Vorwiderstand).

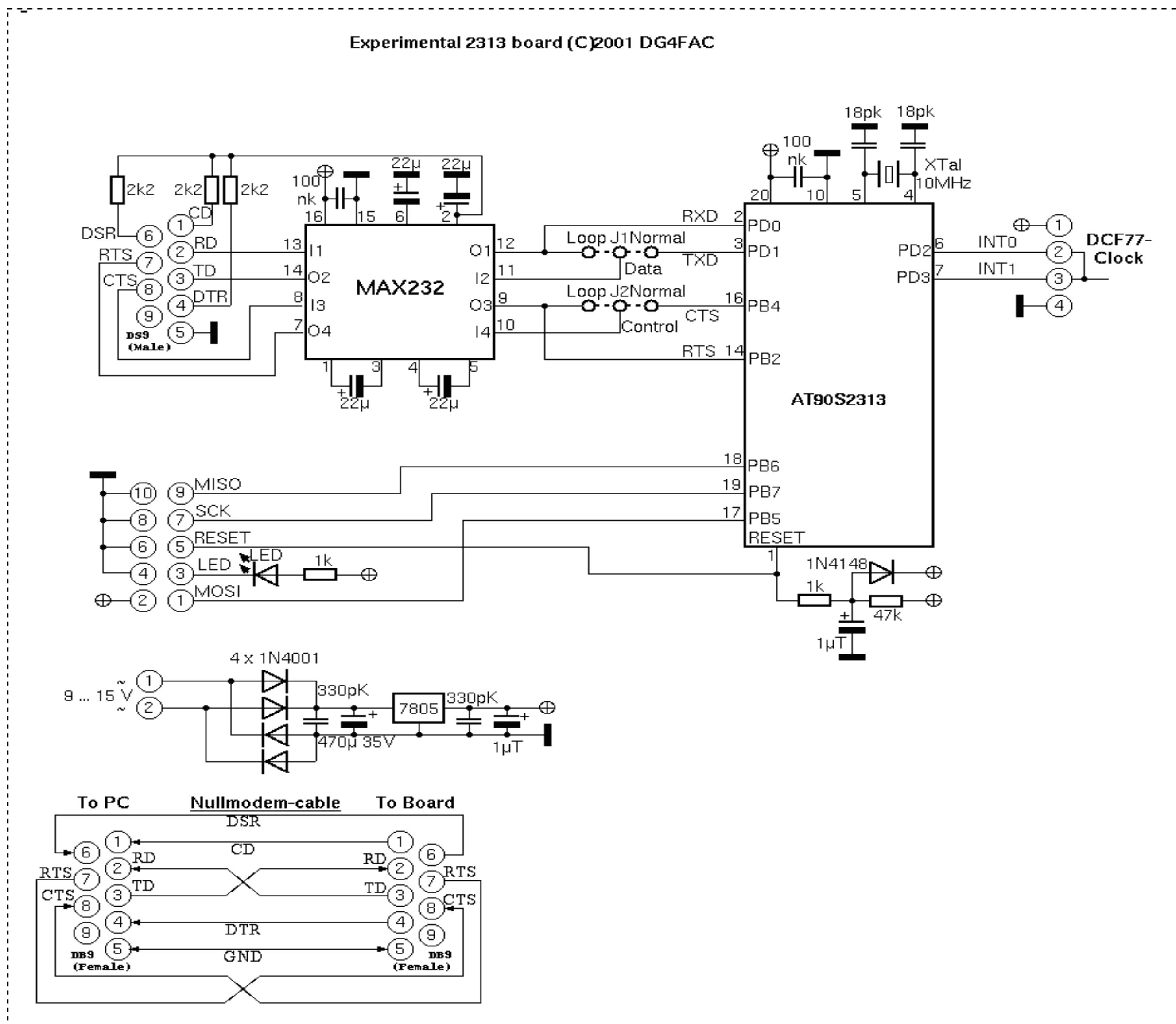
Das Board erlaubt das einfache Testen aller Hardware-Komponenten wie z. B. der Ports, Timer, AD-Wandler.

2.4 Experimentalschaltung mit AT90S2313/ATtiny2313



Damit es noch mehr zum Programmieren gibt, hier eine einfache Schaltung mit einem schon etwas größeren AVR-Typ. Verwendbar ist der veraltete AT90S2313 oder sein neuerer Ersatztyp ATtiny2313.

Im Bild ist der Prozessorteil mit dem ISP10-Anschluss rechts zu sehen, die restliche Hardware wird über die Steckpins angeschlossen.



Die Schaltung hat ein kleines geregeltes Netzteil für den Trafoanschluss (für künftige Experimente mit einem 1A-Regler ausgestattet), einen Quarz-Taktgenerator (hier mit einem 10 MHz-Quarz, es gehen aber auch langsamere), die Teile für einen sicheren Reset beim Einschalten, das ISP-Programmier-Interface (hier mit einem ISP10PIN-Anschluss).

Damit kann man im Prinzip loslegen und an die vielen freien I/O-Pins des 2313 jede Menge Peripherie dranstricken.

Das einfachste Ausgabegerät dürfte für den Anfang eine LED sein, die über einen Widerstand gegen die Versorgungsspannung geschaltet wird und die man an einem Portbit zum Blinken animieren kann.

2.5 Fertige Programmierboards für die AVR-Familie

Wer nicht selber löten will oder gerade einige Euros übrig hat und nicht weiss, was er damit anstellen soll, kauft sich ein fertiges Programmierboard.

STK500

Leicht erhältlich ist das STK500 von ATMEL. Es bietet u.a.:

- Sockel für die Programmierung der meisten AVR-Typen,
- serielle und parallele Low- und High-Voltage Programmierung,
- ISP6PIN- und ISP10PIN-Anschluss für externe Programmierung,
- programmierbare Oszillatorfrequenz und Versorgungsspannungen,
- steckbare Tasten und LEDs,
- einen steckbaren RS232C-Anschluss (UART),
- ein serielles Flash-EEPROM,
- Zugang zu allen Ports über 10-polige Pfostenstecker.

Die Experimente können mit dem mitgelieferten AT90S8515 oder ATmega8515 sofort beginnen. Das Board wird über eine serielle Schnittstelle (COMx) an den Rechner gekoppelt und von den neueren Versionen des Studio's von ATMEL bedient. Für die Programmierung externer Schaltungen besitzt das Board einen ISP6-Anschluss. Damit dürften alle Hardware-Bedürfnisse für den Anfang abgedeckt sein.
Für den Anschluss an eine USB-Schnittstelle am PC braucht man noch einen handelsüblichen USB-Seriell-Wandler. Für eine gute automatische Erkennung durch das Studio ist im Gerätemanager eine der Schnittstellen COM2 bis COM4 für den Wandler und eine Geschwindigkeit von 115 kBaud einzustellen.

AVR Dragon

Wer an seinem PC oder Notebook keine RS232-Schnittstelle mehr hat, ist mit dem preiswerten AVR Dragon gut bedient. An das kleine schmucke Board kann man eine ISP6- oder ISP10-Schnittstelle anbringen und damit externe Hardware programmieren. Das Board hat auch Schnittstellen und Support für die Hochspannungsprogrammierung.

Andere Boards

Es gibt eine Vielzahl an Boards. Eine Einführung in alle verfügbare Boards kann hier nicht gegeben werden. Wichtige Kriterien für die Auswahl eines Boards sind:

- Lassen sich neben dem On-Board-Prozessor auch externe Prozessoren programmieren (z. B. über eine ISP6- oder ISP10-Schnittstelle)?
- Wenn ja, wie erfolgt langfristig der Support (Update) für neuere AVR-Typen?
- Sind ausreichend Schnittstellen vorhanden, an denen bei Bedarf externe Komponenten angeschlossen werden können?
- Ist der On-Board-Prozessor ein Typ, für den es weiterhin Support von ATMEL gibt?
- Ist für die Programmierung proprietäre Herstellersoftware nötig?

3 Werkzeuge für die AVR-Assembler-Programmierung

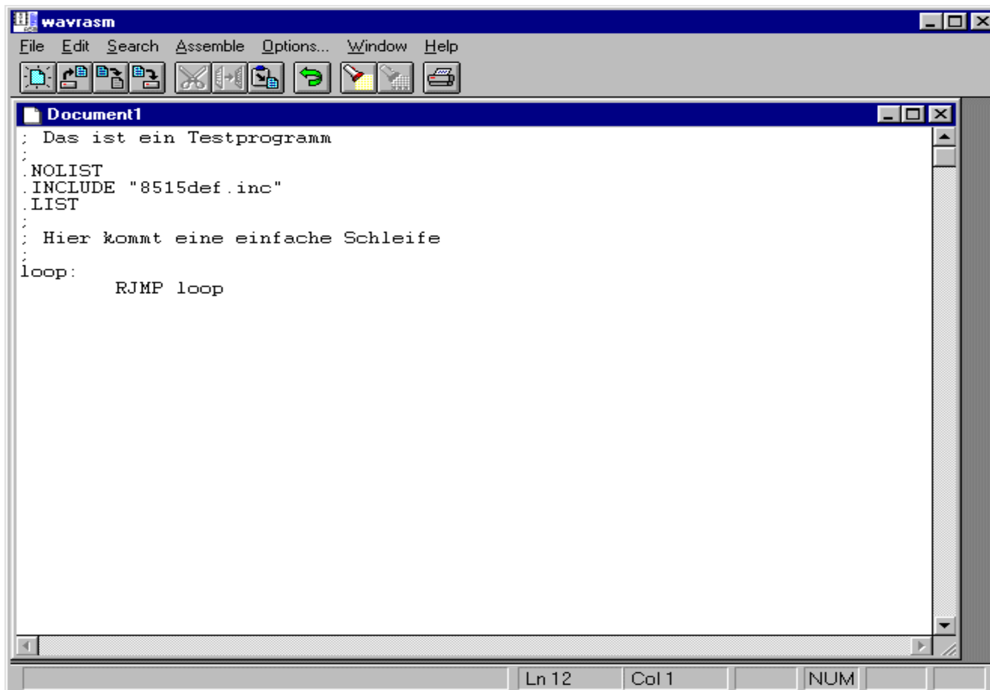
In diesem Abschnitt werden die Werkzeuge vorgestellt, die zum Assembler-Programmieren nötig sind. Dabei werden zunächst Werkzeuge besprochen, die jeden Arbeitsschritt separat erledigen, damit die zugrunde liegenden Schritte einzeln nachvollzogen werden können. Erst danach wird eine integrierte Werkzeugumgebung vorgestellt.

Für die Programmierung werden vier Teilschritte und Werkzeuge benötigt. Im einzelnen handelt es sich um

1. den Editor,
2. den Assembler,
3. das Programmier-Interface, und
4. den Simulator.

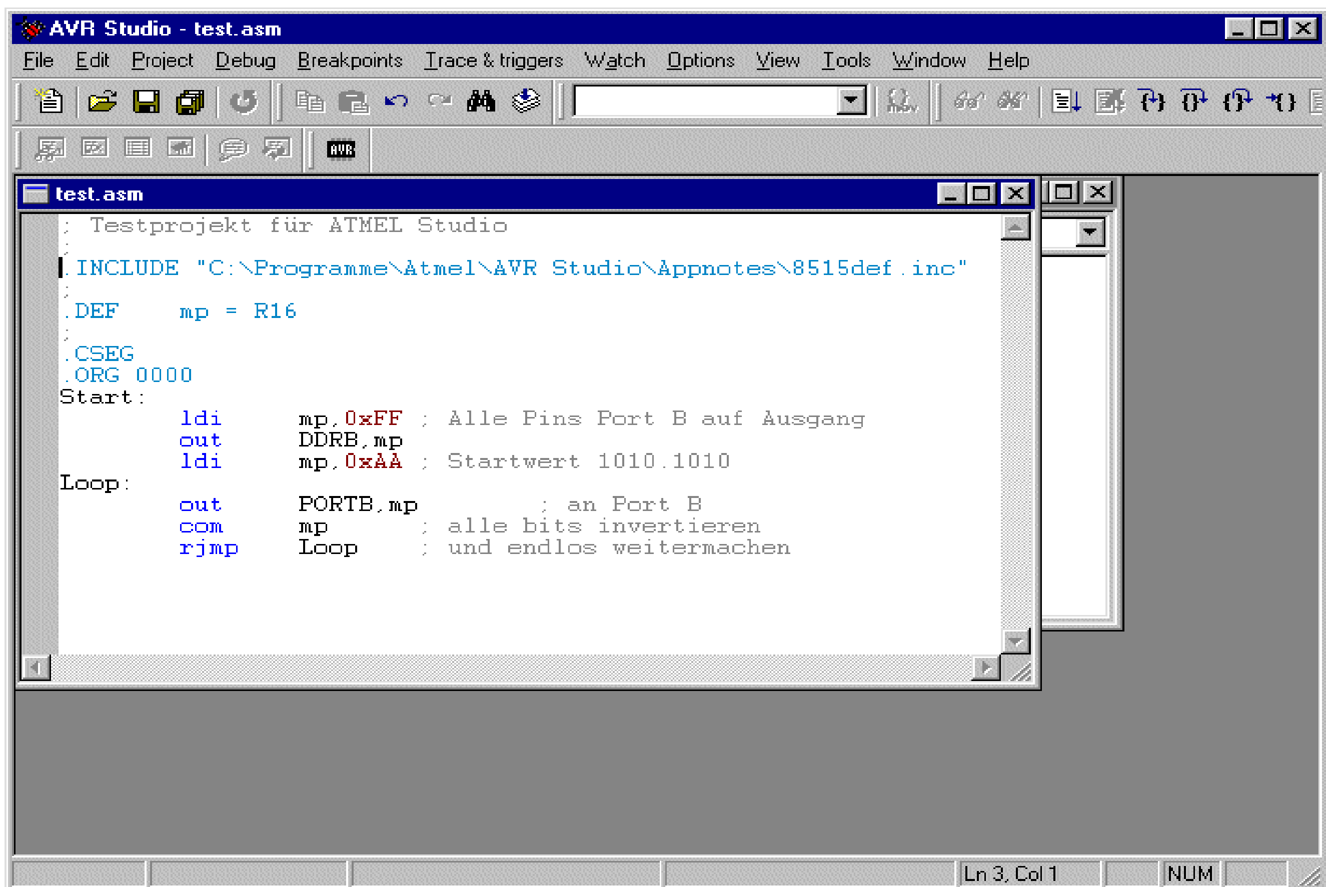
3.1 Der Editor

Assemblerprogramme schreibt man mit einem Editor. Der braucht im Prinzip nicht mehr können als ASCII-Zeichen zu schreiben und zu speichern. Im Prinzip täte es ein sehr einfaches Schreibgerät. Wir zeigen hier ein etwas veraltetes Gerät, den WAVRASM von ATMEL. Der WAVRASM sieht nach der Installation und nach dem Start eines neuen Projektes etwa so aus:



Im Editor schreiben wir einfach die Assemblerinstruktionen und Befehlszeilen drauf los, gespickt mit Kommentaren, die alle mit einem Semikolon beginnen. Das sollte dann etwa so aussehen.

Nun wird das Assembler-Programm mit dem File-Menue in irgendein Verzeichnis, am besten in ein eigens dazu errichtetes, abgespeichert. Fertig ist der Assembler-Quellcode.
Manche Editoren erkennen Instruktionen und Symbole und färben diese Worte entsprechend ein, so dass man Tippfehler schnell erkennt und ausbessern kann (Syntax-Highlighting genannt). In einem solchen Editor sieht unser Programm wie im Bild aus.

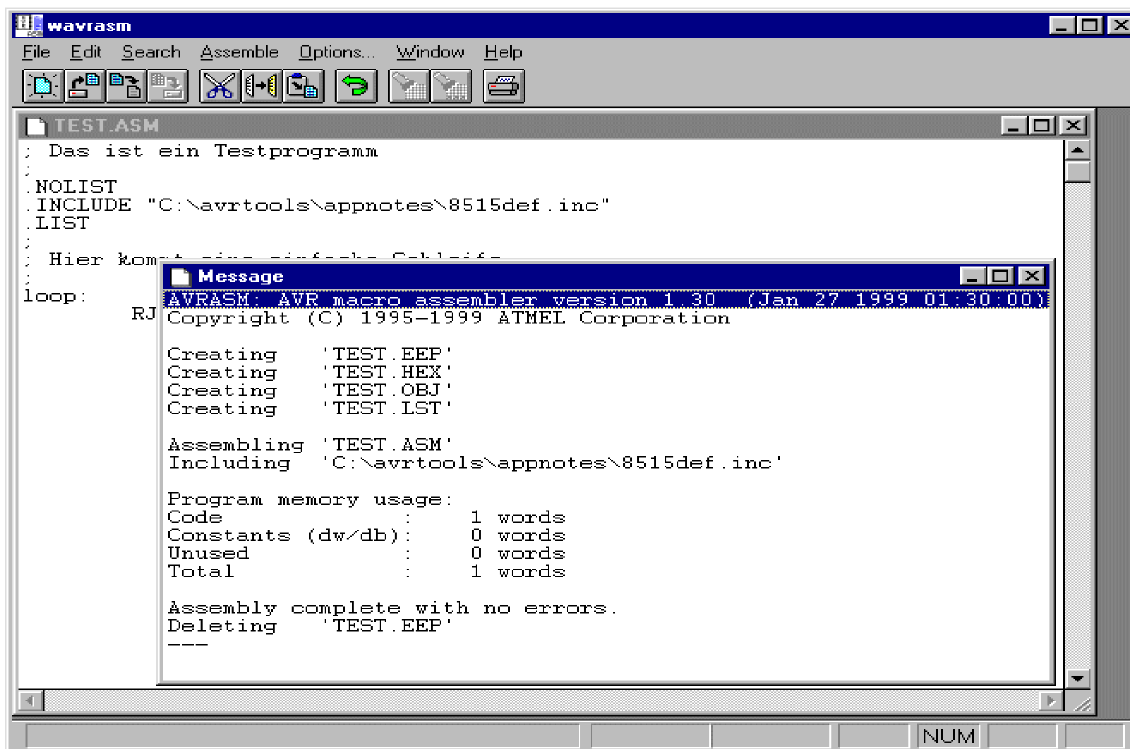


Auch wenn die im Editor eingegebenen Worte noch ein wenig kryptisch aussehen, sie sind von Menschen lesbar und für den eigentlichen Mikroprozessor noch völlig unbrauchbar.

3.2 Der Assembler

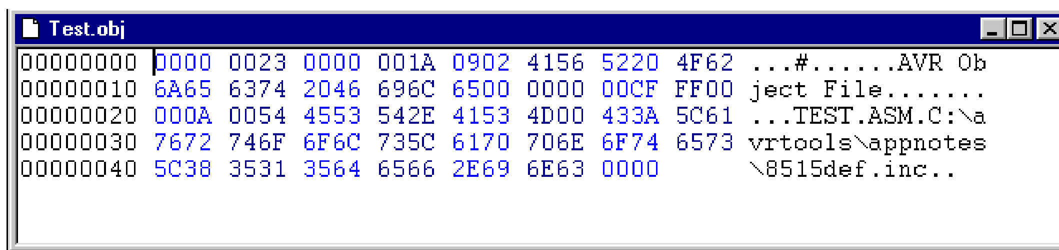
Nun muss das ganze Programm von der Textform in die Maschinen-sprachliche Form gebracht werden. Den Vorgang heißt man Assemblieren, was in etwa "Zusammenbauen", "Auf-türmen" oder auch "zusammen schrauben" bedeutet. Das erledigt ein Programm, das auch so heißt: Assembler. Derer gibt es sehr viele. Für AVR heißen die zum Beispiel "AvrAssembler" oder "AvrAssembler2" (von ATMEL, Bestandteil der Studio-Entwicklungsumgebung), "TAvrAsm" (Tom's AVR Assembler) oder mein eigener "GAvrAsm" (Gerd's AVR Assembler). Welchen man nimmt, ist weitgehend egal, jeder hat da so seine Stärken, Schwächen und Besonderheiten.

Beim WAVRASM klickt man dazu einfach auf den Menuepunkt mit der Aufschrift "Assemble". Das Ergebnis ist in diesem Bild zu sehen. Der Assembler geruht uns damit mitzuteilen, dass er das Programm übersetzt hat. Andernfalls würfe er mit dem Schlagwort „Error“ um sich. Immerhin ein Wort Code ist dabei erzeugt worden. Und er hat aus unserer einfachen Textdatei gleich vier neue Dateien erzeugt. In der ersten der vier neuen Dateien, TEST.EEP, befindet sich der Inhalt, der in das EEPROM geschrieben werden soll. Er ist hier ziemlich uninteressant, weil wir nichts ins EEPROM programmieren wollten. Hat er gemerkt und die Datei auch gleich wieder gelöscht.



Die zweite Datei, TEST.HEX, ist schon wichtiger, weil hier die Befehlsworte untergebracht sind. Diese Datei brauchen wir zum Programmieren des Prozessors. Sie enthält die nebenstehenden Hieroglyphen. Die hexadezimalen Zahlen sind als ASCII-Zeichen aufgelöst und werden mit Adressangaben und Prüfsummen zusammen abgelegt. Dieses Format heißt Intel-Hex-Format und ist uralt. Jedenfalls versteht diesen Salat jede Programmier-Software recht gut.

Die dritte Datei, TEST.OBJ, kriegen wir später, sie wird zum Simulieren gebraucht. Ihr Format ist hexadezimal und von ATMEL speziell zu diesem Zweck definiert. Sie sieht im Hex-Editor wie abgebildet aus. Merke: Diese Datei wird vom Programmiergerät nicht verstanden!



Die vierte Datei, TEST.LST, können wir uns mit einem Editor anschauen.

```
AVRASM ver. 1.30  TEST.ASM Sun Jun 10 01:46:13 2001


          ; Das ist ein Testprogramm
          ;
           .NOLIST
          ;
          ; Hier kommt eine einfache Schleife
          ;
           loop:
000000 cfff             RJMP loop


Assembly complete with no errors.
```

Sie enthält das Nebenstehende. Wir sehen das Programm mit allen Adressen (hier: "000000"), Maschineninstruktionen (hier: "cfff") und Fehlermeldungen (hier: keine) des Assemblers. Die List-Datei braucht man selten, aber gelegentlich.

3.3 Das Programmieren des Chips

Nun muss der in der Hex-Datei abgelegte Inhalt dem AVR-Chip beigebracht werden. Das erledigt Brenner-Software. Üblich sind die Brenn-Tools im Studio von ATMEL, das vielseitige Pony-Prog 2000 und andere mehr (konsultiere die Lieblings-Suchmaschine).

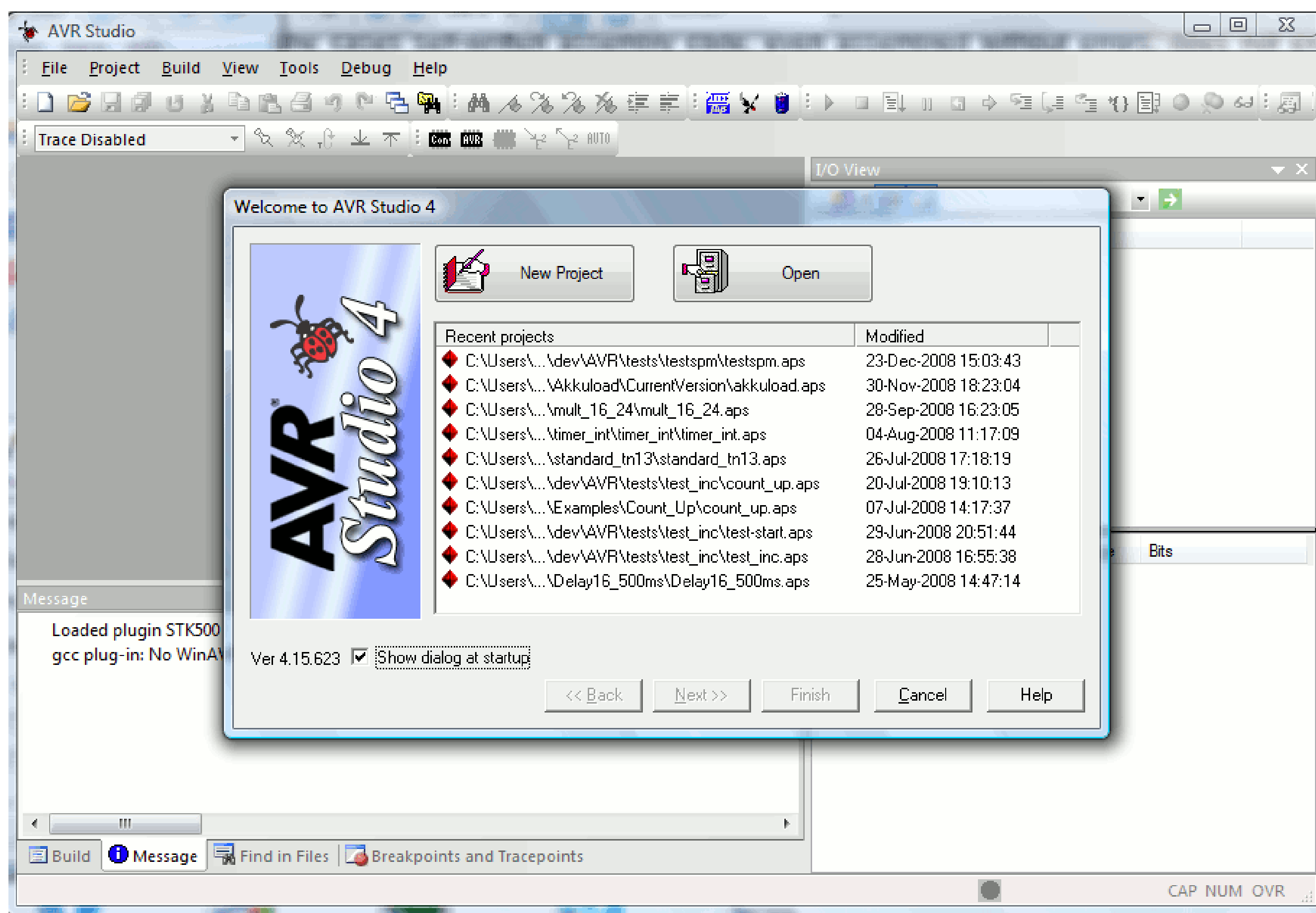
Das Brennen wird hier am Beispiel des ISP gezeigt. Das gibt es nicht mehr, arbeitet aber sehr viel anschaulicher als moderne Software, weil es einen Blick in das Flash-Memory des AVR ermöglicht. Wir starten das Programm ISP, erzeugen ein neues Projekt und laden die gerade erzeugte Hex-Datei mit LOAD PROGRAM. Das sieht dann wie im Bild aus. Wenn wir nun mit dem Menü „Program“ den Chip programmieren, dann legt dieser gleich los. Beim Brennen gibt eine Reihe von weiteren Voraus-

setzungen (richtige Schnittstelle auswählen, Adapter an Schnittstelle angeschlossen, Chip auf dem Programmierboard vorhanden, Stromversorgung auf dem Board eingeschaltet, ...), ohne die das natürlich nicht geht.

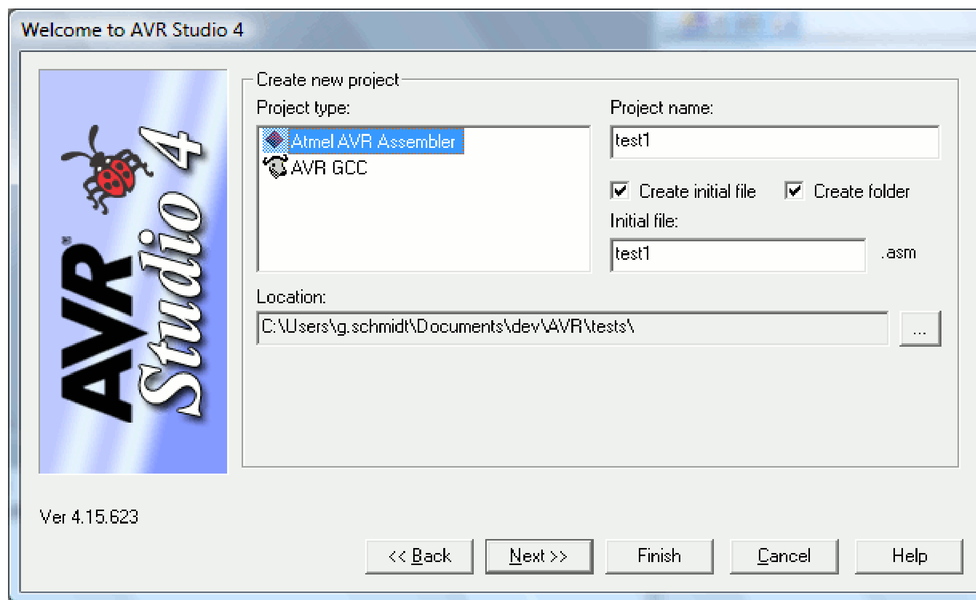
3.4 Das Simulieren im Studio

In einigen Fällen hat selbst geschriebener Code nicht bloß Tippfehler, sondern hartnäckige logische Fehler. Die Software macht einfach nicht das, was sie soll, wenn der Chip damit gebrannt wird. Tests auf dem Chip selbst können kompliziert sein, speziell wenn die Hardware aus einem Minimum besteht und keine Möglichkeit besteht, Zwischenergebnisse auszugeben oder wenigstens Hardware-Signale zur Fehlersuche zu benutzen. In diesen Fällen hat das Studio-Software-Paket von ATMEL einen Simulator, der für die Entwanzung ideale Möglichkeiten bietet. Das Programm kann Schritt für Schritt abgearbeitet werden, die Zwischenergebnisse in Prozessorregistern sind überwachbar, etc.

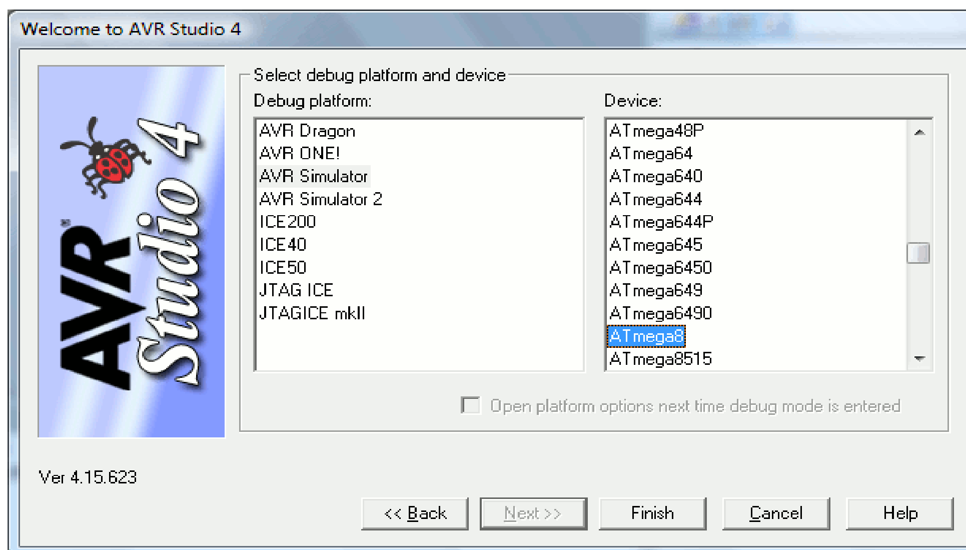
Die folgenden Bilder sind der Version 4 entnommen, die ältere Version 3 sieht anders aus, macht aber in etwa dasselbe. Die Studio Software enthält alles, was man zur Entwicklung, zur Fehlersuche, zur Simulation, zum Brennen der Programme und an Hilfen braucht. Nach der Installation und dem Start des Riesenpakets (z. Zt. ca. 100 MB) sieht das erste Bild wie folgt aus: Der erste Dialog fragt, ob wir ein neues oder bereits bestehendes Projekt öffnen wollen. Im Falle einer Erstinstallation ist "New Project" die korrekte Antwort.



Der Knopf "Next>>" bringt uns zum Einstellungsdialog für das neue Projekt:



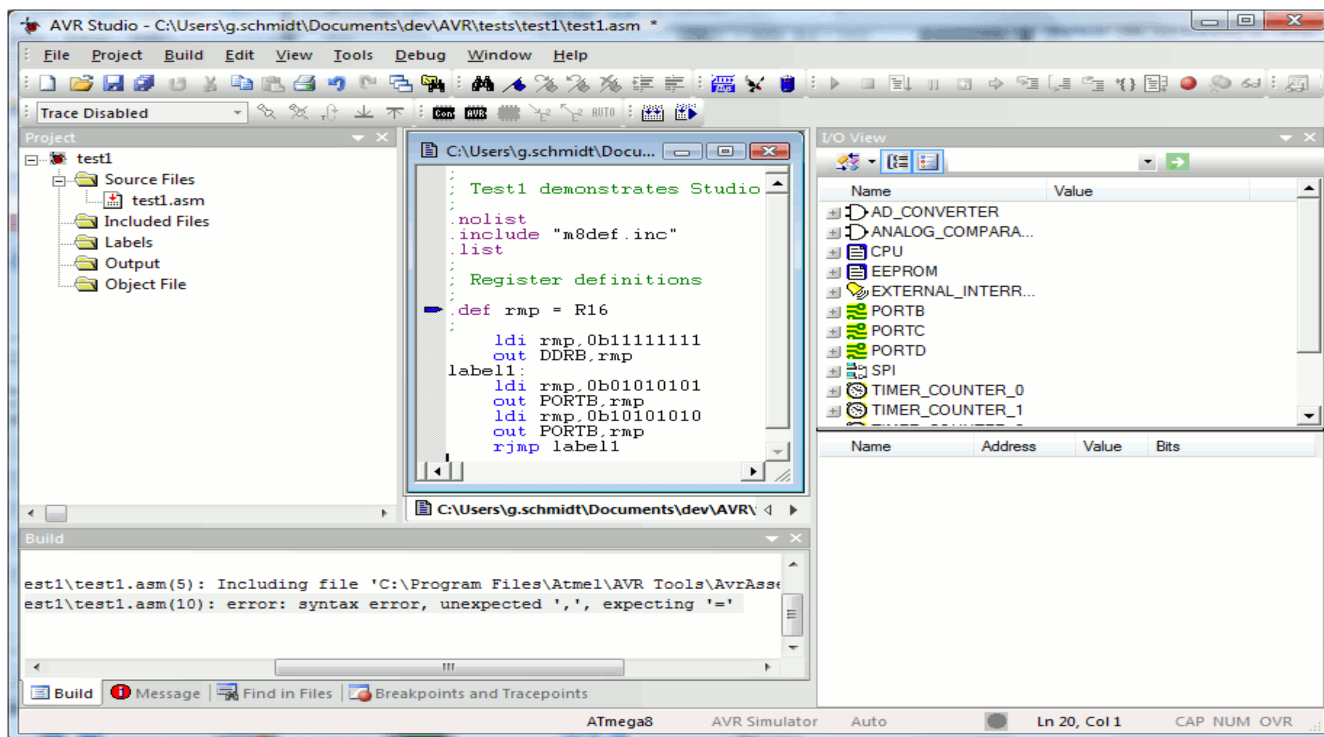
In diesem Dialog wird „Assembler“ ausgewählt, das Projekt kriegt einen aussagekräftigen Namen („test1“), die erste Quellcode-Datei lassen wir erzeugen und auch gleich einen neuen Ordner dazu. Das Ganze geht in einen Ordner auf der Festplatte, zu dem wir Schreibzugriff haben und wird mit „Next“ beendet.



Hier wird die Plattform "Simulator" ausgewählt. Ferner wird hier der Prozessor-Zieltyp (hier: ATmega8) ausgewählt. Der Dialog wird mit "Finish" abgeschlossen.

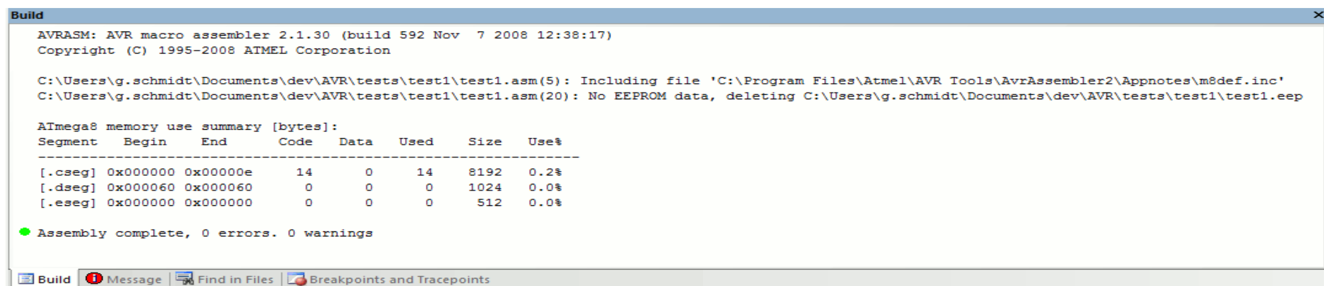
Das öffnet ein ziemlich großes Fenster mit ziemlich vielen Bestandteilen:

- links oben das Fenster mit der Projektverwaltung, in dem Ein- und Ausgabedateien verwaltet werden können,
- in der Mitte oben ist das Editorfenster zu sehen, das den Inhalt der Datei "test1.asm" anzeigt und in das der Quelltext eingegeben werden kann,
- rechts oben die Hardware-Ansicht des Zielprozessors (dazu später mehr),
- links unten das "Build"-Fensters, in dem Diagnose-Ausgaben erscheinen, und
- rechts unten ein weiteres Feld, in dem diverse Werte beim Entwanzen angezeigt werden.



Alle Fenster sind in Größe und Lage verschiebbar.

Für den Nachvollzug der nächsten Schritte im Studio ist es notwendig, das im Editorfenster sichtbare Programm abzutippen (zu den Bestandteilen des Programmes später mehr) und mit "Build" und "Build" zu übersetzen. Das bringt die Ausgabe im unteren Build-Fenster zu folgender Ausgabe:



Dieses Fenster teilt uns mit, dass das Programm fehlerfrei übersetzt wurde und wieviel Code dabei erzeugt wurde (14 Worte, 0,2% des verfügbaren Speicherraums. Nun wechseln wir in das Menü "Debug", was unsere Fensterlandschaft ein wenig verändert.

Im linken Editor-Fenster taucht nun ein gelber Pfeil auf, der auf die erste ausführbare Instruktion des Programmes zeigt. Mit "View", "Toolbars" und "Processor" bringt man das Prozessorfenster rechts zur Anzeige. Es bringt uns Informationen über die aktuelle Ausführungsadresse, die Anzahl der verarbeiteten Instruktionen, die verstrichene Zeit und nach dem Klicken auf das kleine "+" neben "Registers" den Inhalt der Register.

Mit "Debug" und "Step into" oder der Taste F11 wird nun ein Einzelschritt vorgenommen.

Der Programmzähler hat sich nun verändert, er steht auf "0x000001". Der Schrittzähler hat einen Zyklus gezählt und im Register R16 steht nun hexadezimal "0xFF" oder dezimal 255. LDI lädt also einen Hexadezimalwert in ein Register. Nach einem weiteren Schritt mit F11 und Aufklappen von PORTB im Hardware-Fenster "I/O-View" ist die Wirkung der gerade abgearbeiteten Instruktion "out PORTB,rmp" zu sehen:

Das Richtungs-Port-Register Data Direction PortB (DDRB) hat nun 0xFF und in der Bitanzeige unten acht schwarze Kästchen. Mit zwei weiteren Einzelschritten (F11) hat dann der Ausgabeport PORTB den Hexadezimalwert "0x55".

Das Richtungs-Port-Register Data Direction PortB (DDRB) hat nun 0xFF und in der Bitanzeige unten acht schwarze Kästchen.

Mit zwei weiteren Einzelschritten (F11) hat dann der Ausgabeport PORTB den Hexadezimalwert "0x55".

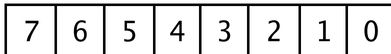
Zwei weitere Schritte klappen die vier schwarzen und die vier weißen Kästchen um. Erstaunlicherweise ist nun der Port PINB dem vorhergehenden Bitmuster gefolgt. Aber dazu dann später im Abschnitt über Ports.

Soweit dieser kleine Ausflug in die Welt des Simulators. Er kann noch viel mehr, deshalb sollte dieses Werkzeug oft und insbesondere bei allen hartnäckigen Fällen von Fehlern verwendet werden. Klicken Sie sich mal durch seine Menüs, es gibt viel zu entdecken.

4 Register

4.1 Was ist ein Register?

Register sind besondere Speicher mit je 8 Bit Kapazität. Sie sehen bitmäßig daher etwa so aus:



7	6	5	4	3	2	1	0

Man merke sich die Nummerierung der Bits: sie beginnt immer bei Null. In einen solchen Speicher passen entweder

- Zahlen von 0 bis 255 (Ganzzahl ohne Vorzeichen),
- Zahlen von -128 bis +127 (Ganzzahl mit Vorzeichen in Bit 7),
- ein Acht-Bit-ASCII-Zeichen wie z.B. 'A' oder auch
- acht einzelne Bits, die sonst nix miteinander zu tun haben (z.B. einzelne Flaggen oder Flags).

Das Besondere an diesen Registern (im Gegensatz zu anderen Speichern) ist, dass sie

- direkt in Instruktionen verwendet werden können, da sie direkt an das Rechenwerk, den Akkumulator, angeschlossen sind,
- Operationen mit ihrem Inhalt mit nur einem Instruktionswort ausgeführt werden können,
- sowohl Quelle von Daten als auch Ziel des Ergebnisses der Operation sein können.

Es gibt 32 davon in jedem AVR. Auch der kleinste AVR hat schon so viele. Diese Eigenschaft macht die AVR ziemlich einzigartig, weil dadurch viele Kopieraktionen und der langsamere Zugriff auf andere Speicherarten oft nicht nötig ist. Die Register werden mit R0 bis R31 bezeichnet, man kann ihnen mit einer Assemblerdirektive aber auch einen etwas wohlklingenderen Namen verpassen, wie z.B.

```
.DEF MeinLieblingsregister = R16
```

Assemblerdirektiven gibt es einige (siehe die Tabelle im Anhang), sie stellen Regie-Anweisungen an den Assembler dar und erzeugen selbst keinen ausführbaren Code. Sie beginnen immer mit einem Punkt.
Statt des Registernamens R16 wird dann fürderhin immer der neue Name verwendet. Das könnte also ein schreibintensives Programm werden.

Mit der Instruktion

```
LDI MeinLieblingsRegister, 150
```

was in etwa bedeutet: Lade die Zahl 150 in das Register R16, aber hurtig, (in englisch: LoaD Immediate) wird ein fester Wert oder eine Konstante in mein Lieblingsregister geladen. Nach dem Übersetzen (Assemblieren) ergibt das im Programmspeicher etwa folgendes Bild:

```
000000 E906
```

In E906 steckt sowohl die Load-Instruktion als auch das Zielregister (R16) als auch die Konstante 150, auch wenn man das auf den ersten Blick nicht sieht. Auch dies macht Assembler bei den AVR zu einer höchst effektiven Angelegenheit: Instruktion und Konstante in einem einzigen Instruktionswort – schnell und effektiv ausgeführt. Zum Glück müssen wir uns um diese Übersetzung nicht kümmern, das macht der Assembler für uns.

$$In einer Instruktion können auch zwei Register vorkommen. Die einfachste Instruktion dieser Art ist die KopierInstruktion MOV. Er kopiert den Inhalt des einen Registers in ein anderes Register. Also etwa so:

```
.DEF MeinLieblingsregister = R16
.DEF NochEinRegister = R15
        LDI MeinLieblingsregister, 150
        MOV NochEinRegister, MeinLieblingsregister
```

Die ersten beiden Zeilen dieses großartigen Programmes sind Direktiven, die ausschließlich dem Assembler mitteilen, dass wir anstelle der beiden Registernamen R16 und R15 andere Benennungen zu verwenden wünschen. Sie erzeugen keinen Code! Die beiden Programmzeilen mit LDI und MOV erzeugen Code, nämlich:

```
        000000 E906
        000001 2F01
```

Die zweite Instruktion schiebt die 150 im Register R16 in das Rechenwerk und kopiert dessen Inhalt in das Zielregister R15. MERKE:

Das erstgenannte Register in der Assemblerinstruktion ist immer das Zielregister, das das Ergebnis aufnimmt.

(Also so ziemlich umgekehrt wie man erwarten würde und wie man es ausspricht. Deshalb sagen viele, Assembler sei schwer zu erlernen!)

4.2 Unterschiede der Register

Schlaumeier würden das obige Programm vielleicht eher so schreiben:

```
.DEF NochEinRegister = R0
        LDI NochEinRegister, 150
```

Und sind reingefallen: Nur die Register R16 bis R31 lassen sich hurtig mit einer Konstante laden, die Register R0 bis R15 nicht! Diese Einschränkung ist ärgerlich, ließ sich aber bei der Konstruktion der Assemblersprache für die AVRs wohl kaum vermeiden.

Es gibt eine Ausnahme, das ist das Nullsetzen eines Registers. Diese Instruktion

```
        CLR MeinLieblingsRegister
```

ist für alle Register zulässig (aber nur, weil weil es eigentlich korrekt XOR MeinLieblingsregister,MeinLieblingsregister heißen müsste und gar kein echtes und ganz anders als LDI MeinLieblingsRegister,0 funktioniert).

Diese zwei Klassen von Registern gibt es außer bei LDI noch bei folgenden Instruktionen:

- ANDI Rx,K ; Bit-Und eines Registers Rx mit einer Konstante K,
- CBR Rx,M ; Lösche alle Bits im Register Rx, die in der Maske M (eine Konstante) gesetzt sind,
- CPI Rx,K ; Vergleiche das Register Rx mit der Konstante K,
- SBCI Rx,K ; Subtrahiere die Konstante K und das Carry-Flag vom Wert des Registers Rx und speichere das Ergebnis im Register Rx,
- SBR Rx,M ; Setze alle Bits im Register Rx, die auch in der Maske M (eine Konstante) gesetzt sind,
- SER Rx ; Setze alle Bits im Register Rx (entspricht LDI Rx,255),
- SBI Rx,K ; Subtrahiere die Konstante K vom Inhalt des Registers Rx und speichere das Ergebnis in Register Rx.

Rx muss bei diesen Instruktionen ein Register zwischen R16 und R31 sein! Wer also vorhat, solche Instruktion zu verwenden, sollte ein Register oberhalb von R15 dafür auswählen. Das programmiert sich dann

leichter. Noch ein Grund, die Register mittels .DEF umzubenennen: in größeren Programmen wechselt sich dann leichter ein Register, wenn man ihm einen besonderen Namen gegeben hat.

4.3 Pointer-Register

Noch wichtigere Sonderrollen spielen die Registerpaare R26/R27, R28/R29 und R30/R31. Diese Pärchen sind so wichtig, dass man ihnen in der AVR-Assemblersprache extra Namen gegeben hat: X, Y und Z. Diese Doppelregister sind als 16-Bit-Pointerregister definiert. Sie werden gerne bei Adressierungen für internes oder externes RAM verwendet (X, Y und Z) oder als Zeiger in den Programmspeicher (Z).

Bei den 16-Bit-Pointern befindet sich das niedrigere Byte der Adresse im niedrigeren Register, das höherwertige Byte im höheren Register. Die beiden Teile haben wieder eigene Namen, nämlich ZH (höherwertig, R31) und ZL (niederwertig, R30). Die Aufteilung in High und Low geht dann etwa folgendermaßen:

```
.EQU Adresse = RAMEND ; In RAMEND steht die höchste SRAM-Adresse des Chips
	LDI YH,HIGH(Adresse)
	LDI YL,LOW(Adresse)
```

Für die Pointerzugriffe selbst gibt es eine Reihe von Spezial-Zugriffs-Instruktionen zum Lesen(LD=Load) und Schreiben (ST=Store), hier am Beispiel des X-Zeigers:

Zeiger	***Vorgang***	***Beispiele***
X	Lese/Schreibe von der Adresse X und lasse den Zeiger unverändert	LD R1,X ST X,R1
X+	Lese/Schreibe von der Adresse X und erhöhe den Zeiger anschließend um Eins	LD R1,X+ ST X+,R1
-X	Vermindere den Zeiger um Eins und lese/schreibe dann erst von der neuen Adresse	LD R1,-X ST -X,R1

Analog geht das mit Y und Z ebenso.
Für das Lesen aus dem Programmspeicher gibt es nur den Zeiger Z und die Instruktion LPM. Sie lädt das Byte an der Adresse Z in das Register R0. Da im Programmspeicher jeweils Worte, also zwei Bytes stehen, wird die Adresse mit zwei multipliziert und das unterste Bit gibt jeweils an, ob das untere oder obere Byte des Wortes im Programmspeicher geladen werden soll. Also etwa so:

```
	LDI ZH,HIGH(2*Adresse)
	LDI ZL,LOW(2*Adresse)
	LPM
```

Nach Erhöhen des Zeigers um Eins wird das niedrigste Bit Eins und mit LPM das zweite (höhere) Byte des Wortes im Programmspeicher gelesen. Da die Erhöhung des 16-Bit-Speichers um Eins auch oft vorkommt, gibt es auch hierfür eine Spezialinstruktion für Zeiger:

```
	ADIW ZL,1
	LPM
```

ADIW heißt soviel wie ADdiere Immediate Word und kann bis maximal 63 zu dem Wort addieren. Als Register wird dabei immer das untere Zeigerregister angegeben (hier: ZL). Die analoge Instruktion zum Zeiger vermindern heißt SBIW (SuBtract Immediate Word). Anwendbar sind die beiden Instruktionen auf die Registerpaare X, Y und Z sowie auf das Doppelregister R24/R25, das keinen eigenen Namen hat und auch keinen Zugriff auf RAM- oder sonstige Speicher ermöglicht. Es kann als 16-Bit-Wert optimal verwendet

werden.

Wie bekommt man aber nun die Werte, die ausgelesen werden sollen, in den Programmspeicher? Dazu gibt es die DB- und DW-Direktiven für den Assembler. Ausnahmsweise erzeugen diese beiden Direktiven Code, und zwar die eingetippten Konstanten. Byte-weise Listen werden so erzeugt:

```
Liste:
.DB 123,45,67,78 ; eine Liste mit vier Bytes
.DB "Das ist ein Text. " ; eine Liste mit einem Text
```

Auf jeden Fall ist bei .DB darauf achten, dass die Anzahl der einzufügenden Bytes pro Zeile geradzahlig sein muss. Sonst fügt der Assembler in seiner Not noch ein Nullbyte am Ende hinzu, das vielleicht gar nicht erwünscht ist und alles durcheinander bringt.
Das Problem gibt es bei wortweise organisierten Tabellen nicht. Die sehen so aus:

```
.DW 12345,6789 ; zwei Worte
```

Statt der Konstanten können selbstverständlich auch Labels (Sprungadressen) eingefügt werden, also z.B. so:

```
Label1:
   [... hier kommen irgendwelche Instruktionen...]
Label2:
   [... hier kommen noch irgendwelche Instruktionen...]
Sprungtabelle:
.DW Label1,Label2
```

Beim Lesen per LPM erscheint immer das niedrigere Byte der 16-Bit-Zahl zuerst!

Und noch was für Exoten, die gerne von hinten durch die Brust ins Auge programmieren: Die Register sind auch mit Zeigern lesbar und beschreibbar. Sie liegen an der Adresse 0000 bis 001F. Das kann man nur gebrauchen, wenn man auf einen Rutsch eine Reihe von Registern in das RAM kopieren will oder aus dem RAM laden will. Lohnt sich aber erst ab 5 Registern.

4.4 Empfehlungen zur Registerwahl

- Register immer mit der .DEF-Anweisung festlegen, nie direkt verwenden.
- Werden Pointer-Register für RAM u.a. benötigt, R26 bis R31 dafür reservieren.
- 16-Bit-Zähler oder ähnliches realisiert man am besten in R24/R25.
- Soll aus dem Programmspeicher gelesen werden, Z (R30/31) und R0 dafür reservieren.
- Werden oft konstante Werte oder Zugriffe auf einzelne Bits in einem Register verwendet, dann die Register R16 bis R23 dafür vorzugsweise reservieren.
- Für alle anderen Anwendungsfälle vorzugsweise R1 bis R15 verwenden.

5 Ports

5.1 Was ist ein Port?

Ports sind eigentlich ein Sammelsurium verschiedener Speicher. In der Regel dienen sie der Kommunikation mit irgendeiner internen Gerätschaft wie z.B. den Timern oder der Seriellen Schnittstelle oder der Bedienung von äußeren Anschlüssen wie den Parallel-Schnittstellen des AVR. Der wichtigste Port wird weiter unten besprochen: das Status-Register, das an das wichtigste interne Gerät, nämlich den Akkumulator, angeschlossen ist.

Port-Organisation

Es gibt insgesamt 64 direkt adressierbare Ports, die aber nicht bei allen AVR-Typen auch tatsächlich physikalisch vorhanden sind. Bei größeren ATmega gibt es neben den direkt adressierbaren Ports noch indirekt adressierbare Ports, doch dazu später mehr. Je nach Größe und Ausstattung des Typs sind eine Reihe von Ports sinnvoll ansprechbar. Welche der Ports in welchem Typ tatsächlich vorhanden sind, ist letztlich aus den Datenblättern zu erfahren. Hier ein Ausschnitt aus den Ports des ATmega8 (von ATMEL zur allgemeinen Verwirrung auch "Register" genannt:

Register Summary

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
0x3F (0x5F)	SREG	I	T	H	S	V	N	Z	C
0x3E (0x5E)	SPH	–	–	–	–	–	SP10	SP9	SP8
0x3D (0x5D)	SPL	SP7	SP6	SP5	SP4	SP3	SP2	SP1	SP0
0x3C (0x5C)	Reserved								
0x3B (0x5B)	GICR	INT1	INT0	–	–	–	–	IVSEL	IVCE
0x3A (0x5A)	GIFR	INTF1	INTF0	–	–	–	–	–	–
0x39 (0x59)	TIMSK	OCIE2	TOIE2	TICIE1	OCIE1A	OCIE1B	TOIE1	–	TOIE0
0x38 (0x58)	TIFR	OCF2	TOV2	ICF1	OCF1A	OCF1B	TOV1	–	TOV0
0x37 (0x57)	SPMCR	SPMIE	RWWSB	–	RWWSRE	BLBSET	PGWRT	PGERS	SPMEN
0x36 (0x56)	TWCR	TWINT	TWEA	TWSTA	TWSTO	TWWC	TWEN	–	TWIE
0x35 (0x55)	MCUCR	SE	SM2	SM1	SM0	ISC11	ISC10	ISC01	ISC00
0x34 (0x54)	MCUCSR	–	–	–	–	WDRF	BORF	EXTRF	PORF
0x33 (0x53)	TCCR0	–	–	–	–	–	CS02	CS01	CS00
0x32 (0x52)	TCNT0	Timer/Counter0 (8 Bits)							
0x31 (0x51)	OSCCAL	Oscillator Calibration Register							
0x30 (0x50)	SFIOR	–	–	–	–	ACME	PUD	PSR2	PSR10
0x2F (0x4F)	TCCR1A	COM1A1	COM1A0	COM1B1	COM1B0	FOC1A	FOC1B	WGM11	WGM10
0x2E (0x4E)	TCCR1B	ICNC1	ICES1	–	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10
0x2D (0x4D)	TCNT1H	Timer/Counter1 – Counter Register High byte							
0x2C (0x4C)	TCNT1L	Timer/Counter1 – Counter Register Low byte							

Ports haben eine feste Adresse (in dem oben gezeigten Ausschnitt z. B. 0x3F für den Port SREG, 0x steht dabei für hexadezimal!), über die sie angesprochen werden können. Die Adresse gilt teilweise unabhängig vom AVR-Typ, teilweise aber auch nicht. So befindet sich das Statusregister SREG immer an der Adresse 0x3F, der Ausgabeport der Parallelschnittstelle B immer an der Portadresse 0x18.

Ports nehmen oft ganze Zahlen auf (z. B. TCCR0 im Ausschnitt oben), sie können aber auch aus einer Reihe einzelner Steuerbits bestehen. Diese einzelnen Bits haben dann eigene Namen, so dass sie mit Befehlen zur Bitmanipulation angesteuert werden können. In der Portliste hat auch jedes Bit in dem jeweiligen Port seinen speziellen symbolischen Namen, z. B. hat das Bit 7 im Port "GICR" den symbolischen Namen "INT1".

Port-Symbole, Include

Diese Adressen und Bit-Nummern muss man sich aber nicht merken. In den Include-Dateien zu den einzelnen AVR-Typen, die der Hersteller zur Verfügung stellt, sind die jeweiligen verfügbaren Ports und ihre Bits mit wohlklingenden Namen belegt. So ist in den Include-Dateien die Assemblerdirektive

.EQU PORTB, 0x18

angegeben und wir müssen uns fürderhin nur noch merken, dass der Port B PORTB heißt. Fü das Bit INT1 im Port GICR ist in der Include-Datei definiert:

.EQU INT1, 7

Die Include-Datei des AVR ATmega8515 heißt "m8515def.inc" und kommt mit folgender Direktive in die Quellcode-Datei:

.INCLUDE "m8515def.inc"

oder, wenn man nicht mit dem Studio arbeitet,

.INCLUDE "C:\PfadNachIrgendwo\m8515def.inc

und alle für diesen Typ bekannten Portregister und Steuerbits sind jetzt mit ihren symbolischen Alias-Namen leichter ansprechbar.

Ports setzen

In Ports kann und muss man Werte schreiben, um die betreffende Hardware zur Mitarbeit zu bewegen. So enthält z.B. das MCU General Control Register, genannt MCUCR, eine Reihe von Steuerbits, die das generelle Verhalten des Chips beeinflussen (siehe im Ausschnitt oben bzw. die Beschreibung des MCUCR im Detail). MCUCR ist ein mit Einzelbits vollgepackter Port, in dem jedes Bit noch mal einen eigenen Namen hat (ISC00, ISC01, ...). Wer den Port benötigt, um den AVR in den Tiefschlaf zu versetzen, muss sich im Typenblatt die Wirkung dieser Sleep-Bits heraussuchen und durch eine Folge von Instruktionen die entsprechende einschläfernde Wirkung programmieren, für den ATmega8 also z.B. so: ...

```
.DEF MeinLieblingsregister = R16
    LDI MeinLieblingsregister, 0b10000000
    OUT MCUCR, MeinLieblingsregister
    SLEEP
```

Die Out-Instruktion bringt den Inhalt meines Lieblingsregisters, nämlich ein gesetztes Sleep-Enable-Bit SE, zum Port MCUCR und versetzt den AVR gleich und sofort in den Schlaf, wenn er im ausgeführten Code auf eine SLEEP-Instruktion trifft. Da gleichzeitig alle anderen Bits mitgesetzt werden und mit Sleep-Mode SM=0 als Modus der Halbschlaf eingestellt wurde, geht der Chip nicht völlig auf Tauchstation. In diesem Zustand wird die Befehlsausführung eingestellt, die Timer und andere Quellen von Interrupts bleiben aber aktiv und können den Halbschlaf jederzeit unterbrechen, wenn sich was Wichtiges tut.

Ports transparenter setzen

Weil "LDI MeinLieblingsregister, 0b10000000" eine ziemlich intransparente Angelegenheit ist, weil zum Verständnis dafür, was eigentlich hier gemacht wird, ein Blick in die Portbits im Datenblatt nötig ist, schreibt man dies besser so:

```
    LDI MeinLieblingsRegister, 1<<SE
```

"1<<SE" nimmt eine binäre Eins (= 0b00000001) und schiebt diese SE mal links (<<). SE ist im Falle des ATmega8 als 7 definiert, also die 1 sieben mal links schieben. Das Ergebnis (= 0b10000000) ist gleichbe-

deutend mit dem oben eingefügten Bitmuster und setzt das Bit SE im Port MCUCR auf Eins.

Wenn wir gleichzeitig auch noch das Bit SM0 auf 1 setzen wollen (was einen der acht möglichen Tiefschlafmodi einschaltet, dann wird das so formuliert:

LDI MeinLieblingsRegister, (1<<SE) | (1<<SM0)

Der vertikale Strich zwischen beiden Teilergebnissen ist ein binäres ODER, d. h. dass alle auf Eins gesetzten Bits in einem der beiden Teilausdrücke in Klammern Eins werden, also sowohl das Bit SE (= 7) als auch das Bit SM0 (= 4) gesetzt sind, woraus sich 0b10010000 ergibt.

Noch mal zum Merken: die Linksschieberei wird nicht im Prozessor vollzogen, nur beim Assemblieren. Die Instruktion LDI wird auch nicht anders übersetzt, wenn wir die Schieberei verwenden, und ist auch im Prozessor nur eine einzige Instruktion. Von den Symbolen SE und SM0 hat der Prozessor selbst sowieso keine Ahnung, das ist alles nur für den Quellcode-Schreiber von Bedeutung.

Die Linksschieberei hat den immensen Vorteil, dass nun für jeden aufgeklärten Menschen sofort erkennbar ist, dass hier die Bits SE und SM0 manipuliert werden. Nicht dass jeder sofort wüsste, dass damit der Schlafmodus eingestellt wird, aber es liegt wenigstens in der Assoziation näher als 0b10010000.

Noch ein Vorteil: das SE-Bit liegt bei anderen Prozessoren woanders im Port MCUCR als in Bit 7, z. B. im AT90S8515 lag es in Bit 5. SM0 ist bei diesem Typ gar nicht bekannt, bei einer Portierung unseres Quellcodes für den ATmega8 auf diesen Typ kriegen wir dann eine Fehlermeldung (SM0 ist dort nicht definiert) und wir wissen dann sofort, wo wir suchen und nacharbeiten müssen.

Ports lesen

Umgekehrt lassen sich die Portinhalte mit dem IN-Befehl in beliebige Register einlesen und dort weiterverarbeiten. So lädt

.DEF MeinLieblingsregister = R16

IN MeinLieblingsregister, MCUCR

den lesbaren Teil des Ports MCUCR in das Register R16. Den lesbaren Teil deswegen, weil es bei vielen Ports auch nicht belegte Bits gibt, die dann immer als Null eingelesen werden.

Oft will man nur bestimmte Portbits setzen und die Porteinstellung ansonsten so lassen. Das geht mit Lesen-Ändern-Schreiben (Read-Modify-Write) z. B. So:

IN MeinLieblingsregister, MCUCR

SBR MeinLieblingsRegister, (1<<SE) | (1<<SM0)

OUT MCUCR,MeinLieblingsRegister

Braucht aber halt drei Instruktionen.

Auf Portbits reagieren

Noch öfter als ganze Ports einlesen muss man auf Änderungen bestimmter Bits der Ports prüfen. Dazu muss nicht der ganze Port gelesen und verarbeitet werden. Es gibt hierfür spezielle Sprungbefehle, die aber im Kapitel Springen vorgestellt werden. Umgekehrt kommt es oft vor, dass ein bestimmtes Portbit gesetzt oder rückgesetzt werden muss. Auch dazu braucht man nicht den ganzen Port lesen und nach der Änderung im Register dann den neuen Wert wieder zurückschreiben. Die beiden Instruktionen heissen SBI (Set Bit I/O-Register) und CBI (Clear Bit I/O-Register). Ihre Anwendung geht z.B. so:

.EQU Aktivbit=0 ; Das zu manipulierende Bit des Ports

SBI PortB, Aktivbit ; Das Bit wird Eins

CBI PortB, Aktivbit ; Das Bit wird Null

Die beiden Instruktionen haben einen gravierenden Nachteil: sie lassen sich nur auf Ports bis zur Adresse 0x1F anwenden, für Ports darüber sind sie leider unzulässig. Für Ports oberhalb des mit IN und OUT (bis 0x3F) beschreibbaren Adressraums geht das natürlich schon gar nicht.

Porteinblendung im Speicherraum

Für den Zugang zu den Ports, die im nicht direkt zugänglichen Adressraum liegen (z. B. bei einigen großen ATmega und ATxmega) und für den Exotenprogrammierer gibt es wie bei den Registern auch hier die Möglichkeit, die Ports wie ein SRAM zu lesen und zu schreiben, also mit dem LD- bzw. der ST-Instruktion. Da die ersten 32 Adressen im SRAM-Speicherraum schon mit den Registern belegt sind, werden die Ports mit ihrer um 32 erhöhten Adresse angesprochen, wie z.B. bei

.DEF MeinLieblingsregister = R16

LDI ZH,HIGH(PORTB+32)

LDI ZL,LOW(PORTB+32)

LD MeinLieblingsregister,Z

Das macht nur im Ausnahmefall einen Sinn, geht aber halt auch. Es ist der Grund dafür, warum das SRAM erst ab Adresse 0x60 beginnt (0x20 für die Register, 0x40 für die Ports reserviert), bei großen ATmega erst bei 0x100.

5.2 Details wichtiger Ports in den AVR

Die folgende Tabelle kann als Nachschlagewerk für die wichtigsten gebräuchlichsten Ports im AT90S8515 dienen. Sie enthält nicht alle möglichen Ports. Insbesondere die Ports der MEGA-Typen und der AT90S4434/8535 sind der Übersichtlichkeit halber nicht darin enthalten! Bei Zweifeln immer die Originaldokumentation befragen!

Gerät	*Kurz*	*Port*	*Name*
Akkumulator	SREG	Status Register	SREG
Stack	SPL/SPH	Stackpointer	SPL/SPH
Ext.SRAM/Ext.Interrupt	MCUCR	MCU General Control Register	MCUCR
Ext.Int.	INT	Interrupt Mask Register	GIMSK
		Flag Register	GIFR
Timer Interrupts	Timer Int.	Timer Int Mask Register	TIMSK
		Timer Interrupt Flag Register	TIFR
Timer 0	Timer 0	Timer/Counter 0 Control Register	TCCR0
		Timer/Counter 0	TCNT0
Timer 1	Timer 1	Timer/Counter Control Register 1 A	TCCR1A
		Timer/Counter Control Register 1 B	TCCR1B
		Timer/Counter 1	TCNT1
		Output Compare Register 1 A	OCR1A
		Output Compare Register 1 B	OCR1B

Gerät	Kurz	Port	Name
		Input Capture Register	ICR1L/H
Watchdog Timer	WDT	Watchdog Timer Control Register	WDTCR
EEPROM	EEPROM	EEPROM Adress Register	EEAR
		EEPROM Data Register	EEDR
		EEPROM Control Register	EECR
SPI	SPI	Serial Peripheral Control Register	SPCR
		Serial Peripheral Status Register	SPSR
		Serial Peripheral Data Register	SPDR
UART	UART	UART Data Register	UDR
		UART Status Register	USR
		UART Control Register	UCR
		UART Baud Rate Register	UBRR
Analog Comparator	ANALOG	Analog Comparator Control and Status Register	ACSR
I/O-Ports	IO-Ports	Portpin-Ausgabe/-Richtung/-Eingabe	PORTA/ DDRA/ PINA, ...

5.3 Das Statusregister als wichtigster Port

Der am häufigste verwendete Port für den Assemblerprogrammierer ist das Statusregister mit den darin enthaltenen acht Bits. In der Regel wird auf diese Bits vom Programm aus nur lesend/auswertend zugegriffen, selten werden Bits explizit gesetzt (mit dem Assembler-Befehl SEx) oder zurückgesetzt (mit dem Befehl CLx). Die meisten Statusbits werden von Bit-Test, Vergleichs- und Rechenoperationen gesetzt oder rückgesetzt und anschliessend für Entscheidungen und Verzweigungen im Programm verwendet. Die folgende Tabelle enthält eine Liste der Assembler-Instruktionen, die die jeweiligen Status-Bits beeinflussen.

Bit	Rechnen	Logik	Vergleich	Bits	Schieben	Sonstige
Z	ADD, ADC, ADIW, DEC, INC, SUB, SUBI, SBC, SBCI, SBIW	AND, ANDI, OR, ORI, EOR, COM, NEG, SBR, CBR	CP, CPC, CPI	BCLR Z, BSET Z, CLZ, SEZ, TST	ASR, LSL, LSR, ROL, ROR	CLR
C	ADD, ADC, ADIW, SUB, SUBI, SBC, SBCI, SBIW	COM, NEG	CP, CPC, CPI	BCLR C, BSET C, CLC, SEC	ASR, LSL, LSR, ROL, ROR	-
N	ADD, ADC, ADIW, DEC, INC, SUB, SUBI, SBC, SBCI, SBIW	AND, ANDI, OR, ORI, EOR, COM, NEG, SBR, CBR	CP, CPC, CPI	BCLR N, BSET N, CLN, SEN, TST	ASR, LSL, LSR, ROL, ROR	CLR
V	ADD, ADC, ADIW, DEC, INC, SUB, SUBI, SBC, SBCI, SBIW	AND, ANDI, OR, ORI, EOR, COM, NEG, SBR, CBR	CP, CPC, CPI	BCLR V, BSET V, CLV, SEV, TST	ASR, LSL, LSR, ROL, ROR	CLR

Bit	***Rechnen***	***Logik***	***Vergleich***	***Bits***	***Schieben***	***Sonsti-ge***
S	SBIW	-	-	BCLR S, BSET S, CLS, SES	-	-
H	ADD, ADC, SUB, SUBI, SBC, SBCI	NEG	CP, CPC, CPI	BCLR H, BSET H, CLH, SEH	-	-
T	-	-	-	BCLR T, BSET T, BST, CLT, SET	-	-
I	-	-	-	BCLR I, BSET I, CLI, SEI	-	RETI

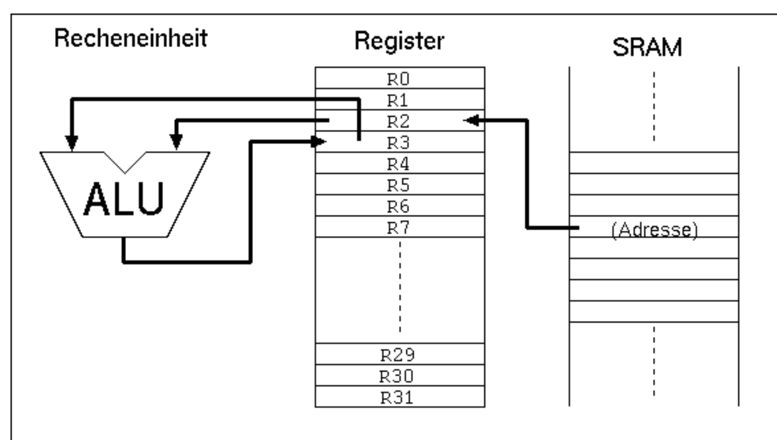
6 SRAM

6.1 Verwendung von SRAM in AVR Assembler

Alle AT90S-AVR-Typen verfügen in gewissem Umfang über Statisches RAM (SRAM) an Bord. Bei sehr einfachen Assemblerprogrammen kann man es sich im allgemeinen leisten, auf die Verwendung dieser Hardware zu verzichten und alles in Registern unterzubringen. Wenn es aber eng wird im Registerbereich, dann sollte man die folgenden Kenntnisse haben, um einen Ausweg aus der Speicherenge zu nehmen.

6.2 Was ist SRAM?

SRAM sind Speicherstellen, die im Gegensatz zu Registern nicht direkt in die Recheneinheit (Arithmetic and Logical Unit ALU, manchmal aus historischen Gründen auch Akkumulator genannt) geladen und verarbeitet werden können. Ihre Verwendung ist daher auf den Umweg über ein Register angewiesen. Im dargestellten Beispiel wird ein Wert von der Adresse im SRAM in das Register R2 geholt (1.Instruktion), irgendwie mit dem Inhalt von Register R3 verknüpft und das Ergebnis in Register R3 gespeichert (Instruktion 2). Im letzten Schritt kann der geänderte Wert auch wieder in das SRAM geschrieben werden (3.Instruktion).



Es ist daher klar, dass SRAM-Daten langsamer zu verarbeiten sind als Daten in Registern. Dafür besitzt schon der zweitkleinste AVR immerhin 128 Bytes an SRAM-Speicher. Da passt schon einiges mehr rein als in 32 popelige Register.

Die größeren AVR ab AT90S8515 aufwärts bieten neben den eingebauten 512 Bytes zusätzlich die Möglichkeit, noch externes SRAM anzuschließen. Die Ansteuerung in Assembler erfolgt dabei in identischer Weise wie internes RAM. Allerdings belegt das externe SRAM eine Vielzahl von Portpins für Adress- und Datenleitungen und hebt den Vorteil der internen Bus-Gestaltung bei den AVR wieder auf.

6.3 Wozu kann man SRAM verwenden?

SRAM bietet über das reine Speichern von Bytes an festen Speicherplätzen noch ein wenig mehr. Der Zugriff kann nicht nur mit festen Adressen, sondern auch mit Zeigervariablen erfolgen, so dass eine fließende Adressierung der Zellen möglich ist. So können z.B. Ringpuffer zur Zwischenspeicherung oder berechnete Tabellen verwendet werden. Das geht mit Registern nicht, weil die immer eine fest angegebene Adresse benötigen.

Noch relativer ist die Speicherung über einen Offset. Dabei steht die Adresse in einem Pointerregister, es wird aber noch ein konstanter Wert zu dieser Adresse addiert und dann erst gespeichert oder gelesen. Damit lassen sich Tabellen noch raffinierter verwenden.

Die wichtigste Anwendung für SRAM ist aber der sogenannte Stack oder Stapel, auf dem man Werte zeitweise ablegen kann, seien es Rücksprungadressen beim Aufruf von Unterprogrammen, bei der Unterbrechung des Programmablaufes mittels Interrupt oder irgendwelche Zwischenwerte, die man später wieder braucht und für die ein extra Register zu schade ist.

6.4 Wie verwendet man SRAM?

Schreiben und Lesen von Speicherzellen

Um einen Wert in eine Speicherstelle im SRAM abzulegen, muss man seine Adresse festlegen. Das verwendbare SRAM reicht von Adresse 0x0060 bis zum jeweiligen Ende des SRAM-Speichers (beim AT90S8515 ist das ohne externes SRAM z.B. 0x025F). Mit der Instruktion

STS 0x0060, R1

wird der Inhalt des Registers R1 in die Speicherzelle im SRAM kopiert. Mit

LDS R1, 0x0060

wird vom SRAM in das Register kopiert. Das ist der direkte Weg mit einer festen Adresse, die vom Programmierer festgelegt wird.

Um das Hantieren mit festen Adressen und deren möglicherweisen späteren Veränderung bei fortgeschrittener Programmierkunst sowie das Merken der Adresse zu erleichtern empfiehlt der erfahrene Programmierer wieder die Namensvergabe, wie im folgenden Beispiel:

```
.EQU MeineLieblingsSpeicherzelle = 0x0060
	STS MeineLieblingsSpeicherzelle, R1
```

Aber auch das ist noch nicht allgemein genug. Mit

```
.EQU MeineLieblingsSpeicherzelle = SRAM_START
.EQU MeineZweiteLieblingsSpeicherzelle = SRAM_START
```

ist die in der Include-Datei eingetragene Adresse der SRAM-Speicherzellen noch allgemeingültiger angegeben.

Zugegeben, kürzer ist das alles nicht, aber viel leichter zu merken.

Organisation als Datensegment

Bei etwas komplexeren Datenstrukturen empfiehlt sich das Anlegen in einem Datensegment. Eine solche Struktur sieht dann z. B. so aus:

```
.DSEG ; das ist der Beginn des Datensegments, die folgenden Einträge organisieren SRAM
.ORG SRAM_START ; an den Beginn des SRAM legen.
;
EinByte: ; ein Label als Symbol für die Adresse einer Speicherzelle
.BYTE 1 ; ein Byte dafuer reservieren
;
ZweiBytes: ; ein Label als Symbol für die Adresse zweier aufeinander folgender Speicherzellen
.BYTE 2 ; zwei Bytes reservieren
;
.EQU Pufferlaenge = 32 ; definiert die Laenge eines Datenpuffers
Buffer_Start: ; ein Label fuer den Anfang des Datenpuffers
.BYTE Pufferlaenge ; die folgenden 32 Speicherzellen als Datenpuffer reservieren
Buffer_End: ; ein Label fuer das Ende des Datenpuffers
;
.CSEG ; Ende des Datensegments, Beginn des Programmsegments
```

Das Datensegment enthält also ausschließlich Labels, über die die entsprechenden reservierten Speicher-

zellen später adressiert werden können, und .BYTE-Direktiven, die die Anzahl der zu reservierenden Zellen angeben. Ziel der ganzen Angelegenheit ist das Anlegen einer flexibel änderbaren Struktur für den Zugriff über Adresssymbole. Inhalte für diese Speicherzellen werden dabei nicht erzeugt, es gibt auch keine Möglichkeit, den Inhalt von SRAM-Speicherzellen beim Brennen des Chips zu manipulieren.

Zugriffe auf das SRAM über Pointer

Eine weitere Adressierungsart für SRAM-Zugriffe ist die Verwendung von Pointern, auch Zeiger genannt. Dazu braucht es zwei Register, die die 16-Bit-Adresse enthalten. Wie bereits in der Pointer-Register-Abteilung erläutert sind das die Registerpaare X mit XL/XH (R26, R27), Y mit YL/YH (R28, R29) und Z mit ZL und ZH (R30, R31). Sie erlauben den Zugriff auf die jeweils adressierte Speicherzelle direkt (z.B. ST X, R1), nach vorherigem Vermindern der Adresse um Eins (z.B. ST -X,R1) oder mit anschließendem Erhöhen um Eins (z.B. ST X+, R1). Ein vollständiger Zugriff auf drei Zellen sieht also etwa so aus:

```
.EQU MeineLieblingsZelle = 0x0060
.DEF MeinLieblingsRegister = R1
.DEF NochEinRegister = R2
.DEF UndNochEinRegister = R3
        LDI XH, HIGH(MeineLieblingszelle)
        LDI XL, LOW(MeineLieblingszelle)
        LD MeinLieblingsregister, X+
        LD NochEinRegister, X+
        LD UndNochEinRegister, X
```

Sehr einfach zu bedienen, diese Pointer. Und nach meinem Dafürhalten genauso einfach (oder schwer) zu verstehen wie die Konstruktion mit dem Dach in gewissen Hochsprachen.

Indizierte Zugriffe über Pointer

Die dritte Konstruktion ist etwas exotischer und nur erfahrene Programmierer greifen in ihrer unermesslichen Not danach. Nehmen wir mal an, wir müssen sehr oft und an verschiedenen Stellen eines Programmes auf die drei Positionen im SRAM zugreifen, weil dort irgendwelche wertvollen Informationen stehen. Nehmen wir ferner an, wir hätten gerade eines der Pointer-Register so frei, dass wir es dauerhaft für diesen Zweck opfern könnten. Dann bleibt bei dem Zugriff nach ST/LD-Muster immer noch das Problem, dass wir das Pointer-Register immer anpassen und nach dem Zugriff wieder in einen definierten Zustand versetzen müssten. Das ist eklig.

Zur Vermeidung (und zur Verwirrung von Anfängern) hat man sich den Zugriff mit Offset einfallen lassen (deutsch etwa: Ablage). Bei diesem Zugriff wird das eigentliche Zeiger-Register nicht verändert, der Zugriff erfolgt mit temporärer Addition eines festen Wertes. Im obigen Beispiel würde also folgende Konstruktion beim Zugriff auf die Speicherzelle 0x0062 erfolgen. Zuerst wäre irgendwann das Pointer-Register zu setzen:

```
.EQU MeineLieblingsZelle = 0x0060
.DEF MeinLieblingsRegister = R1
        LDI YH, HIGH(MeineLieblingszelle)
        LDI YL, LOW(MeineLieblingszelle)
```

Irgendwo später im Programm will ich dann auf Zelle 0x0062 zugreifen:

```
        STD Y+2, MeinLieblingsRegister
```

Obacht! Die „plus zwei“ werden nur für den Zugriff addiert, der Registerinhalt von Y wird dabei nicht verän-

dert. Zur weiteren Verwirrung des Publikums geht diese Konstruktion nur mit dem Y- und dem Z-Pointer, nicht aber mit dem X-Pointer!

Die korrespondierende Instruktion für das indizierte Lesen eines SRAM-Bytes

LDD MeinLieblingsRegister, Y+2

ist ebenfalls vorhanden.

Das war es schon mit dem SRAM, wenn da nicht der Stack noch wäre.

6.5 Verwendung von SRAM als Stack

Die häufigste und bequemste Art der Nutzung des SRAM ist der Stapel, englisch *stack* genannt. Der Stapel ist ein Türmchen aus Holzklötzen. Jedes neu aufgelegte Klötzchen kommt auf den schon vorhandenen Stapel obenauf, jede Entnahme vom Turm kann immer nur auf das jeweils oberste Klötzchen zugreifen, weil sonst der ganze schöne Stapel hin wäre. Das kluge Wort für diese Struktur ist *Last-In-First-Out (LIFO)* oder schlichter: *die Letzten werden die Ersten sein*.

Zur Verwirrung des Publikums wächst der Stapel bei fast allen Mikroprozessoren aber nicht von der niedrigsten zu höheren Adressen hin, sondern genau umgekehrt. Wir könnten sonst am Anfang des SRAMs unsere schönen Datenstrukturen nicht anlegen.

Einrichten des Stapels

Um vorhandenes SRAM für die Anwendung als Stapel herzurichten ist zu allererst der Stapelzeiger einzurichten. Der Stapelzeiger ist ein 16-Bit-Zeiger, der als Port ansprechbar ist. Das Doppelregister heißt SPH:SPL. SPH nimmt das obere Byte der Adresse, SPL das niederwertige Byte auf. Das gilt aber nur dann, wenn der Chip über mehr als 256 Byte SRAM verfügt. Andernfalls fehlt SPH und kann/muss nicht verwendet werden. Wir tun im nächsten Beispiel so, als ob wir mehr als 256 Bytes SRAM haben.

Zum Einrichten des Stapels wird der Stapelzeiger mit der höchsten verfügbaren SRAM-Adresse bestückt.

```
.DEF MeinLieblingsRegister = R16
    LDI MeinLieblingsRegister, HIGH(RAMEND) ; Oberes Byte
    OUT SPH,MeinLieblingsRegister ; an Stapelzeiger
    LDI MeinLieblingsRegister, LOW(RAMEND) ; Unteres Byte
    OUT SPL,MeinLieblingsRegister ; an Stapelzeiger
```

Die Größe RAMEND ist natürlich prozessorspezifisch und steht in der Include-Datei für den Prozessor. So steht z.B. in der Datei 8515def.inc die Zeile

.equ RAMEND =$25F ;Last On-Chip SRAM Location

Die Datei 8515def.inc kommt wieder mit der Assembler-Direktive

.INCLUDE "8515def.inc"

irgendwo am Anfang des Assemblerprogrammes hinzu.

Damit ist der Stapelzeiger eingerichtet und wir brauchen uns im weiteren nicht mehr weiter um diesen Zeiger kümmern, weil er ziemlich automatisch manipuliert wird.

Verwendung des Stapels

Die Verwendung des Stapels ist unproblematisch. So lassen sich Werte von Registern auf den Stapel legen:

PUSH MeinLieblingsregister ; Ablegen des Wertes

Wo der Registerinhalt abgelegt wird, interessiert uns nicht weiter. Dass dabei der Zeiger automatisch erniedrigt wird, interessiert uns auch nicht weiter. Wenn wir den abgelegten Wert wieder brauchen, geht das einfach mit:

POP MeinLieblingsregister ; Rücklesen des Wertes

Mit POP kriegen wir natürlich immer nur den Wert, der als letztes mit PUSH auf den Stapel abgelegt wurde. Wichtig: Selbst wenn der Wert vielleicht gar nicht mehr benötigt wird, muss er mit Pop wieder vom Stapel! Das Ablegen des Registers auf den Stapel lohnt also programm-technisch immer nur dann, wenn

- der Wert in Kürze, d.h. ein paar Instruktionen weiter im Ablauf, wieder gebraucht wird,
- alle Register in Benutzung sind und,
- keine Möglichkeit zur Zwischenspeicherung woanders besteht.

Wenn diese Bedingungen nicht vorliegen, dann ist die Verwendung des Stapels ziemlich nutzlos und verschwendet bloß Zeit.

Stapel zum Ablegen von Rücksprungadressen

Noch wertvoller ist der Stapel bei Sprüngen in Unterprogramme, nach deren Abarbeitung wieder exakt an die aufrufende Stelle im Programm zurück gesprungen werden soll. Dann wird beim Aufruf des Unterprogrammes die Rücksprungadresse auf den Stapel abgelegt, nach Beendigung wieder vom Stapel geholt und in den Programmzähler bugsiert. Dazu dient die Konstruktion mit der Instruktion

RCALL irgendwas ; Springe in das UP irgendwas
[...] hier geht es normal weiter im Programm

Hier landet der Sprung zum Label irgendwas irgendwo im Programm,

irgendwas: ; das hier ist das Sprungziel
[...] Hier wird zwischendurch irgendwas getan
[...] und jetzt kommt der Rücksprung an den Aufrufort im Programm:
RET

Beim RCALL wird der Programmzähler, eine 16-Bit-Adresse, auf dem Stapel abgelegt. Das sind zwei mal PUSH, dann sind die 16 Bits auf dem Stapel. Beim Erreichen der Instruktion RET wird der Programmzähler mit zwei POPs wieder hergestellt und die Ausführung des Programmes geht an der Stelle weiter, die auf den RCALL folgt.

Damit braucht man sich weiter um die Adresse keine Sorgen zu machen, an der der Programmzähler abgelegt wurde, weil der Stapel automatisch manipuliert wird. Selbst das vielfache Verschachteln solcher Aufrufe ist möglich, weil jedes Unterprogramm, das von einem Unterprogramm aufgerufen wurde, zuoberst auf dem Stapel die richtige Rücksprungadresse findet.

Unverzichtbar ist der Stapel bei der Verwendung von Interrupts. Das sind Unterbrechungen des Programmes aufgrund von äußeren Ereignissen, z.B. Signale von der Hardware. Damit nach Bearbeitung dieser äußeren "Störung" der Programmablauf wieder an der Stelle vor der Unterbrechung fortgesetzt werden kann, muss die Rücksprungadresse bei der Unterbrechung auf den Stapel. Interrupts ohne Stapel sind also schlicht nicht möglich.

Fehlermöglichkeiten beim (Hoch-)Stapeln

Für den Anfang gibt es reichlich Möglichkeiten, mit dem Stapeln üble Bugs zu produzieren.

Sehr beliebt ist die Verwendung des Stapels ohne vorheriges Setzen des Stapelzeigers. Da der Zeiger zu Beginn bei Null steht, klappt aber auch rein gar nix, wenn man den ersten Schritt vergisst.

Beliebt ist auch, irgendwelche Werte auf dem Stapel liegen zu lassen, weil die Anzahl der POPs nicht exakt der Anzahl der PUSHs entspricht. Das ist aber schon seltener. Es kommt vorzugsweise dann vor, wenn zwischendurch ein bedingter Sprung nach woanders vollführt wurde und dort beim Programmieren vergessen wird, dass der Stapel noch was in Petto hat.

Noch seltener ist ein Überlaufen des Stapels, wenn zuviele Werte abgelegt werden und der Stapelzeiger sich bedrohlich auf andere, am Anfang des SRAM abgelegten Werte zubewegt oder noch niedriger wird und in den Bereich der Ports und der Register gerät. Das hat ein lustiges Verhalten des Chips, auch äußerlich, zur Folge. Kommt aber meistens fast nie vor, nur bei vollstopftem SRAM.

7 Steuerung des Programmablaufes in AVR Assembler

Hier werden alle Vorgänge erläutert, die mit dem Programmablauf zu tun haben und diesen beeinflussen, also die Vorgänge beim Starten des Prozessors, Sprünge und Verzweigungen, Unterbrechungen, etc.

7.1 Was passiert beim Reset?

Beim Anlegen der Betriebsspannung, also beim Start des Prozessors, wird über die Hardware des Prozessors ein sogenannter Reset ausgelöst. Dabei wird der Zähler für die Programmschritte auf Null gesetzt. An dieser Stelle des Programmes wird die Verarbeitung also immer begonnen. Ab hier muss der Programm-Code stehen, der ausgeführt werden soll. Aber nicht nur beim Start wird der Zähler auf diese Adresse zurückgesetzt, sondern auch bei

- externem Rücksetzen am Eingangs-Pin Reset durch die Hardware,
- Ablauf der Wachhund-Zeit (Watchdog-Reset), einer internen Überwachungsuhr,
- direkten Sprüngen an die Adresse Null (Sprünge siehe unten).

Die dritte Möglichkeit ist aber gar kein richtiger Reset, denn das beim Reset automatisch ablaufende Rücksetzen von Register- und Port-Werten auf den jeweils definierten Standardwert (Default) wird hierbei nicht durchgeführt. Vergessen wir also besser die 3.Möglichkeit, sie ist unzuverlässig.

Die zweite Möglichkeit, nämlich der eingebaute Wachhund, muss erst explizit von der Leine gelassen werden, durch Setzen seiner entsprechenden Port-Bits. Wenn er dann nicht gelegentlich mit Hilfe der Instruktion

WDR ; Watchdog Reset

zurückgepfiffen wird, dann geht er davon aus, dass Herrchen AVR eingeschlafen ist und weckt ihn mit einem brutalen Reset.

Ab dem Reset wird also der an Adresse 0x000000 stehende Code wortweise in die Ausführungsmimik des Prozessors geladen und ausgeführt. Während der Ausführung wird die Adresse um 1 erhöht und schon mal die nächste Instruktion aus dem Programmspeicher geholt (Fetch during Execution). Wenn die erste Instruktion keine Verzweigung des Programmes auslöst, kann die zweite Instruktion also direkt nach dem ersten ausgeführt werden. Jeder Taktzyklus am Takteingang des Prozessors entspricht daher einem ausgeführten Instruktion (wenn nichts dazwischenkommt).

Die erste Instruktion des ausführbaren Programmes muss immer bei Adresse 0000 stehen. Um dem Assembler mitzuteilen, dass er nach irgendwelchen Vorwörtern wie Definitionen oder Konstanten nun bitte mit der ersten Zeile Programmcode beginnen möge, gibt es folgende Direktiven:

.CSEG
.ORG 0000

Die erste Direktive teilt dem Assembler mit, dass ab jetzt in das Code-Segment zu assemblieren ist. Ein anderes Segment wäre z.B. das EEPROM, das ebenfalls im Assembler-Quelltext auf bestimmte Werte eingestellt werden könnte. Die entsprechende Assembler-Direktive hierfür würde dann natürlich lauten:

.ESEG

Die zweite Assembler-Direktive oben stellt den Programmzähler beim Assemblieren auf die Adresse 0000 ein. ORG ist die Abkürzung für Origin, also Ursprung. Wir könnten auch bei 0100 mit dem Programm beginnen, aber das wäre ziemlich sinnlos (siehe oben). Da die beiden Angaben CSEG und ORG trivial sind, können sie auch weggelassen werden und der Assembler macht das dann automatisch so. Wer aber den Beginn des Codes nach zwei Seiten Konstantendefinitionen eindeutig markieren will, kann das mit den beiden

Direktiven tun.

Auf das erste ominöse erste Wort Programmcode folgen fast ebenso wichtige Spezialinstruktionen, die Interrupt-Vektoren. Dies sind festgelegte Stellen mit bestimmten Adressen. Diese Adressen werden bei Auslösung eines Interrupts durch die Hardware angesprungen, wobei der normale Programmablauf unterbrochen wird. Diese Vektoren sind spezifisch für jeden Prozessortyp (siehe unten bei der Erläuterung der Interrupts). Die Instruktionen, mit denen auf eine Unterbrechung reagiert werden soll, müssen an dieser Stelle stehen. Werden also Interrupts verwendet, dann kann die erste Instruktion nur ein Sprungbefehl sein, damit diese ominösen Vektoren übersprungen werden. Der typische Programmablauf nach dem Reset sieht also so aus:

```
.CSEG
.ORG 0000
	RJMP Start
	[...] hier kommen dann die Interrupt-Vektoren
	[...] und danach nach Belieben noch alles mögliche andere Zeug
Start: ; Das hier ist der Programmbeginn
	[...] Hier geht das Hauptprogramm dann erst richtig los.
```

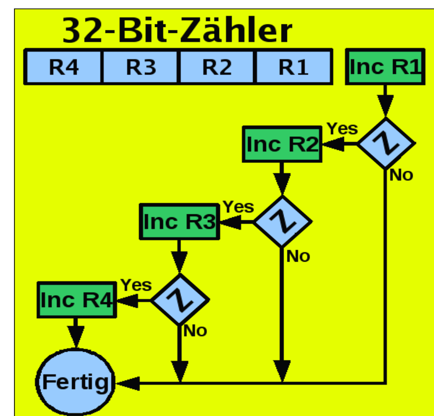
Die Instruktion RJMP bewirkt einen Sprung an die Stelle im Programm mit der Kennzeichnung Start:, auch ein Label genannt. Die Stelle Start: folgt weiter unten im Programm und ist dem Assembler hiermit entsprechend mitgeteilt: Labels beginnen immer in Spalte 1 einer Zeile und enden mit einem Doppelpunkt. Labels, die diese beiden Bedingungen nicht einhalten, werden vom Assembler nicht ernstgenommen. Fehlende Labels aber lassen den Assembler sinnierend innehalten und mit einer "Undefined label"-Fehlermeldung die weitere Zusammenarbeit einstellen.

7.2 Linearer Programmablauf und Verzweigungen

Nachdem die ersten Schritte im Programm gemacht sind, noch etwas triviales: Programme laufen linear ab. Das heißt: Instruktion für Instruktion wird nacheinander aus dem Programmspeicher geholt und abgearbeitet. Dabei zählt der Programmzähler immer eins hoch. Ausnahmen von dieser Regel werden nur vom Programmierer durch gewollte Verzweigungen oder mittels Interrupt herbeigeführt. Da sind Prozessoren ganz stur immer geradeaus, es sei denn, sie werden gezwungen.

Und zwingen geht am einfachsten folgendermaßen. Oft kommt es vor, dass in Abhängigkeit von bestimmten Bedingungen gesprungen werden soll. Dann benötigen wir bedingte Verzweigungen. Nehmen wir an, wir wollen einen 32-Bit-Zähler mit den Registern R1, R2, R3 und R4 realisieren. Dann muss das niederwertigste Byte in R1 um Eins erhöht werden. Wenn es dabei überläuft, muss auch R2 um Eins erhöht werden usw. bis R4.

Die Erhöhung um Eins wird mit der Instruktion INC erledigt. Wenn dabei ein Überlauf auftritt, also 255 zu 0 wird, dann ist das im Anschluss an die Durchführung am gesetzten Z-Bit im Statusregister zu bemerken. Das eigentliche Übertragsbit C des Statusregisters wird bei der INC-Instruktion übrigens nicht verändert, weil es woanders dringender gebraucht wird und das Z-Bit völlig ausreicht. Wenn der Übertrag nicht auftritt, also das Z-Bit nicht gesetzt ist, können wir die Erhöherei beenden. Wenn aber das Z-Bit gesetzt ist, darf die Erhöherei beim nächsten Register weitergehen. Wir müssen also springen, wenn das Z-Bit nicht gesetzt ist. Die entsprechende Sprunginstruktion heißt aber nicht BRNZ (BRanch on Not Zero), sondern BRNE (BRanch if Not Equal). Na ja, Geschmackssache. Das ganze Räderwerk des 32-Bit langen Zählers sieht damit so aus:




```
	INC R1
```

```
        BRNE Weiter
        INC R2
        BRNE Weiter
        INC R3
        BRNE Weiter
        INC R4
Weiter:
```

Das war es schon. Eine einfache Sache. Das Gegenteil von BRNE ist übrigens BREQ oder BRanch EQual.

Welche der Statusbits durch welche Instruktionen und Bedingungen gesetzt oder rückgesetzt werden (auch Prozessorflags genannt), geht aus den einzelnen Instruktionsbeschreibungen in der Instruktionsliste hervor. Entsprechend kann mit den bedingten Sprunginstruktionen

```
        BRCC/BRCS ; Carry-Flag 0 oder gesetzt
        BRSH ; Gleich oder größer
        BRLO ; Kleiner
        BRMI ; Minus
        BRPL ; Plus
        BRGE ; Größer oder gleich (mit Vorzeichen)
        BRLT ; Kleiner (mit Vorzeichen)
        BRHC/BRHS ; Halbübertrag 0 oder 1
        BRTC/BRTS ; T-Bit 0 oder 1
        BRVC/BRVS ; Zweierkomplement-Übertrag 0 oder 1
        BRIE/BRID ; Interrupt an- oder abgeschaltet
```

auf die verschiedenen Bedingungen reagiert werden. Gesprungen wird immer dann, wenn die entsprechende Bedingung erfüllt ist. Keine Angst, die meisten dieser Instruktionen braucht man sehr selten. Nur Zero und Carry sind für den Anfang wichtig.

7.3 Zeitzusammenhänge beim Programmablauf

Wie oben schon erwähnt entspricht die Zeitdauer zur Bearbeitung einer Instruktion in der Regel exakt einem Prozessortakt. Läuft der Prozessor mit 4 MHz Takt, dann dauert die Bearbeitung einer Instruktion 1/4 µs oder 250 ns, bei 10 MHz Takt nur 100 ns. Die Dauer ist quarzgenau vorhersagbar und Anwendungen, die ein genaues Timing erfordern, sind durch entsprechend exakte Gestaltung des Programmablaufes erreichbar. Es gibt aber eine Reihe von Instruktionen, z.B. die Sprunginstruktionen oder die Lese- und Schreibinstruktionen für das SRAM, die zwei oder mehr Taktzyklen erfordern. Hier hilft nur die Instruktionstabelle weiter.

Um genaue Zeitbeziehungen herzustellen, muss man manchmal den Programmablauf um eine bestimmte Anzahl Taktzyklen verzögern. Dazu gibt es die sinnloseste Instruktion des Prozessors, den Tu-nix-Befehl:

```
        NOP
```

Diese Instruktion heißt "No Operation" und tut nichts außer Prozessorzeit zu verschwenden. Bei 4 MHz Takt braucht es genau vier solcher NOPs, um eine exakte Verzögerung um 1 µs zu erreichen. Zu viel anderem ist diese Instruktion nicht zu gebrauchen. Für einen Rechteckgenerator von 1 kHz müssen aber nicht 1000 solcher NOPs kopiert werden, das geht auch anders! Dazu braucht es die Sprunginstruktionen. Mit ihrer Hilfe können Schleifen programmiert werden, die für eine festgelegte Anzahl von Läufen den Programmablauf aufhalten und verzögern. Das können 8-Bit-Register sein, die mit der DEC-Instruktion heruntergezählt werden, wie z.B. bei

```
        CLR R1
Zaehl:
```

```
        DEC R1
        BRNE Zaehl
```

Es können aber auch 16-Bit-Zähler sein, wie z.B. bei

```
        LDI ZH,HIGH(65535)
        LDI ZL,LOW(65535)
Zaehl:
        SBIW ZL,1
        BRNE Zaehl
```

Mit mehr Registern lassen sich mehr Verzögerungen erreichen. Jeder dieser Verzögerer kann auf den jeweiligen Bedarf eingestellt werden und funktioniert dann quarzgenau, auch ohne Hardware-Timer.

7.4 Makros im Programmablauf

Es kommt vor, dass in einem Programm identische oder ähnliche Code-Sequenzen an mehreren Stellen benötigt werden. Will oder kann man den Programmteil nicht mittels Unterprogrammen bewältigen, dann kommt für diese Aufgabe auch ein Makro in Frage. Makros sind Codesequenzen, die nur einmal entworfen werden und durch Aufruf des Makronamens in den Programmablauf eingefügt werden. Nehmen wir an, es soll die folgende Codesequenz (Verzögerung um 1 µs bei 4 MHz Takt) an mehreren Programmstellen benötigt werden. Dann erfolgt irgendwo im Quellcode die Definition des folgenden Makros:

```
 .MACRO Delay1
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
.ENDMACRO
```

Diese Definition des Makros erzeugt keinen Code, es werden also keine vier NOPs in den Code eingefügt. Erst der Aufruf des Makros

```
        [...] irgendwo im Code
        Delay1
        [...] weiter mit Code
```

bewirkt, dass an dieser Stelle vier NOPs eingebaut werden. Der zweimalige Aufruf des Makros baut acht NOPs in den Code ein.

Handelt es sich um größere Codesequenzen, hat man etwas Zeit im Programm oder ist man knapp mit Programmspeicher, sollte man auf den Code-extensiven Einsatz von Makros verzichten und lieber Unterprogramme verwenden.

7.5 Unterprogramme

Im Gegensatz zum Makro geht ein Unterprogramm sparsamer mit dem Programmspeicher um. Irgendwo im Code steht die Sequenz ein einziges Mal herum und kann von verschiedenen Programmteilen her aufgerufen werden. Damit die Verarbeitung des Programmes wieder an der aufrufenden Stelle weitergeht, folgt am Ende des Unterprogrammes ein Return. Das sieht dann für 10 Takte Verzögerung so aus:

```
Delay10:
        NOP
        NOP
        NOP
```

RET

Unterprogramme beginnen immer mit einem Label, hier Delay10:, weil sie sonst nicht angesprungen werden könnten. Es folgen drei Nix-Tun-Befehle und der abschließenden Return-Instruktion. Schlaumeier könnten jetzt einwenden, das seien ja bloß 7 Takte (RET braucht 4) und keine 10. Gemach, es kömmt noch der Aufruf dazu und der schlägt mit 3 Takten zu Buche:

[...] irgendwo im Programm:
RCALL Delay10
[...] weiter im Programm

RCALL ist eine Verzweigung zu einer relativen Adresse, nämlich zum Unterprogramm. Mit RET wird wieder der lineare Programmablauf abgebrochen und zu der Instruktion nach dem RCALL verzweigt. Es sei noch dringend daran erinnert, dass die Verwendung von Unterprogrammen das vorherige Setzen des Stackpointers oder Stapelzeigers voraussetzt (siehe Stapel), weil die Rücksprungadresse beim RCALL auf dem Stapel abgelegt wird.

Wer das obige Beispiel ohne Stapel programmieren möchte, verwendet die absolute Sprunginstruktion:

[...] irgendwo im Programm
RJMP Delay10
Zurueck:
[...] weiter im Programm

Jetzt muss das "Unterprogramm" allerdings anstelle des RET natürlich ebenfalls eine RJMP-Instruktion bekommen und zum Label Zurueck: verzweigen. Da der Programmcode dann aber nicht mehr von anderen Stellen im Programmcode aufgerufen werden kann (die Rückkehr funktioniert jetzt nicht mehr), ist die Springerei ziemlich sinnlos. Auf jeden Fall haben wir jetzt das relative Springen mit RJMP gelernt.

RCALL und RJMP sind auf jeden Fall unbedingte Verzweigungen. Ob sie ausgeführt werden hängt nicht von irgendwelchen Bedingungen ab. Zum bedingten Ausführen eines Unterprogrammes muss das Unterprogramm mit einer bedingten Verzweigungsinstruktion kombiniert werden, der unter bestimmten Bedingungen das Unterprogramm ausführt oder den Aufruf eben überspringt. Für solche bedingten Verzweigungen zu einem Unterprogramm eignen sich die beiden folgenden Instruktionen ideal. Soll in Abhängigkeit vom Zustand eines Bits in einem Register zu einem Unterprogramm oder einem anderen Programmteil verzweigt werden, dann geht das so:

SBRC R1,7 ; Überspringe wenn Bit 7 Null ist
RCALL UpLabel ; Rufe Unterprogramm auf

Hier wird der RCALL zum Unterprogramm UpLabel: nur ausgeführt, wenn das Bit 7 im Register R1 eine Eins ist, weil die Instruktion bei einer Null (Clear) übersprungen wird. Will man auf die umgekehrte Bedingung hin ausführen, so kommt statt SBRC die analoge Instruktion SBRS zum Einsatz. Die auf SBRC/SBRS folgende Instruktion kann sowohl eine Ein-Wort- als auch eine Zwei-Wort-Instruktion sein, der Prozessor weiß die Länge der Instruktionen korrekt Bescheid und überspringt dann eben um die richtige Anzahl Befehlsworte. Zum Überspringen von mehr als einer Instruktion kann dieser bedingte Sprung natürlich nicht benutzt werden.

Soll ein Überspringen nur dann erfolgen, wenn zwei Registerinhalte gleich sind, dann bietet sich die etwas exotische Instruktion

CPSE R1,R2 ; Vergleiche R1 und R2, springe wenn gleich
RCALL UpIrgendwas ; Rufe irgendwas

Der wird selten gebraucht und ist ein Mauerblümchen.

Man kann aber auch in Abhängigkeit von bestimmten Port-Bits die nächste Instruktion überspringen. Die

entsprechenden Instruktionen heißen SBIC und SBIS, also etwa so:

```
SBIC PINB,0 ; Überspringe wenn Bit 0 Null ist
RJMP EinZiel ; Springe zum Label EinZiel
```

Hier wird die RJMP-Instruktion nur übersprungen, wenn das Bit 0 im Eingabeport PINB gerade Null ist. Also wird das Programm an dieser Stelle nur dann zum Programmteil EinZiel: verzweigen, wenn das Portbit 0 Eins ist. Das ist etwas verwirrend, da die Kombination von SBIC und RJMP etwas umgekehrt wirkt als sprachlich naheliegend ist. Das umgekehrte Sprungverhalten kann anstelle von SBIC mit SBIS erreicht werden. Leider kommen als Ports bei den beiden Instruktionen nur die unteren 32 infrage, für die oberen 32 Ports können diese Instruktionen nicht verwendet werden.

Nun noch die Exotenanwendung für den absoluten Spezialisten. Nehmen wir mal an, sie hätten vier Eingänge am AVR, an denen ein Bitklavier angeschlossen sei (vier kleine Schalterchen). Je nachdem, welches der vier Tasten eingestellt sei, soll der AVR 16 verschiedene Tätigkeiten vollführen. Nun könnten Sie selbstverständlich den Porteingang lesen und mit jede Menge Branch-Anweisungen schon herausfinden, welches der 16 Programmteile denn heute gewünscht wird. Sie können aber auch eine Tabelle mit je einer Sprunginstruktion auf die sechzehn Routinen machen, etwa so:

```
MeinTab:
    RJMP Routine1
    RJMP Routine2
    [...]
    RJMP Routine16
```

Jetzt laden Sie den Anfang der Tabelle in das Z-Register mit

```
LDI ZH,HIGH(MeinTab)
LDI ZL,LOW(MeinTab)
```

und addieren den heutigen Pegelstand am Portklavier in R16 zu dieser Adresse.

```
    ADD ZL,R16
    BRCC NixUeberlauf
    INC ZH
NixUeberlauf:
```

Jetzt können Sie nach Herzenslust und voller Wucht in die Tabelle springen, entweder nur mal als Unterprogramm mit

```
ICALL ; Rufe Unterprogramm auf, auf das ZH:ZL zeigt
```

oder auf Nimmerwiederkehr mit

```
IJMP ; Springe zur Adresse, auf die ZH:ZL zeigt
```

Der Prozessor lädt daraufhin den Inhalt seines Z-Registerpaares in den Programmzähler und macht dort weiter. Manche finden das eleganter als unendlich verschachtelte bedingte Sprünge. Mag sein.

7.6 Interrupts im Programmablauf

Sehr oft kommt es vor, dass in Abhängigkeit von irgendwelchen Änderungen in der Hardware oder zu bestimmten Gelegenheiten auf dieses Ereignis reagiert wird. Ein Beispiel ist die Pegeländerung an einem Eingang. Man kann das lösen, indem das Programm im Kreis herum läuft und immer den Eingang befragt, ob er sich nun geändert hat. Die Methode heisst Polling, weil es wie bei die Bienchen darum geht, jede Blüte immer mal wieder zu besuchen und deren neue Pollen einzusammeln.

Gibt es außer diesem Eingang noch anderes wichtiges für den Prozessor zu tun, dann kann das dauernde zwischendurch Anfliegen der Blüte ganz schön nerven und sogar versagen: Kurze Pulse werden nicht erkannt, wenn Bienchen nicht gerade vorbei kam und nachsah, der Pegel aber wieder weg ist. Für diesen Fall hat man den Interrupt erfunden.

Der Interrupt ist eine von der Hardware ausgelöste Unterbrechung des Programmablaufes. Dazu kriegt das Gerät zunächst mitgeteilt, dass es unterbrechen darf. Dazu ist bei dem entsprechenden Gerät ein oder mehr Bits in bestimmten Ports zu setzen. Dem Prozessor ist durch ein gesetztes Interrupt Enable Bit in seinem Status-Register mitzuteilen, dass er unterbrochen werden darf. Irgendwann nach den Anfangsfeierlichkeiten des Programmes muss dazu das I-Flag im Statusregister gesetzt werden, sonst macht der Prozessor beim Unterbrechen nicht mit.

SEI ; Setze Int-Enable

Wenn jetzt die Bedingung eintritt, also z.B. ein Pegel von Null auf Eins wechselt, dann legt der Prozessor seine aktuelle Programmadresse erst mal auf den Stapel ab (Obacht! Der muss vorher eingerichtet sein!). Er muss ja das unterbrochene Programm exakt an der Stelle wieder aufnehmen, an dem es unterbrochen wurde, dafür der Stapel. Nun springt der Prozessor an eine vordefinierte Stelle des Programmes und setzt die Verarbeitung erst mal dort fort. Die Stelle nennt man Interrupt Vektor. Sie ist prozessorspezifisch festgelegt. Da es viele Geräte gibt, die auf unterschiedliche Ereignisse reagieren können sollen, gibt es auch viele solcher Vektoren. So hat jede Unterbrechung ihre bestimmte Stelle im Programm, die angesprungen wird. Die entsprechenden Programmstellen der wichtigsten Prozessoren sind in der folgenden Tabelle aufgelistet. (Der erste Vektor ist aber kein Int-Vektor, weil er keine Rücksprung-Adresse auf dem Stapel ablegt!)

Name	***Int Vector Adresse***			***ausgelöst durch ...***
	2313	***2323***	***8515***	
RESET	0000	0000	0000	Hardware Reset, Power-On Reset, Watchdog Reset
INT0	0001	0001	0001	Pegelwechsel am externen INT0-Pin
INT1	0002	-	0002	Pegelwechsel am externen INT1-Pin
TIMER1 CAPT	0003	-	0003	Fangschaltung am Timer 1
TIMER1 COMPA	-	-	0004	Timer1 = Compare A
TIMER1 COMPB	-	-	0005	Timer1 = Compare B
TIMER1 COMP1	0004	-	-	Timer1 = Compare 1
TIMER1 OVF	0005	-	0006	Timer1 Überlauf
TIMER0 OVF	0006	0002	0007	Timer0 Überlauf
SPI STC	-	-	0008	Serielle Übertragung komplett
UART RX	0007	-	0009	UART Zeichen im Empfangspuffer
UART UDRE	0008	-	000A	UART Senderegister leer
UART TX	0009	-	000B	UART Alles gesendet
ANA_COMP	-	-	000C	Analog Comparator

Man erkennt, dass die Fähigkeit, Interrupts auszulösen, sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. Sie entspricht der Ausstattung der Chips mit Hardware. Die Adressen folgen aufeinander, sind aber für den Typ spezifisch durchnummeriert. Die Reihenfolge hat einen weiteren Sinn: Je höher in der Liste, desto wichtiger. Wenn also zwei Geräte gleichzeitig die Unterbrechung auslösen, gewinnt die jeweils obere in der Liste. Die niedri-

gerwertige kommt erst dran, wenn die höherwertige fertig bearbeitet ist. Damit das funktioniert, schaltet der erfolgreiche Interrupt das Interrupt-Status-Bit aus. Dann kann der niederwertige erst mal verhungern. Erst wenn das Interrupt-Status-Bit wieder angeschaltet wird, kann die nächste anstehende Unterbrechung ihren Lauf nehmen.

Für das Setzen des Statusbits kann die Unterbrechungsroutine, ein Unterprogramm, zwei Wege einschlagen. Es kann am Ende mit der Instruktion

RETI

abschließen. Diese Instruktion stellt den ursprünglichen Befehlszähler wieder her, der vor der Unterbrechung gerade bearbeitet werden sollte und setzt das Interrupt-Status-Bit wieder auf Eins.

Der zweite Weg ist das Setzen des Status-Bits per Instruktion

SEI ; Setze Interrupt Enabled
RET ; Kehre zurück

und das Abschließen der Unterbrechungsroutine mit einem normalen RET. Aber Obacht, das ist nicht identisch im Verhalten! Im zweiten Fall tritt die noch immer anstehende Unterbrechung schon ein, bevor die anschließende Return-Instruktion bearbeitet wird, weil das Status-Bit schon um eine Instruktion früher wieder Ints zulässt. Das führt zu einem Zustand, der das überragende Stapelkonzept so richtig hervorhebt: ein verschachtelter Interrupt. Die Unterbrechung während der Unterbrechung packt wieder die Rücksprung-Adresse auf den Stapel (jetzt liegen dort zwei Adressen herum), bearbeitet die Unterbrechungsroutine für den zweiten Interrupt und kehrt an die oberste Adresse auf dem Stapel zurück. Die zeigt auf die noch verbliebenen RET-Instruktion, der jetzt erst bearbeitet wird. Dieser nimmt nun auch die noch verbliebene Rücksprung-Adresse vom Stapel und kehrt zur Originaladresse zurück, die zur Zeit der Unterbrechung zur Bearbeitung gerade anstand.

Durch die LIFO-Stapelei ist das Verschachteln solcher Aufrufe über mehrere Ebenen kein Problem, solange der Stapelzeiger noch richtiges SRAM zum Ablegen vorfindet. Folgen allerdings zu viele Interrupts, bevor die vorherigen richtig beendet wurden, dann kann der Stapel auf dem SRAM überlaufen. Aber das muss man schon mit Absicht programmieren, weil es doch sehr selten vorkommt.

Klar ist auch, dass an der Adresse des Int-Vektors nur für eine Ein-Wort-Instruktion Platz ist. Das ist in der Regel eine RJMP-Instruktion an die Adresse des Interrupt- Unterprogrammes. Es kann auch einfach eine RETI-Instruktion sein, wenn dieser Vektor gar nicht benötigt wird. Wegen der Notwendigkeit, die Interrupts möglichst rasch wieder freizugeben, damit der nächste anstehende Int nicht völlig aushungert, sollten Interrupt-Service-Routinen nicht allzu lang sein. Lange Prozeduren sollten unbedingt die zweite Methode zur Wiederherstellung des I-Bits wählen, also sofort nach Abarbeitung der zeitkritischen Schritte die Interrupts mit SEI wieder vorzeitig zulassen, bevor die Routine ganz abgearbeitet ist.

Eine ganz, ganz wichtige Regel sollte in jedem Fall eingehalten werden: Die erste Instruktion einer Interrupt-Service-Routine ist die Rettung des Statusregisters auf dem Stapel oder in einem Register. Die letzte Instruktion der Routine ist die Wiederherstellung desselben in den Originalzustand vor der Unterbrechung. Jede Instruktion in der Unterbrechungsroutine, der irgendeines der Flags (außer dem I-Bit) verändert, würde unter Umständen verheerende Nebenfolgen auslösen, weil im unterbrochenen Programmablauf plötzlich irgendeins der verwendeten Flags anders wird als an dieser Stelle im Programmablauf vorgesehen, wenn die Interrupt-Service Routine zwischendurch zugeschlagen hat. Das ist auch der Grund, warum alle verwendeten Register in Unterbrechungsroutinen entweder gesichert und am Ende der Routine wiederhergestellt werden müssen oder aber speziell nur für die Int-Routinen reserviert sein müssen. Sonst wäre nach einer irgendwann auftretenden Unterbrechung für nichts mehr zu garantieren. Es ist nichts mehr so wie es war vor der Unterbrechung. Weil das alles so wichtig ist, hier eine ausführliche beispielhafte Unterbrechungsroutine.

.CSEG ; Hier beginnt das Code-Segment
.ORG 0000 ; Die Adresse auf Null

RJMP Start ; Der Reset-Vektor an die Adresse 0000
RJMP IService ; 0001: erster Interrupt-Vektor, INT0 service routine
[...] hier eventuell weitere Int-Vektoren

Start: ; Hier beginnt das Hauptprogramm
[...] hier kann alles mögliche stehen

IService: ; Hier beginnt die Interrupt-Service-Routine
PUSH R16 ; Benutztes Register auf den Stapel
IN R16,SREG ; Statusregister Zustand einlesen
PUSH R16 ; ebenfalls auf den Stapel ablegen
[...] Hier macht die Int-Service-Routine irgendwas, benutzt Register R16
POP R16 ; alten Inhalt von SREG vom Stapel holen
OUT SREG,R16 ; und Statusregister wiederherstellen
POP R16 ; alten Inhalt von R16 wiederherstellen
RETI ; und zurückkehren

Das klingt alles ziemlich umständlich, ist aber wirklich lebenswichtig für korrekt arbeitende Programme. Es vereinfacht sich entsprechend nur dann, wenn man Register satt zur Verfügung hat und wegen exklusiver Nutzung durch die Service- Routine auf das Sichern verzichten kann.

Das war für den Anfang alles wirklich wichtige über Interrupts. Es gäbe noch eine Reihe von Tips, aber das würde für den Anfang etwas zu verwirrend.

8 Rechnen in Assemblersprache

Hier gibt es alles Wichtige zum Rechnen in Assembler. Dazu gehören die gebräuchlichen Zahlensysteme, das Setzen und Rücksetzen von Bits, das Schieben und Rotieren, das Addieren/Subtrahieren/Vergleichen und die Umwandlung von Zahlen.

8.1 Zahlenarten in Assembler

An Darstellungsarten für Zahlen in Assembler kommen infrage:

- Positive Ganzzahlen,
- Vorzeichenbehaftete ganze Zahlen,
- Binary Coded Digit, BCD,
- Gepackte BCD,
- ASCII-Format.

Positive Ganzzahlen

Die kleinste handhabbare positive Ganzzahl in Assembler ist das Byte zu je acht Bits. Damit sind Zahlen zwischen 0 und 255 darstellbar. Sie passen genau in ein Register des Prozessors. Alle größeren Ganzzahlen müssen auf dieser Einheit aufbauen und sich aus mehreren solcher Einheiten zusammensetzen. So bilden zwei Bytes ein Wort (Bereich 0 .. 65.535), drei Bytes ein längeres Wort (Bereich 0 .. 16.777.215) und vier Bytes ein Doppelwort (Bereich 0 .. 4.294.967.295).

Die einzelnen Bytes eines Wortes oder Doppelwortes können über Register verstreut liegen, da zur Manipulation ohnehin jedes einzelne Register in seiner Lage angegeben sein muss. Damit wir den Überblick nicht verlieren, könnte z.B. ein Doppelwort so angeordnet sein:

```
.DEF dw0 = r16
.DEF dw1 = r17
.DEF dw2 = r18
.DEF dw3 = r19
```

dw0 bis dw3 liegen jetzt in einer Registerreihe. Soll dieses Doppelwort z.B. zu Programmbeginn auf einen festen Wert (hier: 4.000.000) gesetzt werden, dann sieht das in Assembler so aus:

```
.EQU dwi = 4000000 ; Definieren der Konstanten
	LDI dw0,LOW(dwi) ; Die untersten 8 Bits in R16
	LDI dw1,BYTE2(dwi) ; Bits 8 .. 15 in R17
	LDI dw2,BYTE3(dwi) ; Bits 16 .. 23 in R18
	LDI dw3,BYTE4(dwi) ; Bits 24 .. 31 in R19
```

Damit ist die Zahl in verdauliche Brocken auf die Register aufgeteilt und es darf mit dieser Zahl gerechnet werden.

Vorzeichenbehaftete Zahlen

Manchmal, aber sehr selten, braucht man auch negative Zahlen zum Rechnen. Die kriegt man definiert, indem das höchstwertigste Bit eines Bytes als Vorzeichen interpretiert wird. Ist es Eins, dann ist die Zahl negativ. In diesem Fall werden alle Zahlenbits mit ihrem invertierten Wert dargestellt. Invertiert heißt, dass -1 zu binär 1111.1111 wird, die 1 also als von binär 1.0000.0000 abgezogen dargestellt wird. Das vorderste Bit ist dabei aber das Vorzeichen, das signalisiert, dass die Zahl negativ ist und die folgenden Bits die Zahl invertiert darstellen. Einstweilen genügt es zu verstehen, dass beim binären Addieren von +1 (0000.0001) und -1 (1111.1111) ziemlich exakt Null herauskommt, wenn man von dem gesetzten Übertragsbit Carry mal absieht.

In einem Byte sind mit dieser Methode die Ganzzahlen von +127 (binär: 0111.1111) bis -128 (binär: 1000.000) darstellbar. In Hochsprachen spricht man von Short-Integer. Benötigt man größere Zahlenbereiche, dann kann man weitere Bytes hinzufügen. Dabei enthält nur das jeweils höchstwertigste Byte das Vorzeichenbit für die gesamte Zahl. Mit zwei Bytes ist damit der Wertebereich von +32767 bis -32768 (Hochsprachen: Integer), mit vier Bytes der Wertebereich von +2.147.483.647 bis -2.147.483.648 darstellbar (Hochsprachen: LongInt).

Binary Coded Digit, BCD

Die beiden vorgenannten Zahlenarten nutzen die Bits der Register optimal aus, indem sie die Zahlen in binärer Form behandeln. Man kann Zahlen aber auch so darstellen, dass auf ein Byte nur jeweils eine dezimale Ziffer kommt. Eine dezimale Ziffer wird dazu in binärer Form gespeichert. Da die Ziffern von 0 bis 9 mit vier Bits darstellbar sind und selbst in den vier Bits noch Luft ist (in vier Bits würde dezimal 0 .. 15 passen), bleibt dabei ziemlich viel Raum leer. Für das Speichern der Zahl 250 werden schon drei Register gebraucht, also z.B. so:

Bit	***7***	***6***	***5***	***4***	***3***	***2***	***1***	***0***
Wertigkeit	***128***	***64***	***32***	***16***	***8***	***4***	***2***	***1***
R16, Ziffer 1	0	0	0	0	0	0	1	0
R17, Ziffer 2	0	0	0	0	0	1	0	1
R18, Ziffer 3	0	0	0	0	0	0	0	0

Instruktionen zum Setzen:

LDI R16,2
LDI R17,5
LDI R18,0

Auch mit solchen Zahlenformaten lässt sich rechnen, nur ist es aufwendiger als bei den binären Formen. Der Vorteil ist, dass solche Zahlen mit fast beliebiger Größe (soweit das SRAM reicht ...) gehandhabt werden können und dass sie leicht in Zeichenketten umwandelbar sind.

Gepackte BCD-Ziffern

Nicht ganz so verschwenderisch geht gepacktes BCD mit den Ziffern um. Hier wird jede binär kodierte Ziffer in jeweils vier Bits eines Bytes gepackt, so dass ein Byte zwei Ziffern aufnehmen kann. Die beiden Teile des Bytes werden oberes und unteres Nibble genannt. Packt man die höherwertige Ziffer in die oberen vier Bits des Bytes (Bit 4 bis 7), dann hat das beim Rechnen Vorteile (es gibt spezielle Einrichtungen im AVR zum Rechnen mit gepackten BCD-Ziffern). Die schon erwähnte Zahl 250 würde im gepackten BCD-Format folgendermaßen aussehen:

Byte	***Ziffern***	***Wert***	***8***	***4***	***2***	***1***	***8***	***4***	***2***	***1***
2	4 und 3	02	0	0	0	0	0	0	1	0
1	2 und 1	50	0	1	0	1	0	0	0	0

Instruktionen zum Setzen:

LDI R17,0x02 ; Oberes Byte
LDI R16,0x50 ; Unteres Byte

Zum Setzen ist nun die binäre (0b...) oder die headezimale (0x...) Schreibweise erforderlich, damit die Bits an die richtigen Stellen im oberen Nibble kommen.

Das Rechnen mit gepackten BCD ist etwas umständlicher im Vergleich zum Binär-Format, die Zahlenumwandlung in darstellbare Zeichenketten aber fast so einfach wie im ungepackten BCD-Format. Auch hier lassen sich fast beliebig lange Zahlen handhaben.

Zahlen im ASCII-Format

Sehr eng verwandt mit dem ungepackten BCD-Format ist die Speicherung von Zahlen im ASCII-Format. Dabei werden die Ziffern 0 bis 9 mit ihrer ASCII-Kodierung gespeichert (ASCII = American Standard Code for Information Interchange). Das ASCII ist ein uraltes, aus Zeiten des mechanischen Fernschreibers stammendes, sehr umständliches, äußerst beschränktes und von höchst innovativen Betriebssystem-Herstellern in das Computer-Zeitalter herüber gerettetes sieben-bittiges Format, mit dem zusätzlich zu irgendwelchen Befehlen der Übertragungssteuerung beim Fernschreiber (z.B. EOT = End Of Transmission) auch Buchstaben und Zahlen darstellbar sind. Es wird in seiner Altertümlichkeit nur noch durch den (ähnlichen) fünfbittigen Baudot-Code für deutsche Fernschreiber und durch den Morse-Code für ergraute Marinefunker übertroffen.

In diesem Code-System wird die 0 durch die dezimale Ziffer 48 (hexadezimal: 30, binär: 0011.0000), die 9 durch die dezimale Ziffer 57 (hexadezimal: 39, binär: 0011.1001) repräsentiert. Auf die Idee, diese Ziffern ganz vorne im ASCII hinzulegen, hätte man schon kommen können, aber da waren schon die wichtigen Verkehrs-Steuerzeichen für den Fernschreiber. So müssen wir uns noch immer damit herumschlagen, 48 zu einer BCD-kodierten Ziffer hinzu zu zählen oder die Bits 4 und 5 auf eins zu setzen, wenn wir den ASCII-Code über die serielle Schnittstelle senden wollen. Zur Platzverschwendung gilt das schon zu BCD geschriebene. Zum Laden der Zahl 250 kommt diesmal der folgende Quelltext zum Tragen:

```
LDI R18,'2'
LDI R17,'5'
LDI R16,'0'
```

Das speichert direkt die ASCII-Kodierung in das jeweilige Register.

8.2 Bitmanipulationen

Um eine BCD-kodierte Ziffer in ihr ASCII-Pendant zu verwandeln, müssen die Bits 4 und 5 der Zahl auf Eins gesetzt werden. Das verlangt nach einer binären Oder-Verknüpfung und ist eine leichte Aufgabe. Die geht so (ORI geht nur mit Registern ab R16 aufwärts):

```
ORI R16,0x30
```

Steht ein Register zur Verfügung, in dem bereits 0x30 steht, hier R2, dann kann man das Oder auch mit diesem Register durchführen:

```
OR R16,R2
```

Zurück ist es schon schwieriger, weil die naheliegende, umgekehrt wirkende Instruktion,

```
ANDI R16,0x0F
```

die die oberen vier Bits des Registers auf Null setzt und die unteren vier Bits beibehält, nur für Register oberhalb R15 möglich ist. Eventuell also in einem solchen Register durchführen!

Hat man die 0x0F schon in Register R2, kann man mit diesem Register Und-verknüpfen:

```
AND R1,R2
```

Auch die beiden anderen Instruktionen zur Bitmanipulation, CBR und SBR, lassen sich nur in Registern oberhalb von R15 durchführen. Sie würden entsprechend korrekt lauten:

SBR R16,0b00110000 ; Bits 4 und 5 setzen
CBR R16,0b00110000 ; Bits 4 und 5 löschen

Sollen eins oder mehrere Bits einer Zahl umgekehrt werden, bedient man sich gerne des Exklusiv-Oder-Verfahrens, das nur für Register, nicht für Konstanten, zulässig ist:

LDI R16,0b10101010 ; Invertieren aller geraden Bits
EOR R1,R16 ; in Register R1 und speichern in R1

Sollen alle Bits eines Bytes umgedreht werden, kommt das Einer-Komplement ins Spiel. Mit

COM R1

wird der Inhalt eines Registers bitweise invertiert, aus Einsen werden Nullen und umgekehrt. So wird aus 1 die Zahl 254, aus 2 wird 253, usw. Anders ist die Erzeugung einer negativen Zahl aus einer Positiven. Hierbei wird das Vorzeichenbit (Bit 7) umgedreht bzw. der Inhalt von Null subtrahiert. Dieses erledigt die Instruktion

NEG R1

So wird aus +1 (dezimal: 1) -1 (binär 1111.1111), aus +2 wird -2 (binär 1111.1110), usw.

Neben der Manipulation gleich mehrerer Bits in einem Register gibt es das Kopieren eines einzelnen Bits aus dem eigens für diesen Zweck eingerichteten T-Bit des Status-Registers. Mit

BLD R1,0

wird das T-Bit im Status-Register in das Bit 0 des Registers R1 kopiert und das dortige Bit überschrieben. Das T-Bit kann vorher auf Null oder Eins gesetzt oder aus einem beliebigen anderen Bit-Lagerplatz in einem Register geladen werden:

CLT ; T-Bit auf Null setzen, oder
SET ; T-Bit auf Eins setzen, oder
BST R2,2 ; T-Bit aus Register R2, Bit 2, laden

8.3 Schieben und Rotieren

Das Schieben von binären Zahlen entspricht dem Multiplizieren und Dividieren mit 2. Beim Schieben gibt es unterschiedliche Mechanismen.

Die Multiplikation einer Zahl mit 2 geht einfach so vor sich, dass alle Bits einer binären Zahl um eine Stelle nach links geschoben werden. In das freie Bit 0 kommt eine Null. Das überzählige ehemalige Bit 7 wird dabei in das Carry-Bit im Status-Register abgeschoben. Der Vorgang wird logisches Links-Schieben genannt.

LSL R1

Das umgekehrte Dividieren durch 2 heißt Dividieren oder logisches Rechts-Schieben.

LSR R1

Dabei wird das frei werdende Bit 7 mit einer 0 gefüllt, während das Bit 0 in das Carry geschoben wird. Dieses Carry kann dann zum Runden der Zahl verwendet werden. Als Beispiel wird eine Zahl durch vier dividiert und dabei gerundet.

LSR R1 ; Division durch 2
BRCC Div2 ; Springe wenn kein Runden
INC R1 ; Aufrunden
Div2:
LSR R1 ; Noch mal durch 2
BRCC DivE ; Springe wenn kein Runden
INC R1 ; Aufrunden
DivE:

Teilen ist also eine einfache Angelegenheit bei Binärzahlen (aber nicht durch 3 oder 5)!

Bei Vorzeichen-behafteten Zahlen würde das Rechtsschieben das Vorzeichen in Bit 7 übel verändern. Das darf nicht sein. Desdewegen gibt es neben dem logischen Rechtsschieben auch das arithmetische Rechts-schieben. Dabei bleibt das Vorzeichenbit 7 erhalten und die Null wird in Bit 6 eingeschoben.

ASR R1

Wie beim logischen Schieben landet das Bit 0 im Carry.

Wie nun, wenn wir 16-Bit-Zahlen mit 2 multiplizieren wollen? Dann muss das links aus dem untersten Byte herausgeschobene Bit von rechts in das oberste Byte hineingeschoben werden. Das erledigt man durch Rollen. Dabei landet keine Null im Bit 0 des verschobenen Registers, sondern der Inhalt des Carry-Bits.

LSL R1 ; Logische Schieben unteres Byte
ROL R2 ; Linksrollen des oberen Bytes

Bei der ersten Instruktion gelangt Bit 7 des unteren Bytes in das Carry-Bit, bei der zweiten Instruktion dann in Bit 0 des oberen Bytes. Nach der zweiten Instruktion hängt Bit 7 des oberen Bytes im Carry-Bit herum und wir könnten es ins dritte Byte schieben, usw. Natürlich gibt es das Rollen auch nach rechts, zum Divi-dieren von 16-Bit-Zahlen gut geeignet. Hier nun alles Rückwärts:

LSR R2 ; Oberes Byte durch 2, Bit 0 ins Carry
ROR R1 ; Carry in unteres Byte und dabei rollen

So einfach ist das mit dem Dividieren bei großen Zahlen. Man sieht sofort, dass Assembler-Dividieren viel schwieriger zu erlernen ist als Hochsprachen-Dividieren, oder?

Gleich vier mal Spezial-schieben kommt jetzt. Es geht um die Nibble gepackter BCD-Zahlen. Wenn man nun mal das obere Nibble anstelle des unteren Nibble braucht, dann kommt man um vier mal Rollen

ROR R1
ROR R1
ROR R1
ROR R1

mit einem einzigen

SWAP R1

herum. Das vertauscht mal eben die oberen vier mit den unteren vier Bits.

8.4 Addition, Subtraktion und Vergleich

Ungeheuer schwierig in Assembler ist Addieren, Dividieren und Vergleichen. Zart-besaitete Anfänger soll-ten sich an dieses Kapitel nicht herantrauen. Wer es trotzdem liest, ist übermütig und jedenfalls selbst schuld.

Um es gleich ganz schwierig zu machen, addieren wir die 16-Bit-Zahlen in den Registern R1:R2 zu den Inhalten von R3:R4 (Das „:“ heißt nicht Division! Das erste Register gibt das High-Byte, das zweite nach dem „:“ das Low-Byte an).

ADD R2,R4 ; zuerst die beiden Low-Bytes
ADC R1,R3 ; dann die beiden High-Bytes

Anstelle von ADD wird beim zweiten Addieren ADC verwendet. Das addiert auch noch das Carry-Bit dazu, falls beim ersten Addieren ein Übertrag stattgefunden hat. Sind sie schon dem Herzkasper nahe?

Wenn nicht, dann kommt jetzt das Subtrahieren. Also alles wieder rückwärts und R3:R4 von R1:R2 subtrahiert.

SUB R2,R4 ; Zuerst das Low-Byte
SBC R1,R3 ; dann das High-Byte

Wieder derselbe Trick: Anstelle des SUB das SBC, das zusätzlich zum Register R3 auch gleich noch das Carry-Bit von R1 abzieht. Kriegen Sie noch Luft? Wenn ja, dann leisten sie sich das folgende: Abziehen ohne Ernst!

Jetzt kommt es knüppeldick: Ist die Zahl in R1:R2 nun größer als die in R3:R4 oder nicht? Also nicht SUB, sondern CP (für ComPare), und nicht SBC, sondern CPC:

CP R2,R4 ; Vergleiche untere Bytes
CPC R1,R3 ; Vergleiche obere Bytes

Wenn jetzt das Carry-Flag gesetzt ist, kann das nur heißen, dass R3:R4 größer ist als R1:R2. Wenn nicht, dann eben nicht.

Jetzt setzen wir noch einen drauf! Wir vergleichen Register R1 und eine Konstante miteinander: Ist in Register R16 ein binäres Wechselbad gespeichert?

CPI R16,0xAA

Wenn jetzt das Z-Bit gesetzt ist, dann ist das aber so was von gleich!

Und jetzt kommt die Sockenauszieher-Hammer-Instruktion! Wir vergleichen, ob das Register R1 kleiner oder gleich Null ist.

TST R1

Wenn jetzt das Z-Flag gesetzt ist, ist das Register ziemlich leer und wir können mit BREQ, BRNE, BRMI, BRPL, BRLO, BRSH, BRGE, BRLT, BRVC oder auch BRVS ziemlich lustig springen.

Sie sind ja immer noch dabei! Assembler ist schwer, gelle? Na dann, kriegen sie noch ein wenig gepacktes BCD-Rechnen draufgepackt.

Beim Addieren von gepackten BCD's kann sowohl die unterste der beiden Ziffern als auch die oberste überlaufen. Addieren wir im Geiste die BCD-Zahlen 49 (=hex 49) und 99 (=hex 99). Beim Addieren in hex kommt hex E2 heraus und es kommt kein Byte-Überlauf zustande. Die untersten beiden Ziffern sind beim Addieren übergelaufen (9+9=18 = hex 12). Folglich ist die oberste Ziffer korrekt um eins erhöht worden, aber die unterste stimmt nicht, sie müsste 8 statt 2 lauten. Also könnten wir unten 6 addieren, dann stimmt es wieder.

Die oberste Ziffer stimmt überhaupt nicht, weil hex E keine zulässige BCD-Ziffer ist. Sie müsste richtigerweise 4 lauten (4+9+1=14) und ein Überlauf sollte auftreten. Also, wenn zu E noch 6 addiert werden, kommt dezimal 20 bzw. hex 14 heraus. Alles ganz easy: Einfach zum Ergebnis noch hex 66 addieren und schon stimmt alles.

Aber gemach! Das wäre nur korrekt, wenn bei der hintersten Ziffer, wie in unserem Fall, entweder schon beim ersten Addieren oder später beim Addieren der 6 tatsächlich ein Überlauf in die nächste Ziffer auftrat. Wenn das nicht so ist, dann darf die 6 nicht addiert werden. Woran ist zu merken, ob dabei ein Übertrag von der niedrigeren in die höhere Ziffer auftrat? Am Halbübertrags-Bit im Status-Register. Dieses H-Bit zeigt für einige Instruktionen an, ob ein solcher Übertrag aus dem unteren in das obere Nibble auftrat. Dasselbe gilt analog für das obere Nibble, nur zeigt hier das Carry-Bit den Überlauf an. Die folgenden Tabellen zeigen die verschiedenen Möglichkeiten an.

ADD R1,R2 (Half)Carry-Bit	***ADD Nibble,6 (Half)Carry-Bit***	***Korrektur***
0	0	6 wieder abziehen
1	0	keine
0	1	keine
1	1	(geht gar nicht!)

Nehmen wir an, die beiden gepackten BCD-Zahlen seien in R2 und R3 gespeichert, R1 soll den Überlauf aufnehmen und R16 und R17 stehen zur freien Verfügung. R16 soll zur Addition von 0x66 dienen (das Register R2 kann keine Konstanten addieren), R17 zur Subtraktion der Korrekturen am Ergebnis. Dann geht das Addieren von R2 und R3 so:

```
	LDI R16,0x66
	LDI R17,0x66
	ADD R2,R3
	BRCC NoCy1
	INC R1
	ANDI R17,0x0F
NoCy1:
	BRHC NoHc1
	ANDI R17,0xF0
NoHc1:
	ADD R2,R16
	BRCC NoCy2
	INC R1
	ANDI R17,0x0F
NoCy2:
	BRHC NoHc2
	ANDI R17,0x0F
NoHc2:
	SUB R2,R17
```

Die einzelnen Schritte: Im ersten Schritt werden die beiden Zahlen addiert. Tritt dabei schon ein Carry auf, dann wird das Ergebnisregister R1 erhöht und eine Korrektur des oberen Nibbles ist nicht nötig (die obere 6 im Korrekturspeicher R16 wird gelöscht). INC und ANDI beeinflussen das H-Bit nicht. War nach der ersten Addition das H-Bit schon gesetzt, dann kann auch die Korrektur des unteren Nibble entfallen (das untere Nibble wird Null gesetzt). Dann wird 0x66 addiert. Tritt dabei nun ein Carry auf, dann wird wie oben verfahren. Trat dabei ein Half-Carry auf, dann wird ebenfalls wie oben verfahren. Schließlich wird das Korrektur-Register vom Ergebnis abgezogen und die Berechnung ist fertig.

Kürzer geht es so.

```
	LDI R16,0x66
	ADD R2,R16
```

```
	ADD R2,R3
	BRCC NoCy
	INC R1
	ANDI R16,0x0F
NoCy:
	BRHC NoHc
	ANDI R16,0xF0
NoCy:
	SUB R2,R16
```

Ich überlasse es dem Leser zu ergründen, warum das so kurz geht.

8.5 Umwandlung von Zahlen - generell

Alle Zahlenformate sind natürlich umwandelbar. Die Umwandlung von BCD in ASCII und zurück war oben schon besprochen (Bitmanipulationen).

Die Umwandlung von gepackten BCD's ist auch nicht schwer. Zuerst ist die gepackte BCD mit einem SWAP umzuwandeln, so dass das erste Digit ganz rechts liegt. Mit einem ANDI kann dann das obere (ehemals untere) Nibble gelöscht werden, so dass das obere Digit als reine BCD blank liegt. Das zweite Digit ist direkt zugänglich, es ist nur das obere Nibble zu löschen. Von einer BCD zu einer gepackten BCD kommt man, indem man die höherwertige BCD mit SWAP in das obere Nibble verfrachtet und anschließend die niederwertige BCD damit verODERt.

Etwas schwieriger ist die Umwandlung von BCD-Zahlen in eine Binärzahl. Dazu macht man zuerst die benötigten Bits im Ergebnisspeicher frei. Man beginnt mit der niedrigstwertigen BCD-Ziffer. Bevor man diese zum Ergebnis addiert, wird das Ergebnis erstmal mit 10 multipliziert. Dazu speichert man das Ergebnis irgendwo zwischen, multipliziert es mit 4 (zweimal links schieben/rotieren), addiert das alte Ergebnis (mal 5) und schiebt noch einmal nach links (mal 10). Jetzt erst wird die BCD-Ziffer addiert. Das macht man mit allen höherwertigen BCD-Ziffern genauso weiter. Tritt bei irgendeinem Schieben oder Addieren des obersten Bytes ein Carry auf, dann passt die BCD-Zahl nicht in die verfügbaren binären Bytes.

Die Verwandlung einer Binärzahl in BCD-Ziffern ist noch etwas schwieriger. Handelt es sich um 16-Bit-Zahlen, kann man solange 10.000 subtrahieren, bis ein Überlauf auftritt, das ergibt die erste BCD-Ziffer. Anschließend subtrahiert man 1.000 bis zum Überlauf und erhält die zweite Ziffer, usw. bis 10. Der Rest ist die letzte Ziffer.Die Ziffern 10.000 bis 10 kann man im Programmspeicher in einer wortweise organisierten Tabelle verewigen, z.B. so

```
DezTab:
.DW 10000, 1000, 100, 10
```

und wortweise mit der LPM-Instruktion aus der Tabelle herauslesen in zwei Register.

Eine Alternative ist eine Tabelle mit der Wertigkeit jedes einzelnen Bits einer 16-Bit-Zahl, also z.B.

```
.DB 0,3,2,7,6,8
.DB 0,1,6,3,8,4
.DB 0,0,8,1,9,2
.DB 0,0,4,0,9,6
.DB 0,0,2,0,4,8 ; und so weiter bis
.DB 0,0,0,0,0,1
```

Dann wären die einzelnen Bits der 16-Bit-Zahl nach links herauszuschieben und, wenn es sich um eine 1 handelt, der entsprechende Tabellenwert per LPM zu lesen und zu den Ergebnisbytes zu addieren. Ein vergleichsweise aufwendigeres und langsameres Verfahren.

Eine dritte Möglichkeit wäre es, die fünf zu addierenden BCD-Ziffern beginnend mit 00001 durch Multiplikation mit 2 bei jedem Durchlauf zu erzeugen und mit dem Schieben der umzuwandelnden Zahl beim untersten Bit zu beginnen.

Es gibt viele Wege nach Rom, und manche sind mühsamer.

Weitere, ausgearbeitet Software zur Zahlenumwandlung gibt es im Kapitel 8.9.

8.6 Multiplikation

Dezimales Multiplizieren

Zwei 8-Bit-Zahlen sollen multipliziert werden. Man erinnere sich, wie das mit Dezimalzahlen geht:

```
    1234 * 567 = ?
--------------------------
    1234 *   7 =    8638
+  12340 *  6  =   74040
+ 123400 * 5   =  617000
--------------------------
    1234 * 567 =  699678
==========================
```

Also in Einzelschritten dezimal:

1. Wir nehmen die Zahl mit der kleinsten Ziffer mal und addieren sie zum Ergebnis.
2. Wir nehmen die Zahl mit 10 mal, dann mit der nächsthöheren Ziffer, und addieren sie zum Ergebnis.
3. Wir nehmen die Zahl mit 100 mal, dann mit der dritthöchsten Ziffer, und addieren sie zum Ergebnis.

Binäres Multiplizieren

Jetzt in Binär: Das Malnehmen mit den Ziffern entfällt, weil es ja nur Null oder Eins gibt, also entweder wird die Zahl addiert oder eben nicht. Das Malnehmen mit 10 wird in binär zum Malnehmen mit 2, weil wir ja nicht mit Basis 10 sondern mit Basis 2 rechnen. Malnehmen mit 2 ist aber ganz einfach: man kann die Zahl einfach mit sich selbst addieren oder binär nach links schieben und rechts eine binäre Null dazu schreiben. Man sieht schon, dass das binäre Multiplizieren viel einfacher ist als das dezimale Multiplizieren. Man fragt sich, warum die Menschheit so ein schrecklich kompliziertes Dezimalsystem erfinden musste und nicht beim binären System verweilt ist.

AVR-Assemblerprogramm

Die rechentechnische Umsetzung in AVR-Assembler-Sprache zeigt der Quelltext.

```
; Mult8.asm multipliziert zwei 8-Bit-Zahlen
; zu einem 16-Bit-Ergebnis
.NOLIST
.INCLUDE "C:\avrtools\appnotes\8515def.inc"
.LIST
; Ablauf des Multiplizierens:
; 1.Multiplikator 2 wird bitweise nach rechts in das Carry-Bit geschoben.
;   Wenn es eine Eins ist, dann wird die Zahl in Multiplikator 1 zum Ergebnis dazu gezählt,
;   wenn es eine Null ist, dann nicht.
; 2.Nach dem Addieren wird Multiplikator 1 durch Links schieben mit 2 multipliziert.
; 3.Wenn Multiplikator 2 nach dem Schieben nicht Null ist, dann wird wie oben weiter
;   gemacht. Wenn er Null ist, ist die Multiplikation beendet.
; Benutzte Register
.DEF rm1 = R0 ; Multiplikator 1 (8 Bit)
.DEF rmh = R1 ; Hilfsregister für Multiplikation
.DEF rm2 = R2 ; Multiplikator 2 (8 Bit)
```

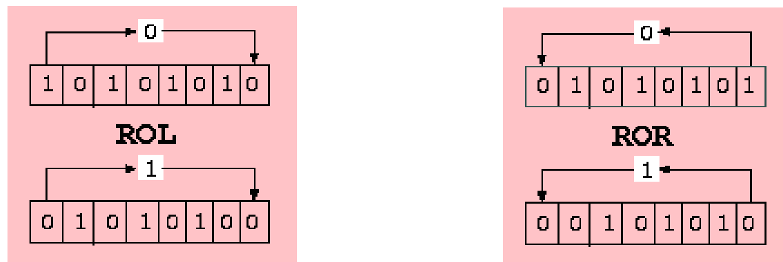
```
.DEF rel = R3 ; Ergebnis, LSB (16 Bit)
.DEF reh = R4 ; Ergebnis, MSB
.DEF rmp = R16 ; Hilfsregister zum Laden
;
.CSEG
.ORG 0000
        rjmp START
START:
        ldi rmp,0xAA ; Beispielzahl 1010.1010
        mov rm1,rmp  ; in erstes Multiplikationsregister
        ldi rmp,0x55 ; Beispielzahl 0101.0101
        mov rm2,rmp  ; in zweites Multiplikationsregister
; Hier beginnt die Multiplikation der beiden Zahlen
; in rm1 und rm2, das Ergebnis ist in reh:rel (16 Bit)
MULT8:
; Anfangswerte auf Null setzen
        clr rmh ; Hilfsregister leeren
        clr rel ; Ergebnis auf Null setzen
        clr reh
; Hier beginnt die Multiplikationsschleife
MULT8a:
; Erster Schritt: Niedrigstes Bit von Multplikator 2
; in das Carry-Bit schieben (von links Nullen nachschieben)
        clc ; Carry-Bit auf Null setzen
        ror rm2 ; Null links rein, alle Bits eins rechts,
                ; niedrigstes Bit in Carry schieben
; Zweiter Schritt: Verzweigen je nachdem ob eine Null oder
; eine Eins im Carry steht
        brcc MULT8b ; springe, wenn niedrigstes Bit eine
                    ; Null ist, über das Addieren hinweg
; Dritter Schritt: Addiere 16 Bits in rmh:rm1 zum Ergebnis
; in reh:rel (mit Überlauf der unteren 8 Bits!)
        add rel,rm1 ; addiere LSB von rm1 zum Ergebnis
        adc reh,rmh ; addiere Carry und MSB von rm1
MULT8b:
; Vierter Schritt: Multipliziere Multiplikator rmh:rm1 mit
; Zwei (16-Bit, links schieben)
        clc ; Carry bit auf Null setzen
        rol rm1 ; LSB links schieben (multiplik. mit 2)
        rol rmh ; Carry in MSB und MSB links schieben
; Fünfter Schritt: Prüfen, ob noch Einsen im Multi-
; plikator 2 enthalten sind, wenn ja, dann weitermachen
        tst rm2 ; alle bits Null?
        brne MULT8a ; wenn nicht null, dann weitermachen
; Ende der Multiplikation, Ergebnis in reh:rel
; Endlosschleife
LOOP:
        rjmp loop
```

Zu Beginn der Berechnung liegen die folgenden Bedingungen vor:

	rmh = R1 = 0x00								***rm1 = R0 = 0xAA***							
Z1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
*									***rm2 = R2 = 0x55***							
Z2									0	1	0	1	0	1	0	1
=	***reh = R4 = 0x00***								***rel = R3 = 0x00***							
Erg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Binäres Rotieren

Für das Verständnis der Berechnung ist die Kenntnis der Assembler-Instruktionen ROL bzw ROR wichtig. Die Instruktion verschiebt die Bits eines Registers nach links (ROL) bzw. rechts (ROR), schiebt das Carry-Bit aus dem Statusregister in die leer werdende Position im Register und schiebt dafür das beim Rotieren herausfallende Bit in das Carry-Flag. Dieser Vorgang wird für das Linksschieben mit dem Inhalt des Registers von 0xAA, für das Rechtsschieben mit 0x55 gezeigt:



Multiplikation im Studio

```
AVR Studio - Mult8.asm
File Edit Project Debug Breakpoints Trace & triggers Watch Options View Tools Window Help
Mult8.asm
.DEF rel = R3 ; Ergebnis, LSB (16 Bit)
.DEF reh = R4 ; Ergebnis, MSB
.DEF rmp = R16 ; Hilfsregister zum Laden
;
.CSEG
.ORG 0000
;
        rjmp START
;
START:
        ldi rmp,0xAA ; Beispielzahl 1010.1010
        mov rm1,rmp  ; in erstes Multiplikationsreg
        ldi rmp,0x55 ; Beispielzahl 0101.0101
        mov rm2,rmp  ; in zweites Multiplikationsreg
;
; Hier beginnt die Multiplikation der beiden Zahlen
; in rm1 und rm2, das Ergebnis ist in reh:rel (16 Bit)
;
MULT8:
;
; Anfangswerte auf Null setzen
        clr rmh ; Hilfsregister leeren
Simulator  AT90S8515  Ln 32, Col 1  NUM
```

Die folgenden Bilder zeigen die einzelnen Schritte im Studio:

Der Object-Code ist gestartet, der Cursor steht auf der ersten Instruktion. Mit F11 machen wir Einzelschritte.

```
AVR Studio - Mult8.asm
File Edit Project Debug Breakpoints Trace & triggers Watch Options View Tools Window Help
Mult8.asm
;
        rjmp START
;
START:
        ldi rmp,0xAA ; Beispielzahl 1010.1010
        mov rm1,rmp  ; in erstes Multiplikationsreg
        ldi rmp,0x55 ; Beispielzahl 0101.0101
        mov rm2,rmp  ; in zweites Multiplikationsreg
;
; Hier beginnt die Multiplikation der beiden Zahlen
; in rm1 und rm2, das Ergebnis ist in reh:rel (16 Bit)
;
MULT8:
;
; Anfangswerte auf Null setzen
        clr rmh ; Hilfsregister leeren
        clr rel ; Ergebnis auf Null setzen
        clr reh
;
; Hier beginnt die Multiplikationsschleife
;
MULT8a:

Registers
R0  = 0xAA  R17 = 0x00
R1  = 0x00  R18 = 0x00
R2  = 0x55  R19 = 0x00
R3  = 0x00  R20 = 0x00
R4  = 0x00  R21 = 0x00
R5  = 0x00  R22 = 0x00
R6  = 0x00  R23 = 0x00
R7  = 0x00  R24 = 0x00
R8  = 0x00  R25 = 0x00
R9  = 0x00  R26 = 0x00
R10 = 0x00  R27 = 0x00
R11 = 0x00  R28 = 0x00
R12 = 0x00  R29 = 0x00
R13 = 0x00  R30 = 0x00
R14 = 0x00  R31 = 0x00
R15 = 0x00
R16 = 0x55
Simulator  AT90S8515  Ln 46, Col 1  NUM
```

In die Register R0 und R2 werden die beiden Werte AA und 55 geschrieben, die wir multiplizieren wollen.

R2 wurde nach rechts geschoben, um das niedrigste Bit in das Carry-Bit zu schieben. Aus 55 (0101.0101) ist 2A geworden (0010.1010), die rechteste 1 liegt im Carry-Bit des Status-Registers herum.

Weil im Carry eine Eins war, wird 00AA in den Registern R1:R0 zu dem (leeren) Registerpaar R4:R3 hinzu addiert. 00AA steht nun auch dort herum.

Jetzt muss das Registerpaar R1:R0 mit sich selbst addiert oder in unserem Fall einmal nach links geschoben werden. Aus 00AA (0000.0000.1010.1010) wird jetzt 0154 (0000.0001.0101.0100), weil wir von rechts eine Null hinein geschoben haben.

Die gesamte Multiplikation geht solange weiter, bis alle Einsen in R2 durch das Rechtsschieben herausgeflogen sind. Die Zahl ist dann fertig multipliziert, wenn nur noch Nullen in R2 stehen. Die weiteren Schritte sind nicht mehr abgebildet.

Mit F5 haben wir im Simulator den Rest durchlaufen lassen und sind am Ausgang der Multiplikationsroutine angelangt, wo wir einen Breakpoint gesetzt hatten. Das Ergebnisregister R4:R3 enthält nun den Wert 3872, das Ergebnis der Multiplikation von AA mit 55.

Das war sicherlich nicht schwer, wenn man sich die Rechengänge von Dezimal in Binär übersetzt. Binär ist viel einfacher als Dezimal!

8.7 Division

Dezimales Dividieren

Zunächst wieder eine dezimale Division, damit das besser verständlich wird. Nehmen wir an, wir wollen 5678 durch 12 teilen. Das geht dann etwa so:

```
             5678 : 12 = ?
--------------------------
- 4 * 1200 = 4800
           ------
=             878
- 7 *  120 =  840
            -----
=              38
- 3 *   12 =   36
              ---
=               2
Ergebnis: 5678 : 12 = 473 Rest 2
================================
```

Binäres Dividieren

Binär entfällt wieder das Multiplizieren des Divisors (4 * 1200, etc.), weil es nur Einsen und Nullen gibt. Dafür haben binäre Zahlen leider sehr viel mehr Stellen als dezimale. Die direkte Analogie wäre in diesem Fall etwas aufwändig, weshalb die rechentechnische Lösung etwas anders aussieht.

Die Division einer 16-Bit-Zahl durch eine 8-Bit-Zahl in AVR Assembler ist hier als Quellcode gezeigt.

Assembler Quellcode der Division

```
; Div8 dividiert eine 16-Bit-Zahl durch eine 8-Bit-Zahl
; Test: 16-Bit-Zahl: 0xAAAA, 8-Bit-Zahl: 0x55
.NOLIST
.INCLUDE "C:\avrtools\appnotes\8515def.inc"
.LIST
; Registers
.DEF rd1l = R0 ; LSB Divident
```

```
.DEF rd1h = R1 ; MSB Divident
.DEF rd1u = R2 ; Hifsregister
.DEF rd2  = R3 ; Divisor
.DEF rel  = R4 ; LSB Ergebnis
.DEF reh  = R5 ; MSB Ergebnis
.DEF rmp  = R16; Hilfsregister zum Laden
.CSEG
.ORG 0
        rjmp start
start:
; Vorbelegen mit den Testzahlen
        ldi rmp,0xAA ; 0xAAAA in Divident
        mov rd1h,rmp
        mov rd1l,rmp
        ldi rmp,0x55 ; 0x55 in Divisor
        mov rd2,rmp
; Divieren von rd1h:rd1l durch rd2
div8:
        clr rd1u ; Leere Hilfsregister
        clr reh  ; Leere Ergebnisregister
        clr rel  ; (Ergebnisregister dient auch als
        inc rel  ; Zähler bis 16! Bit 1 auf 1 setzen)
; Hier beginnt die Divisionsschleife
div8a:
        clc      ; Carry-Bit leeren
        rol rd1l ; nächsthöheres Bit des Dividenten
        rol rd1h ; in das Hilfsregister rotieren
        rol rd1u ; (entspricht Multipliklation mit 2)
        brcs div8b ; Eine 1 ist herausgerollt, ziehe ab
        cp rd1u,rd2 ; Divisionsergebnis 1 oder 0?
        brcs div8c  ; Überspringe Subtraktion, wenn kleiner
div8b:
        sub rd1u,rd2; Subtrahiere Divisor
        sec      ; Setze carry-bit, Ergebnis ist eine 1
        rjmp div8d  ; zum Schieben des Ergebnisses
div8c:
        clc      ; Lösche carry-bit, Ergebnis ist eine 0
div8d:
        rol rel  ; Rotiere carry-bit in das Ergebnis
        rol reh
        brcc div8a  ; solange Nullen aus dem Ergebnis
                    ; rotieren: weitermachen
; Ende der Division erreicht
stop:
        rjmp stop   ; Endlosschleife
```

Programmschritte beim Dividieren

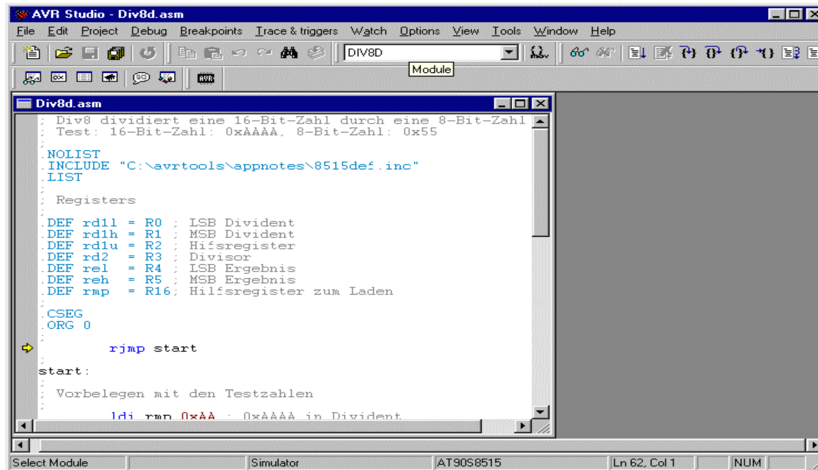
Das Programm gliedert sich in folgende Teilschritte:

- Definieren und Vorbelegen der Register mit den Testzahlen,
- das Vorbelegen von Hilfsregistern (die beiden Ergebnisregister werden mit 0x0001 vorbelegt, um das Ende der Division nach 16 Schritten elegant zu markieren!),
- die 16-Bit-Zahl in rd1h:rd1l wird bitweise in ein Hilfsregister rd1u geschoben (mit 2 multipliziert), rollt dabei eine 1 links heraus, dann wird auf jeden Fall zur Subtraktion im vierten Schritt verzweigt,
- der Inhalt des Hilfsregisters wird mit der 8-Bit-Zahl in rd2 verglichen, ist das Hilfsregister größer wird die 8-Bit-Zahl subtrahiert und eine Eins in das Carry-Bit gepackt, ist es kleiner dann wird nicht subtrahiert und eine Null in das Carry-Bit gepackt,

- der Inhalt des Carry-Bit wird in die Ergebnisregister reh:rel von rechts einrotiert,
- rotiert aus dem Ergebnisregister eine Null links heraus, dann muss weiter dividiert werden und ab Schritt 3 wird wiederholt (insgesamt 16 mal), rollt eine 1 heraus, dann sind wir fertig.

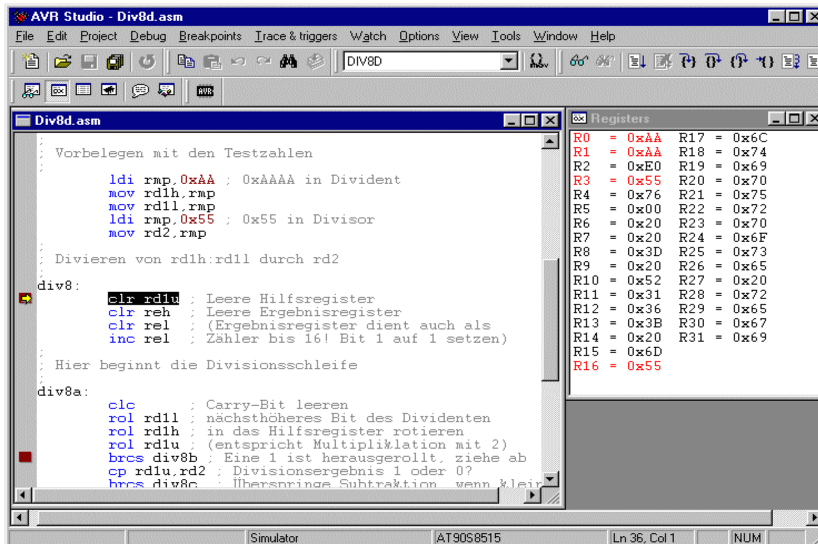
Für das Rotieren gilt das oben dargestellte Procedere (siehe oben, zum Nachlesen).

Das Dividieren im Simulator

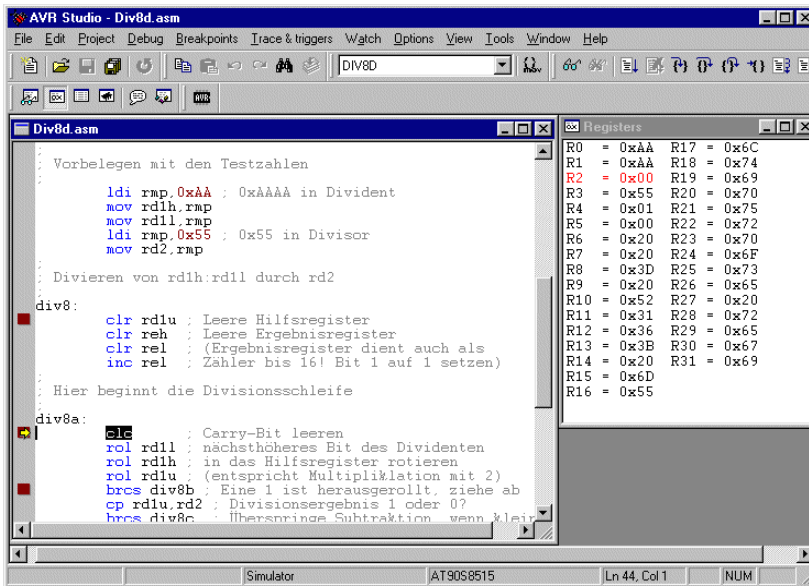


Die folgenden Bilder zeigen die Vorgänge im Simulator, dem Studio. Dazu wird der Quellcode assembliert und die Object-Datei in das Studio geladen.

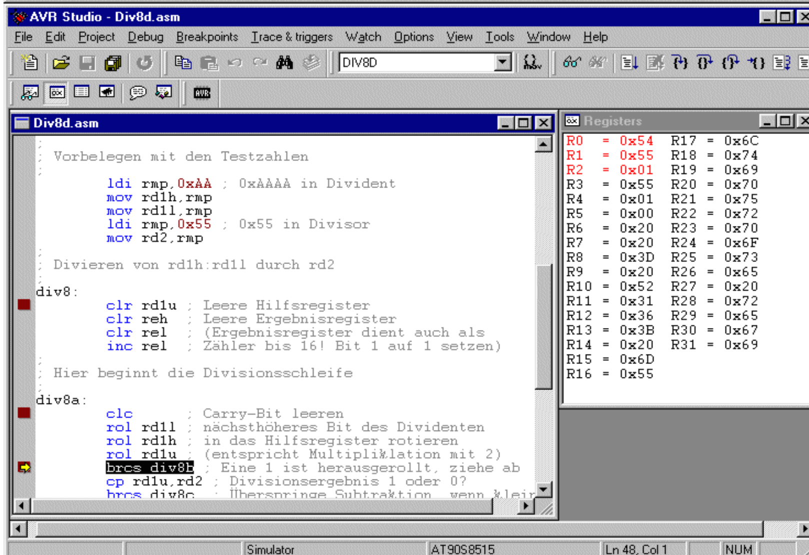
Der Object-Code ist gestartet, der Cursor steht auf der ersten Instruktion. Mit F11 machen wir Einzelschritte.



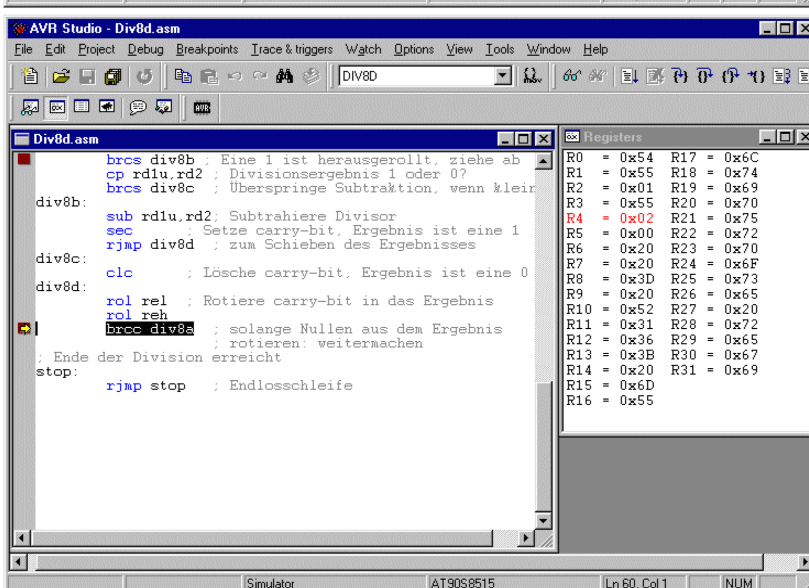
In die Register R0, R1 und R3 werden die beiden Werte 0xAAAA und 0x55 geschrieben, die wir dividieren wollen.



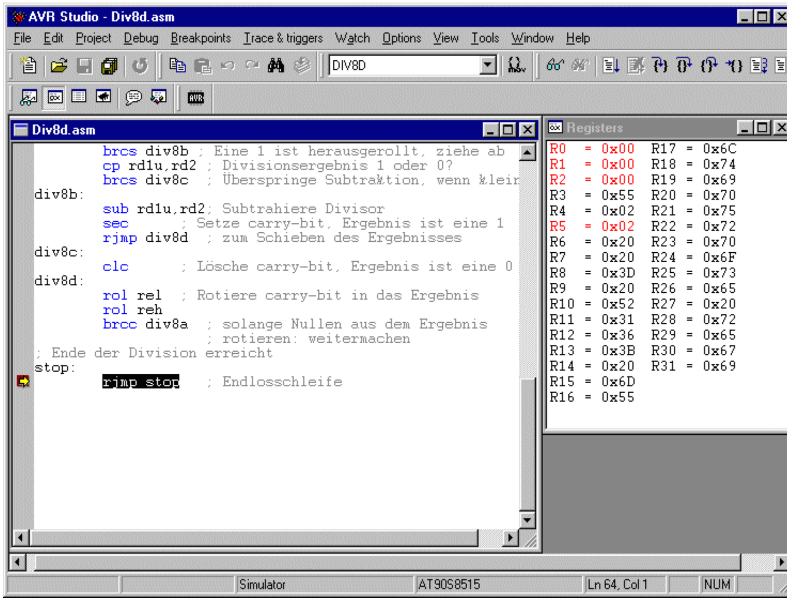
Die Startwerte für das Hilfsregister werden gesetzt, das Ergebnisregisterpaar wurde auf 0x0001 gesetzt.



R1:R0 wurde nach links in Hilfsregister R2 geschoben, aus 0xAAAA ist 0x015554 entstanden.



Weil 0x01 in R2 kleiner als 0x55 in R3 ist, wurde das Subtrahieren übersprungen, eine Null in das Carry gepackt und in R5:R4 geschoben. Aus der ursprünglichen 1 im Ergebnisregister R5:R4 ist durch das Linksrotieren 0x0002 geworden. Da eine Null in das Carry herausgeschoben wurde, geht die nächste Instruktion (BRCC) mit einem Sprung zur Marke div8a und die Schleife wird wiederholt.



Nach dem 16-maligen Durchlaufen der Schleife gelangen wir schließlich an die Endlosschleife am Ende der Division. Im Ergebnisregister R5:R4 steht nun das Ergebnis der Division von 0xAAAA durch 0x55, nämlich 0x0202. Die Register R2:R1:R0 sind leer, es ist also kein Rest geblieben. Bliebe ein Rest, könnten wir ihn mit zwei multiplizieren und mit der 8-Bit-Zahl vergleichen, um das Ergebnis vielleicht noch aufzurunden. Aber das ist hier nicht programmiert.

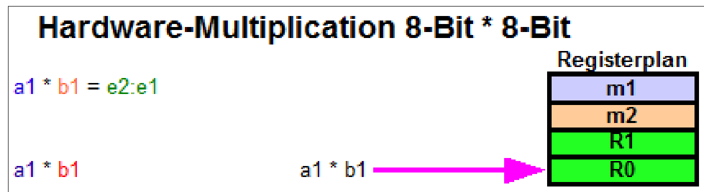
Im Prozessor-View sehen wir nach Ablauf des gesamten Divisionsprozesses immerhin 60 Mikrosekunden Prozessorzeit verbraucht.

8.8 Binäre Hardware-Multiplikation

Alle ATmega, AT90CAN and AT90PWM haben einen Multiplikator an Bord, der 8- mal 8-Bit-Multiplikationen in nur zwei Taktzyklen durchführt. Wenn also Multiplikationen durchgeführt werden müssen und man sicher ist, dass die Software niemals in einem AT90S- oder ATtiny-Prozessor laufen werden muss, sollte man diese schnelle Hardware-Möglichkeit nutzen. Diese folgenden Seiten zeigen, wie man das macht.

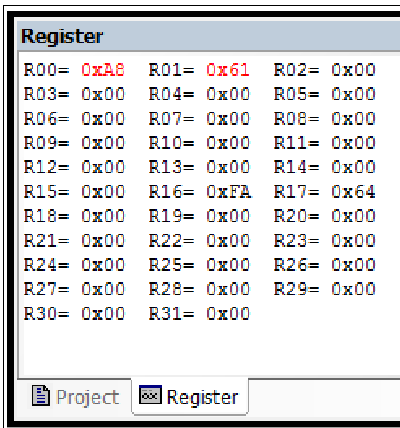
Hardware Multiplikation von 8-mal-8-Bit Binärzahlen

Diese Aufgabe ist einfach und direkt. Wenn die zwei Binärzahlen in den Registern R16 und R17 stehen, dann muss man nur folgende Instruktion eingeben: mul R16,R17 Weil das Ergebnis der Multiplikation bis zu 16 Bit lange Zahlen ergibt, ist das Ergebnis in den Registern R1 (höherwertiges Byte) und R0 (niedrigerwertiges Byte) untergebracht. Das war es auch schon.

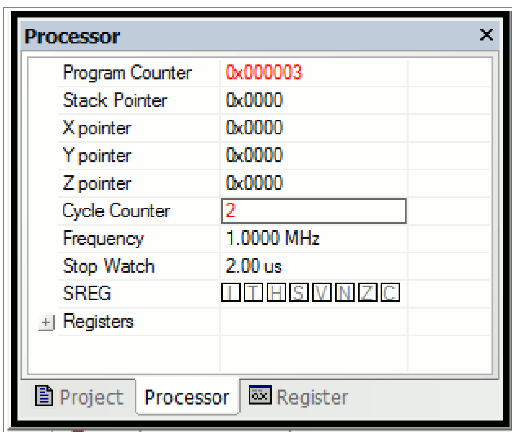



```
;
; Tests 8-by-8-bit hardware multiplication with ATmega8
;
; Define Registers
;
.def ResL = R0
.def ResM = R1
.def m1 = R16
.def m2 = R17
;
; Load multiplicators
;
    ldi m1,250
    ldi m2,100
;
; Perform multiplication
;
    mul m1,m2
;
; 16-bit result is in R1:R0
;
```

Das Programm demonstriert die Simulation im Studio. Es multipliziert dezimal 250 (hex FA) mit dezimal 100 (hex 64) in den Registern R16 und R17.



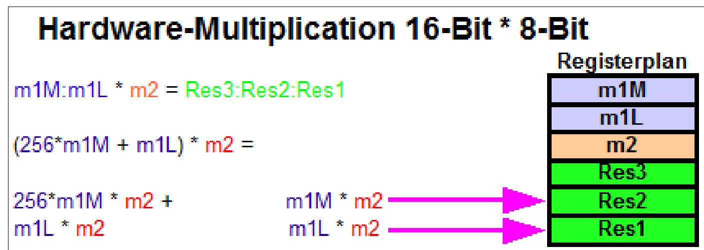
Die Register R0 (LSB) und R1 (MSB) enthalten das Ergebnis hex 61A8 oder dezimal 25,000.



Und: ja, die Multiplikation braucht bloß zwei Zyklen, oder 2 Mikrosekunden bei einem Takt von einem MHz.

Hardware Multiplikation von 16- mit 8-Bit-Zahl

Sind größere Zahlen zu multiplizieren? Die Hardware ist auf 8 Bit beschränkt, also müssen wir ersatzweise einige geniale Ideen anwenden. Das ist an diesem Beispiel 16 mal 8 gezeigt. Verstehen des Konzepts hilft bei der Anwendung der Methode und es ist ein leichtes, das später auf die 32- mit 64-Bit-Multiplikation zu übertragen.



Zuerst die Mathematik: eine 16-Bit-Zahl lässt sich in zwei 8-Bit-Zahlen auftrennen, wobei die höherwertige der beiden Zahlen mit dezimal 256 oder hex 100 mal genommen wird. Für die, die eine Erinnerung brauchen: die Dezimalzahl 1234 kann man auch als die Summe aus (12*100) und 34 betrachten, oder auch als die Summe aus (1*1000), (2*100), (2*10) und 4. Die 16-Bit-Binärzahl m1 ist also gleich 256*m1M plus m1L, wobei m1M das MSB und m1L das LSB ist.

Multiplikation dieser Zahl mit der 8-Bit-Zahl m2 ist also mathematisch ausgedrückt:

$$m1 * m2 = (256*m1M + m1L) * m2 = 256*m1M*m2 + m1L*m2$$

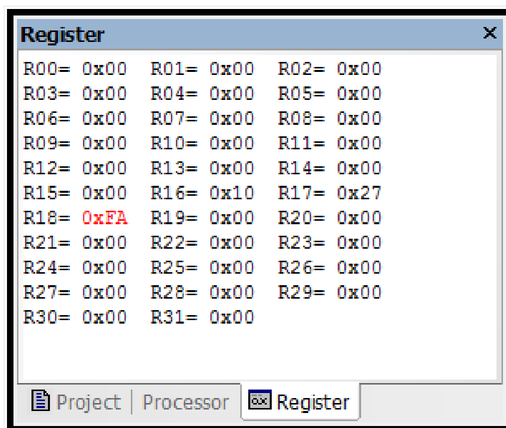
Wir müssen also lediglich zwei Multiplikationen durchführen und die Ergebnisse addieren. Zwei Multiplikationen? Es sind doch drei * zu sehen! Für die Multiplikation mit 256 braucht man in der Binärwelt keinen Hardware-Multiplikator, weil es ausreicht, die Zahl einfach um ein Byte nach links zu rücken. Genauso wie in der Dezimalwelt eine Multiplikation mit 10 einfach ein Linksrücken um eine Stelle ist und die frei werdende leere Ziffer mit Null gefüllt wird. Beginnen wir mit einem praktischen Beispiel. Zuerst brauchen wir einige Register, um

1. die Zahlen m1 und m2 zu laden,
2. für das Ergebnis Raum zu haben, das bis zu 24 Bit lang werden kann.

```
;
; Testet Hardware Multiplikation 16-mit-8-Bit
;
; Register Definitionen:
;
.def Res1 = R2 ; Byte 1 des Ergebnisses
.def Res2 = R3 ; Byte 2 des Ergebnisses
.def Res3 = R4 ; Byte 3 des Ergebnisses
.def m1L = R16 ; LSB der Zahl m1
.def m1M = R17 ; MSB der Zahl m1
.def m2 = R18 ; die Zahl m2
```

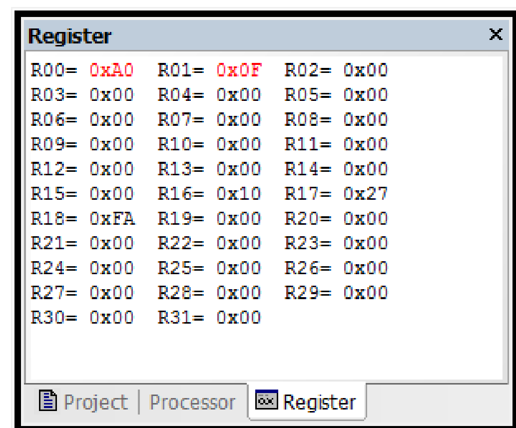
Zuerst werden die Zahlen in die Register geladen:

```
;
; Lade Register
;
.equ m1 = 10000
;
        ldi m1M,HIGH(m1) ; obere 8 Bits von m1 in m1M
        ldi m1L,LOW(m1) ; niedrigere 8 Bits von m1 in m1L
        ldi m2,250 ; 8-Bit Konstante in m2
```



Die beiden Zahlen sind in R17:R16 (dez 10000 = hex 2710) und R18 (dez 250 = hex FA) geladen.

Dann multiplizieren wir zuerst das niedrigerwertige Byte:



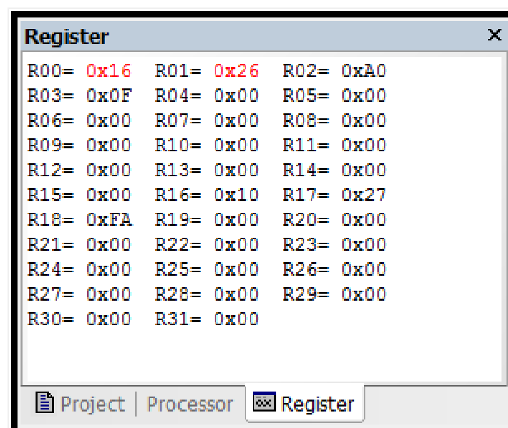

```
;
; Multiplikation
;
        mul m1L,m2 ; Multipliziere LSB
        mov Res1,R0 ; kopiere Ergebnis in Ergebnisregister
        mov Res2,R1
```

Die LSB-Multiplikation von hex 27 mit hex FA ergibt hex 0F0A, das in die Register R0 (LSB, hex A0) und R1 (MSB, hex 0F) geschrieben wurde. Das Ergebnis wird in die beiden untersten Bytes der Ergebnisregister, R3:R2, kopiert.

Nun folgt die Multiplikation des MSB mit m2:

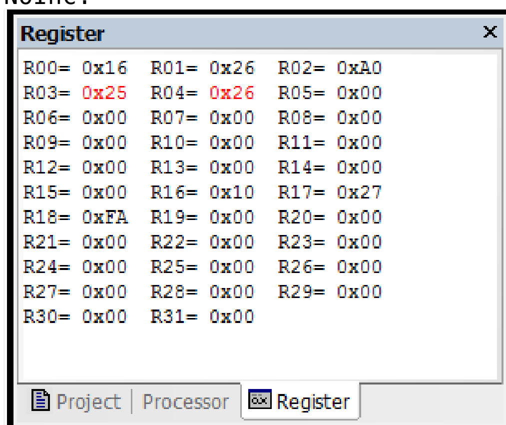
```
        mul m1M,m2 ; Multipliziere MSB
```

Die Multiplikation des MSB von m1, hex 10, mit m2, hex FA, ergibt hex 2616 in R1:R0.

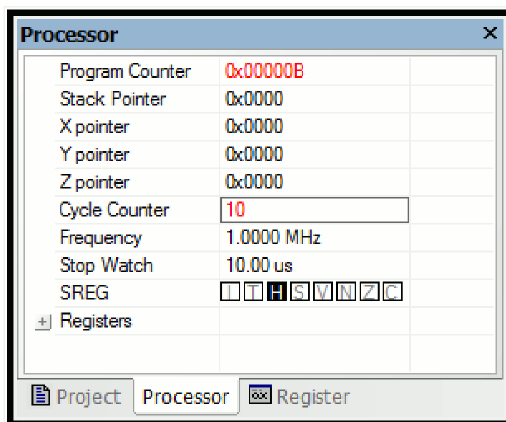


Nun werden zwei Schritte auf einmal gemacht: die Multiplikation mit 256 und die Addition des Ergebnisses zum bisherigen Ergebnis. Das wird erledigt durch Addition von R1:R0 zu Res3:Res2 anstelle von Res2:Res1. R1 wird zunächst schlicht nach Res3 kopiert. Dann wird R0 zu Res2 addiert. Falls dabei das Übertragsflag Carry nach der Addition gesetzt ist, muss noch das nächsthöhere Byte Res3 um Eins erhöht werden.

```
   mov Res3,R1 ; Kopiere MSB Ergebnis zum Byte 3
   add Res2,R0 ; Addiere LSB Ergebnis zum Byte 2
   brcc NoInc ; Wenn Carry nicht gesetzt, springe
   inc Res3 ; erhoehe Ergebnis-Byte 3
NoInc:
```



Das Ergebnis in R4:R3:R2 ist hex 2625A9, was dezimal 2500000 entspricht (wie jeder sofort weiß), und das ist korrekt.



Der Zykluszähler zeigt nach der Multiplikation auf 10, bei 1 MHz Takt sind gerade mal 10 Mikrosekunden vergangen. Sehr viel schneller als die Software-Multiplikation!

Hardware Multiplikation einer 16- mit einer 16-bit-Binärzahl

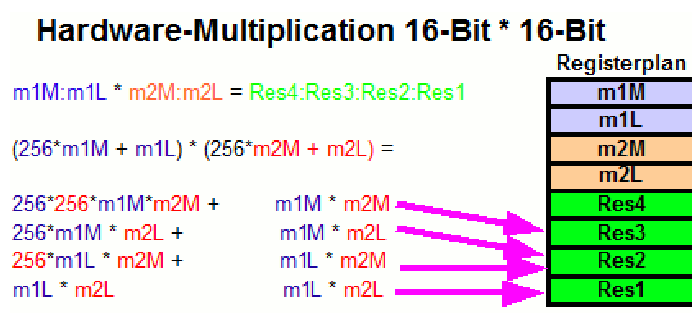
Nun, da wir das Prinzip verstanden haben, sollte es einfach sein die 16-mal-16-Multiplikation zu erledigen. Das Ergebnis benötigt jetzt vier Bytes (Res4:Res3:Res2:Res1, untergebracht in R5:R4:R3:R2). Die Formel lautet:

$$m1 * m2 =$$

$$(256*m1M + m1L) * (256*m2M + m2L) =$$

$$65536*m1M*m2M + 256*m1M*m2L + 256*m1L*m2M + m1L*m2L$$

Offensichtlich sind jetzt vier Multiplikationen zu erledigen. Wir beginnen mit den beiden einfachsten, der ersten und der letzten: ihre Ergebnisse können einfach in die Ergebnisregister kopiert werden. Die beiden mittleren Multiplikationen in der Formel müssen zu den beiden mittleren Ergebnisregistern addiert werden. Mögliche Überläufe müssen in das Ergebnisregister Res4 übertragen werden, wofür hier ein einfacher Trick angewendet wird, der einfach zu verstehen sein dürfte. Die Software:




```
;
; Test Hardware Multiplikation 16 mal 16
;
; Definiere Register
;
.def Res1 = R2
.def Res2 = R3
.def Res3 = R4
.def Res4 = R5
.def m1L = R16
.def m1M = R17
.def m2L = R18
.def m2M = R19
.def tmp = R20
;
; Lade Startwerte
;
.equ m1 = 10000
.equ m2 = 25000
;
        ldi m1M,HIGH(m1)
        ldi m1L,LOW(m1)
        ldi m2M,HIGH(m2)
        ldi m2L,LOW(m2)
;
; Multipliziere
;
        clr R20 ; leer, fuer Uebertraege
        mul m1M,m2M ; Multipliziere MSBs
        mov Res3,R0 ; Kopie in obere Ergebnisregister
        mov Res4,R1
        mul m1L,m2L ; Multipliziere LSBs
        mov Res1,R0 ; Kopie in untere Ergebnisregister
        mov Res2,R1
        mul m1M,m2L ; Multipliziere 1M mit 2L
        add Res2,R0 ; Addiere zum Ergebnis
        adc Res3,R1
        adc Res4,tmp ; Addiere Uebertrag
        mul m1L,m2M ; Multipliziere 1L mit 2M
        add Res2,R0 ; Addiere zum Ergebnis
        adc Res3,R1
        adc Res4,tmp
;
; Multiplikation fertig
;
```

Die Simulation im Studio zeigt die folgenden Schritte. Das Laden der beiden Konstanten 10000 (hex 2710) und 25000 (hex 61A8) in die Register im oberen Registerraum ...

```
Register
R00= 0x00  R01= 0x00  R02= 0x00
R03= 0x00  R04= 0x00  R05= 0x00
R06= 0x00  R07= 0x00  R08= 0x00
R09= 0x00  R10= 0x00  R11= 0x00
R12= 0x00  R13= 0x00  R14= 0x00
R15= 0x00  R16= 0x10  R17= 0x27
R18= 0xA8  R19= 0x61  R20= 0x00
R21= 0x00  R22= 0x00  R23= 0x00
R24= 0x00  R25= 0x00  R26= 0x00
R27= 0x00  R28= 0x00  R29= 0x00
R30= 0x00  R31= 0x00
Project  Register
```

```
Register
R00= 0xC7  R01= 0x0E  R02= 0x00
R03= 0x00  R04= 0xC7  R05= 0x0E
R06= 0x00  R07= 0x00  R08= 0x00
R09= 0x00  R10= 0x00  R11= 0x00
R12= 0x00  R13= 0x00  R14= 0x00
R15= 0x00  R16= 0x10  R17= 0x27
R18= 0xA8  R19= 0x61  R20= 0x00
R21= 0x00  R22= 0x00  R23= 0x00
R24= 0x00  R25= 0x00  R26= 0x00
R27= 0x00  R28= 0x00  R29= 0x00
R30= 0x00  R31= 0x00
Project  Register
```

Multiplikation der beiden MSBs (hex 27 und 61) und kopieren des Ergebnisses in R1:R0 in die beiden oberen Ergebnisregister R5:R4 (Multiplikation mit 65536 eingeschlossen) ...

```
Register
R00= 0x80  R01= 0x0A  R02= 0x80
R03= 0x0A  R04= 0xC7  R05= 0x0E
R06= 0x00  R07= 0x00  R08= 0x00
R09= 0x00  R10= 0x00  R11= 0x00
R12= 0x00  R13= 0x00  R14= 0x00
R15= 0x00  R16= 0x10  R17= 0x27
R18= 0xA8  R19= 0x61  R20= 0x00
R21= 0x00  R22= 0x00  R23= 0x00
R24= 0x00  R25= 0x00  R26= 0x00
R27= 0x00  R28= 0x00  R29= 0x00
R30= 0x00  R31= 0x00
Project  Register
```

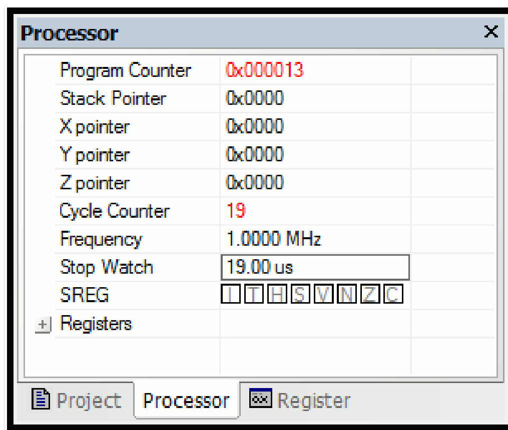
Multiplikation der beiden LSBs (hex 10 und A8) und kopieren des Ergebnisses in R1:R0 in die beiden niedrigeren Ergebnisregister R3:R2 ...

```
Register
R00= 0x98  R01= 0x19  R02= 0x80
R03= 0xA2  R04= 0xE0  R05= 0x0E
R06= 0x00  R07= 0x00  R08= 0x00
R09= 0x00  R10= 0x00  R11= 0x00
R12= 0x00  R13= 0x00  R14= 0x00
R15= 0x00  R16= 0x10  R17= 0x27
R18= 0xA8  R19= 0x61  R20= 0x00
R21= 0x00  R22= 0x00  R23= 0x00
R24= 0x00  R25= 0x00  R26= 0x00
R27= 0x00  R28= 0x00  R29= 0x00
R30= 0x00  R31= 0x00
```

Multiplikation des MSB von m1 mit dem LSB von m2, und Addition des Ergebnisses in R1:R0 zu den beiden mittleren Ergebnisregistern, kein Übertrag ist erfolgt ...

```
Register
R00= 0x10  R01= 0x06  R02= 0x80
R03= 0xB2  R04= 0xE6  R05= 0x0E
R06= 0x00  R07= 0x00  R08= 0x00
R09= 0x00  R10= 0x00  R11= 0x00
R12= 0x00  R13= 0x00  R14= 0x00
R15= 0x00  R16= 0x10  R17= 0x27
R18= 0xA8  R19= 0x61  R20= 0x00
R21= 0x00  R22= 0x00  R23= 0x00
R24= 0x00  R25= 0x00  R26= 0x00
R27= 0x00  R28= 0x00  R29= 0x00
R30= 0x00  R31= 0x00
Project  Register
```

Multiplikation des LSB von m1 mit dem MSB von m2, sowie Addition des Ergebnisses in R1:R0 mit den beiden mittleren Ergebnisbytes, kein Übertrag. Das Ergebnis ist hex 0EE6B280, was dezimal 250000000 ist und offenbar korrekt ...

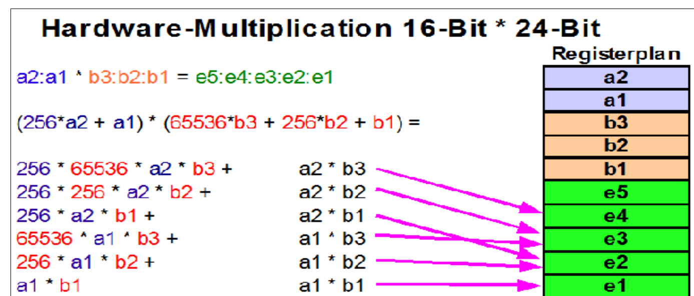


Die Multiplikation hat 19 Taktzyklen gebraucht, das ist sehr viel schneller als die Software-Multiplikation.

Ein weiterer Vorteil: die benötigte Zeit ist IMMER genau 19 Taktzyklen lang, nicht abhängig von den Zahlenwerten (wie es bei der Software-Multiplikation der Fall ist) und vom Auftreten von Überläufen (deshalb der Trick mit der Addition von Null mit Carry). Darauf kann man sich verlassen ...

Hardware Multiplikation einer 16- mit einer 24-Bit-Binärzahl

Die Multiplikation einer 16-Bit-Binärzahl "a" mit einer 24-Bit-Binärzahl "b" führt im Ergebnis zu einem maximal 40 Bit breiten Ergebnis. Das Multiplizier-Schema erfordert sechs 8-mit-8-Bit-Multiplikationen und das Addieren der Ergebnisse an der richtigen Position zum Gesamtergebnis. Der Assembler-Code dafür:




```
; Hardware Multiplikation 16 mit 24 Bit
.include "m8def.inc"
;
; Register Definitionen
.def a1 = R2 ; definiere 16-bit Register
.def a2 = R3
.def b1 = R4 ; definiere 24-bit Register
.def b2 = R5
.def b3 = R6
.def e1 = R7 ; definiere 40-bit Ergebnisregister
.def e2 = R8
.def e3 = R9
.def e4 = R10
.def e5 = R11
.def c0 = R12 ; Hilfsregister fuer Additionen
.def rl = R16 ; Laderegister
;
; Load constants
.equ a = 10000 ; Multiplikator a, hex 2710
.equ b = 1000000 ; Multiplikator b, hex 0F4240
        ldi rl,BYTE1(a) ; lade a
        mov a1,rl
        ldi rl,BYTE2(a)
        mov a2,rl
        ldi rl,BYTE1(b) ; lade b
        mov b1,rl
        ldi rl,BYTE2(b)
        mov b2,rl
        ldi rl,BYTE3(b)
        mov b3,rl
;
; Loesche Registers
        clr e1 ; Loesche Ergebnisregister
```

```
        clr e2
        clr e3
        clr e4
        clr e5
        clr c0 ; loesche Hilfsregister
;
; Multipliziere
        mul a2,b3 ; Term 1
        add e4,R0 ; addiere zum Ergebnis
        adc e5,R1
        mul a2,b2 ; Term 2
        add e3,R0
        adc e4,R1
        adc e5,c0 ; (addiere moeglichen Ueberlauf)
        mul a2,b1 ; Term 3
        add e2,R0
        adc e3,R1
        adc e4,c0
        adc e5,c0
        mul a1,b3 ; Term 4
        add e3,R0
        adc e4,R1
        adc e5,c0
        mul a1,b2 ; Term 5
        add e2,R0
        adc e3,R1
        adc e4,c0
        adc e5,c0
        mul a1,b1 ; Term 6
        add e1,R0
        adc e2,R1
        adc e3,c0
        adc e4,c0
        adc e5,c0
;
; fertig.
        nop
; Ergebnis sollte sein: hex 02540BE400
```

Die vollständige Abarbeitung braucht

- 10 Taktzyklen für das Laden der Konstanten,
- 6 Taktzyklen für das Löschen der Register, und
- 33 Taktzyklen für die Multiplikation.

8.9 Zahlenumwandlung in AVR-Assembler

Das Umwandeln von Zahlen kommt in Assembler recht häufig vor, weil der Prozessor am liebsten (und schnellsten) in binär rechnet, der dumme Mensch aber nur das Zehnersystem kann. Wer also aus einem Assemblerprogramm heraus mit Menschen an einer Tastatur kommunizieren möchte, kommt um Zahlenumwandlung nicht herum. Diese Seite befasst sich daher mit diesen Wandlungen zwischen den Zahlenwelten, und zwar etwas detaillierter und genauer.

Wer gleich in die Vollen gehen möchte, kann sich direkt in den üppig kommentierten Quelltext stürzen.

Allgemeine Bedingungen der Zahlenumwandlung

Die hier behandelten Zahlensysteme sind:

- Dezimal: Jedes Byte zu je acht Bit enthält eine Ziffer, die in ASCII formatiert ist. So repräsentiert der dezimale Wert 48, in binär $30, die Ziffer Null, 49 die Eins, usw. bis 57 die Neun. Die anderen Zahlen, mit denen ein Byte gefüllt werden kann, also 0 bis 47 und 58 bis 255, sind keine gültigen Dezimalziffern. (Warum gerade 48 die Null ist, hat mit amerikanischen Militärfernschreibern zu tun, aber das ist eine andere lange Geschichte.)
- BCD-Zahlen: BCD bedeutet Binary Coded Decimal. Es ist ähnlich wie dezimale ASCII-Zahlen, nur entspricht die BCD-dezimale Null jetzt tatsächlich dem Zahlenwert Null (und nicht 48). Dementsprechend gehen die BCDs von 0 bis 9. Alles weitere, was noch in ein Byte passen würde (10 .. 255) ist keine gültige Ziffer und gehört sich bei BCDs verboten.
- Binärzahlen: Hier gibt es nur die Ziffern 0 und 1. Von hinten gelesen besitzen sie jeweils die Wertigkeit der Potenzen von 2, also ist die Binärzahl 1011 soviel wie 1* (2 hoch 0) + 1*(2 hoch 1) + 0*(2 hoch 2) + 1*(2 hoch 3), so ähnlich wie dezimal 1234 gleich 4*(10 hoch 0) + 3*(10 hoch 1) + 2*(10 hoch 2) + 1*(10 hoch 3) ist (jede Zahl hoch 0 ist übrigens 1, nur nicht 0 hoch 0, da weiss man es nicht so genau!). Binärzahlen werden in Paketen zu je acht (als Byte bezeichnet) oder 16 (als Wort bezeichnet) Binärziffern gehandhabt, weil die einzelnen Bits kaum was wert sind.
- Hexadezimal: Hexadezimalzahlen sind eigentlich Viererpäckchen von Bits, denen man zur Vereinfachung die Ziffern 0 bis 9 und A bis F (oder a bis f) gibt und als solche meistens ASCII-verschlüsselt. A bis F deswegen, weil vier Bits Zahlen von 0 bis 15 sein können. So ist binär 1010 soviel wie 1*(2 hoch 3) + 1*(2 hoch 1), also dezimal 10, kriegt dafür den Buchstaben A. Der Buchstabe A liegt aber in der ASCII-Codetabelle beim dezimalen Wert 65, als Kleinbuchstabe sogar bei 97. Das alles ist beim Umwandeln wichtig und beim Codieren zu bedenken.

Soweit der Zahlenformatsalat. Die zum Umwandeln geschriebene Software soll einigermaßen brauchbar für verschiedene Zwecke sein. Es lohnt sich daher, vor dem Schreiben und Verwenden ein wenig Grütze zu investieren. Ich habe daher folgende Regeln ausgedacht und beim Schreiben eingehalten:

- Binärzahlen: Alle Binärzahlen sind auf 16 Bit ausgelegt (Wertebereich 0..65.535). Sie sind in den beiden Registern rBin1H (obere 8 Bit, MSB) und rBin1L (untere 8 Bit, LSB) untergebracht. Dieses binäre Wort wird mit rBin1H:L abgekürzt. Bevorzugter Ort beim AVR für die beiden ist z.B. R1 und R2, die Reihenfolge ist dabei egal. Für manche Umwandlungen wird ein zweites binäres Registerpaar gebraucht, das hier als rBin2H:L bezeichnet wird. Es kann z.B. in R3 und R4 gelegt werden. Es wird nach dem Gebrauch wieder in den Normalzustand versetzt, deshalb kann es unbesehen auch noch für andere Zwecke dienen.
- BCD- und ASCII-Zahlen: Diese Zahlen werden generell mit dem Zeiger Z angesteuert (Zeigerregister ZH:ZL oder R31:R30), weil solche Zahlen meistens irgendwo im SRAM-Speicher herumstehen. Sie sind so angeordnet, dass die höherwertigste Ziffer die niedrigste Adresse hat. Die Zahl 12345 würde also im SRAM so stehen: $0060: 1, $0061: 2, $0062: 3, usw. Der Zeiger Z kann aber auch in den Bereich der Register gestellt werden, also z.B. auf $0005. Dann läge die 1 in R5, die 2 in R6, die 3 in R7, usw. Die Software kann also die Dezimalzahlen sowohl aus dem SRAM als auch aus den Registern verarbeiten.

Aber Obacht: es wird im Registerraum unbesehen alles überschrieben, was dort herumstehen könnte. Sorgfältige Planung der Register ist dann heftig angesagt!

- Paketeinteilung: Weil man nicht immer alle Umwandlungsroutinen braucht, ist das Gesamtpaket in vier Teilpakete eingeteilt. Die beiden letzten Pakete braucht man nur für Hexzahlen, die beiden ersten zur Umrechnung von ASCII- oder BCD- zu Binär bzw. von Binär in ASCII- und BCD. Jedes Paket ist mit den darin befindlichen Unterprogrammen separat lauffähig, es braucht nicht alles eingebunden werden. Beim Entfernen von Teilen der Pakete die Aufrufe untereinander beachten! Das Gesamtpaket umfasst 217 Worte Programm.
- Fehler: Tritt bei den Zahlenumwandlungen ein Fehler auf, dann wird bei allen fehlerträchtigen Routinen das T-Flag gesetzt. Das kann mit BRTS oder BRTC bequem abgefragt werden, um Fehler in der Zahl zu erkennen, abzufangen und zu behandeln. Wer das T-Flag im Statusregister SREG noch für andere Zwecke braucht, muss alle "set"-, "clt"-, "brts"- und "brtc"-Anweisungen auf ein anderes Bit in irgendeinem Register umkodieren. Bei Fehlern bleibt der Zeiger Z einheitlich auf der Ziffer stehen, bei der der Fehler auftrat.
- Weiteres: Weitere Bedingungen gibt es im allgemeinen Teil des Quelltextes. Dort gibt es auch einen Überblick zur Zahlenumwandlung, der alle Funktionen, Aufrufbedingungen und Fehlerarten enthält.

Von ASCII nach Binär

Die Routine AscToBin2 eignet sich besonders gut für die Ermittlung von Zahlen aus Puffern. Sie überliest beliebig viele führende Leerzeichen und Nullen und bricht die Zahlenumwandlung beim ersten Zeichen ab, das keine gültige Dezimalziffer repräsentiert. Die Zahlenlänge muss deshalb nicht vorher bekannt sein, der Zahlenwert darf nur den 16-Bit-Wertebereich der Binärzahl nicht überschreiten. Auch dieser Fehler wird erkannt und mit dem T-Flag signalisiert.

Soll die Länge der Zahl exakt fünf Zeichen ASCII umfassen, kann die Routine Asc5ToBin2 verwendet werden. Hier wird jedes ungültige Zeichen, bis auf führende Nullen und Leerzeichen, angemahnt.
Die Umrechnung erfolgt von links nach rechts, d.h. bei jeder weiteren Stelle der Zahl wird das bisherige Ergebnis mit 10 multipliziert und die dazu kommende Stelle hinzugezählt. Das geht etwas langsam, weil die Multiplikation mit 10 etwas rechenaufwendig ist. Es gibt sicher schnellere Arten der Wandlung.

Von BCD zu Binär

Die Umwandlung von BCD zu Binär funktioniert ähnlich. Auf eine eingehende Beschreibung der Eigenschaften dieses Quellcodes wird daher verzichtet.

Binärzahl mit 10 multiplizieren

Diese Routine Bin1Mul10 nimmt eine 16-Bit-Binärzahl mit 10 mal, indem sie diese kopiert und durch Additionen vervielfacht. Aufwändig daran ist, dass praktisch bei jedem Addieren ein Überlauf denkbar ist und abgefangen werden muss. Wer keine zu langen Zahlen zulässt oder wem es egal ist, ob Unsinn rauskommt, kann die Branch-Anweisungen alle rauswerfen und das Verfahren damit etwas beschleunigen.

Von binär nach ASCII

Die Wandlung von Binär nach ASCII erfolgt in der Routine Bin2ToAsc5. Das Ergebnis ist generell fünfstellig. Die eigentliche Umwandlung erfolgt durch Aufruf von Bin2ToBcd5. Wie das funktioniert, wird weiter unten beschrieben.

Wird statt Bin2ToAsc5 die Routine Bin2ToAsc aufgerufen, kriegt man den Zeiger Z auf die erste Nicht-Null in der Zahl gesetzt und die Anzahl der Stellen im Register rBin2L zurück. Das ist bequem, wenn man das Ergebnis über die serielle Schnittstelle senden will und unnötigen Leerzeichen-Verkehr vermeiden will.

Von binär nach BCD

Bin2ToBcd5 rechnet die Binärzahl in rBin1H:L in dezimal um. Auch dieses Verfahren ist etwas zeitaufwändig, aber sicher leicht zu verstehen. Die Umwandlung erfolgt durch fortgesetztes Abziehen immer kleiner werdender Binärzahlen, die die dezimalen Stellen repräsentieren, also 10.000, 1.000, 100 und 10. Nur bei den Einern wird von diesem Schema abgewichen, hi.

Von binär nach Hex

Die Routine Bin2ToHex4 produziert aus der Binärzahl eine vierstellige Hex-ASCII-Zahl, die etwas leichter zu lesen ist als das Original in binär. Oder mit welcher Wahrscheinlichkeit verschreiben Sie sich beim Abtippen der Zahl 1011011001011110? Da ist B65E doch etwas bequemer und leichter zu memorieren, fast so wie 46686 in dezimal.

Die Routine produziert die Hex-Ziffern A bis F in Großbuchstaben. Wer es lieber in a .. f mag: bitte schön, Quelltext ändern.

Von Hex nach Binär

Mit Hex4ToBin2 geht es den umgekehrten Weg. Da hier das Problem der falschen Ziffern auftreten kann, ist wieder jede Menge Fehlerbehandlungscode zusätzlich nötig.

Quellcode

```
; **************************************************************************************
; * Routinen zur Zahlumwandlung, V 0.1 Januar 2002 , (C)2002 info avr-asm-tutorial.net *
; **************************************************************************************
;
; Die folgenden Regeln gelten für alle Routinen zur Zahlumwandlung:
; - Fehler während der Umwandlung werden durch ein gesetztes T-Bit im Status-Register
;   signalisiert.
; - Der Z Zeiger zeigt entweder in das SRAM (Adresse >=$0060) oder auf einen
;   Registerbereich (Adressen $0000  bis $001D), die Register R0, R16 und R30/31 dürfen
;   nicht in dem benutzten Bereich liegen!
; - ASCII- und BCD-kodierte mehrstellige Zahlen sind absteigend geordnet, d.h. Die
;   höherwertigen Ziffern haben die niedrigerwertigen Adressen.
; - 16-bit-Binärzahlen sind generell in den Registern  rBin1H:rBin1L lokalisiert, bei
;   einigen Routinen wird zusätzlich rBin2H:rBin2L verwendet. Diese müssen im
;   Hauptprogramm definiert werden.
; - Bei Binärzahlen ist die Lage im Registerbereich nicht maßgebend, sie können auf- oder
;   absteigend geordnet sein oder getrennt im Registerraum liegen. Zu vermeiden ist eine
;   Zuordnung zu R0, rmp, ZH oder ZL.
; - Register rmp (Bereich: R16..R29) wird innerhalb der Rechenroutinen benutzt, sein
;   Inhalt ist nach Rückkehr nicht definiert.
; - Das Registerpaar Z wird innerhalb von Routinen verwendet. Bei der Rückkehr ist sein
;   Inhalt abhängig vom Fehlerstatus definiert.
; - Einige Routinen verwenden zeitweise Register R0. Sein Inhalt wird vor der Rückkehr
;   wieder hergestellt.
; - Wegen der Verwendung des Z-Registers ist in jedem Fall die Headerdatei des Prozessors
;   einzubinden oder ZL (R30) und ZH (R31) sind manuell zu definieren. Wird die
;   Headerdatei oder die manuelle Definition nicht  vorgenommen, gibt es beim Assemblieren
;   eine Fehlermeldung oder es geschehen rätselhafte Dinge.
; - Wegen der Verwendung von Unterroutinen muss der Stapelzeiger (SPH:SPL bzw. SPL bei
;   mehr als 256 Byte SRAM) initiiert sein.
;
;
;
```

```
; ************* Überblick über die Routinen **********************
; Routine    Aufruf       Bedingungen          Rückkehr,Fehler
; --------------------------------------------------------------
; AscToBin2  Z zeigt auf  Beendet beim ersten  16-bit-Bin
;            erstes       Zeichen, das nicht   rBin1H:L,
;            ASCII-       einer Dezimalziffer  Überlauf-
;            Zeichen      entspricht, über-    fehler
;                         liest Leerzeichen
;                         und führende Nullen
; Asc5ToBin2 Z zeigt auf  Benötigt exakt 5     16-bit-Bin
;            erstes       gültige Ziffern,     rBin1H:L,
;            ASCII-       überliest Leerzei-   Überlauf
;            Zeichen      chen und Nullen      oder ungül-
;                                              tige Ziffern
; Bcd5ToBin2 Z zeigt auf  Benötigt exakt 5     16-bit-Bin
;            5-stellige   gültige Ziffern      rBin1H:L
;            BCD-Zahl                          Überlauf
;                                              oder ungül-
;                                              tige Ziffern
; Bin2ToBcd5 16-bit-Bin   Z zeigt auf erste    5-digit-BCD
;            in rBin1H:L  BCD-Ziffer (auch     ab Z, keine
;                         nach Rückkehr)       Fehler
; Bin2ToHex4 16-bit-Bin   Z zeigt auf erste    4-stellige
;            in rBin1H:L  Hex-ASCII-Stelle,    Hex-Zahl ab
;                         Ausgabe A...F        Z, keine
;                                              Fehler
; Hex4ToBin2 4-digit-Hex  Benötigt exakt vier  16-bit-Bin
;            Z zeigt auf  Stellen Hex-ASCII,   rBin1H:L,
;            erste Stelle akzeptiert A...F und ungültige
;                         a...f                Hex-Ziffer
; ******************* Umwandlungscode **********************
;
; Paket I: Von ASCII bzw. BCD nach Binär
; AscToBin2
; =========
; wandelt eine ASCII-kodierte Zahl in eine 2-Byte-/16-Bit- Binärzahl um.
; Aufruf: Z zeigt auf erste Stelle der umzuwandelnden Zahl, die Umwandlung wird bei der
;         ersten nicht dezimalen Ziffer beendet.
; Stellen: Zulässig sind alle Zahlen, die innerhalb des Wertebereiches von 16 Bit binär
;         liegen (0..65535).
; Rückkehr: Gesetztes T-Flag im Statusregister zeigt Fehler an.
;   T=0: Zahl in rBin1H:L ist gültig, Z zeigt auf erstes Zeichen, das keiner Dezimalziffer
;        entsprach
;   T=1: Überlauffehler (Zahl zu groß), rBin1H:L undefiniert, Z zeigt auf Zeichen, bei
;        dessen Verarbeitung der Fehler auftrat.
; Benötigte Register: rBin1H:L (Ergebnis), rBin2H:L (wieder  hergestellt), rmp
; Benötigte Unterroutinen: Bin1Mul10
AscToBin2:
        clr rBin1H ; Ergebnis auf Null setzen
        clr rBin1L
        clt ; Fehlerflagge zurücksetzen
AscToBin2a:
        ld rmp,Z+ ; lese Zeichen
        cpi rmp,' ' ; ignoriere führende Leerzeichen ...
        breq AscToBin2a
        cpi rmp,'0' ; ... und Nullen
        breq AscToBin2a
AscToBin2b:
        subi rmp,'0' ; Subtrahiere ASCII-Null
        brcs AscToBin2d ; Ende der Zahl erkannt
        cpi rmp,10 ; prüfe Ziffer
```

```
        brcc AscToBin2d ; Ende der Umwandlung
        rcall Bin1Mul10 ; Binärzahl mit 10 malnehmen
        brts AscToBin2c ; Überlauf, gesetztes T-Flag
        add rBin1L,rmp ; Addiere Ziffer zur Binärzahl
        ld rmp,Z+ ; Lese schon mal nächstes Zeichen
        brcc AscToBin2b ; Kein Überlauf ins MSB
        inc rBin1H ; Überlauf ins nächste Byte
        brne AscToBin2b ; Kein Überlauf ins nächste Byte
        set ; Setze Überlauffehler-Flagge
AscToBin2c:
        sbiw ZL,1 ; Überlauf trat bei letztem Zeichen auf
AscToBin2d:
        ret ; fertig, Rückkehr
;
; Asc5ToBin2
; ==========
; wandelt eine fünfstellige ASCII-kodierte Zahl in 2-Byte-Binärzahl um.
; Aufruf: Z zeigt auf erste Stelle der ASCII-kodierten Zahl, führende Leerzeichen und
;         Nullen sind erlaubt.
; Stellen: Die Zahl muss exakt 5 gültige Stellen haben.
; Rückkehr: T-Flag zeigt Fehlerbedingung an:
;   T=0: Binärzahl in rBin1H:L ist gültig, Z zeigt auf erste Stelle der ASCII-kodierten
;        Zahl.
;   T=1: Fehler bei der Umwandlung. Entweder war die Zahl zu groß (0..65535, Z zeigt auf
;        die Ziffer, bei der der Überlauf auftrat) oder sie enthilt ein ungültiges Zeichen
;        (Z zeigt auf das ungültige Zeichen).
; Benötigte Register: rBin1H:L (Ergebnis), R0 (wiederhergestellt), rBin2H:L (wieder
;   hergestellt), rmp
; Aufgerufene Unterroutinen: Bin1Mul10
;
Asc5ToBin2:
        push R0 ; R0 wird als Zähler verwendet, retten
        ldi rmp,6 ; Fünf Ziffern, einer zu viel
        mov R0,rmp ; in Zählerregister R0
        clr rBin1H ; Ergebnis auf Null setzen
        clr rBin1L
        clt ; Fehlerflagge T-Bit zurücksetzen
Asc5ToBin2a:
        dec R0 ; Alle Zeichen leer oder Null?
        breq Asc5ToBin2d ; Ja, beenden
        ld rmp,Z+ ; Lese nächstes Zeichen
        cpi rmp,' ' ; überlese Leerzeichen
        breq Asc5ToBin2a ; geh zum nächsten Zeichen
        cpi rmp,'0' ; überlese führende Nullen
        breq Asc5ToBin2a ; geh zum nächsten Zeichen
Asc5ToBin2b:
        subi rmp,'0' ; Behandle Ziffer, ziehe ASCII-0 ab
        brcs Asc5ToBin2e ; Ziffer ist ungültig, raus
        cpi rmp,10 ; Ziffer größer als neun?
        brcc Asc5ToBin2e ; Ziffer ist ungültig, raus
        rcall Bin1Mul10 ; Multipliziere Binärzahl mit 10
        brts Asc5ToBin2e ; Überlauf, raus
        add rBin1L,rmp ; addiere die Ziffer zur Binärzahl
        ld rmp,z+ ; lese schon mal das nächste Zeichen
        brcc Asc5ToBin2c ; Kein Überlauf in das nächste Byte
        inc rBin1H ; Überlauf in das nächste Byte
        breq Asc5ToBin2e ; Überlauf auch ins übernächste Byte
Asc5ToBin2c:
        dec R0 ; Verringere Zähler für Anzahl Zeichen
        brne Asc5ToBin2b ; Wandle weitere Zeichen um
Asc5ToBin2d: ; Ende der ASCII-kodierten Zahl erreicht
```

```
        sbiw ZL,5 ; Stelle die Startposition in Z wieder her
        pop R0 ; Stelle Register R0 wieder her
        ret ; Kehre zurück
Asc5ToBin2e: ; Letztes Zeichen war ungültig
        sbiw ZL,1 ; Zeige mit Z auf ungültiges Zeichen
        pop R0 ; Stelle Register R0 wieder her
        set ; Setze T-Flag für Fehler
        ret ; und kehre zurück
; Bcd5ToBin2
; ==========
; wandelt eine 5-bit-BCD-Zahl in eine 16-Bit-Binärzahl um
; Aufruf: Z zeigt auf erste Stelle der BCD-kodierten Zahl
; Stellen: Die Zahl muss exakt 5 gültige Stellen haben.
; Rückkehr: T-Flag zeigt Fehlerbedingung an:
;   T=0: Binärzahl in rBin1H:L ist gültig, Z zeigt auf erste Stelle der BCD-kodierten
         Zahl.
;   T=1: Fehler bei der Umwandlung. Entweder war die Zahl zu groß (0..65535, Z zeigt auf
;        die Ziffer, bei der der Überlauf auftrat) oder sie enthielt ein ungültiges
;        Zeichen (Z zeigt auf das ungültige Zeichen).
; Benötigte Register: rBin1H:L (Ergebnis), R0 (wiederhergestellt), rBin2H:L (wieder
;        hergestellt), rmp
; Aufgerufene Unterroutinen: Bin1Mul10
;
Bcd5ToBin2:
        push R0 ; Rette Register R0
        clr rBin1H ; Setze Ergebnis Null
        clr rBin1L
        ldi rmp,5 ; Setze Zähler auf 5 Ziffern
        mov R0,rmp ; R0 ist Zähler
        clt ; Setze Fehlerflagge zurück
Bcd5ToBin2a:
        ld rmp,Z+ ; Lese BCD-Ziffer
        cpi rmp,10 ; prüfe ob Ziffer korrekt
        brcc Bcd5ToBin2c ; ungültige BCD-Ziffer
        rcall Bin1Mul10 ; Multipliziere Ergebnis mit 10
        brts Bcd5ToBin2c ; Überlauf aufgetreten
        add rBin1L,rmp ; Addiere Ziffer
        brcc Bcd5ToBin2b ; Kein Überlauf ins nächste Byte
        inc rBin1H ; Überlauf ins nächste Byte
        breq Bcd5ToBin2c ; Überlauf ins übernächste Byte
Bcd5ToBin2b:
        dec R0 ; weitere Ziffer?
        brne Bcd5ToBin2a ; Ja
        pop R0 ; Stelle Register wieder her
        sbiw ZL,5 ; Setze Zeiger auf erste Stelle der BCD-Zahl
        ret ; Kehre zurück
Bcd5ToBin2c:
        sbiw ZL,1 ; Eine Ziffer zurück
        pop R0 ; Stelle Register wieder her
        set ; Setze T-flag, Fehler
        ret ; Kehre zurück
;
; Bin1Mul10
; =========
; Multipliziert die 16-Bit-Binärzahl mit 10
; Unterroutine benutzt von AscToBin2, Asc5ToBin2, Bcd5ToBin2
; Aufruf: 16-Bit-Binärzahl in rBin1H:L
; Rückkehr: T-Flag zeigt gültiges Ergebnis an.
;   T=0: rBin1H:L enthält gültiges Ergebnis.
;   T=1: Überlauf bei der Multiplikation, rBin1H:L undefiniert
; Benutzte Register: rBin1H:L (Ergebnis), rBin2H:L (wird wieder  hergestellt)
```

```
Bin1Mul10:
        push rBin2H ; Rette die Register rBin2H:L
        push rBin2L
        mov rBin2H,rBin1H ; Kopiere die Zahl dort hin
        mov rBin2L,rBin1L
        add rBin1L,rBin1L ; Multipliziere Zahl mit 2
        adc rBin1H,rBin1H
        brcs Bin1Mul10b ; Überlauf, raus hier!
Bin1Mul10a:
        add rBin1L,rbin1L ; Noch mal mit 2 malnehmen (=4*Zahl)
        adc rBin1H,rBin1H
        brcs Bin1Mul10b ; Überlauf, raus hier!
        add rBin1L,rBin2L ; Addiere die Kopie (=5*Zahl)
        adc rBin1H,rBin2H
        brcs Bin1Mul10b ;Überlauf, raus hier!
        add rBin1L,rBin1L ; Noch mal mit 2 malnehmen (=10*Zahl)
        adc rBin1H,rBin1H
        brcc Bin1Mul10c ; Kein Überlauf, überspringe
Bin1Mul10b:
        set ; Überlauf, setze T-Flag
Bin1Mul10c:
        pop rBin2L ; Stelle die geretteten Register wieder her
        pop rBin2H
        ret ; Kehre zurück
; ************************************************
; Paket II: Von Binär nach ASCII bzw. BCD
; Bin2ToAsc5
; ==========
; wandelt eine 16-Bit-Binärzahl in eine fünfstellige ASCII-kodierte Dezimalzahl um
; Aufruf: 16-Bit-Binärzahl in rBin1H:L, Z zeigt auf Anfang der Zahl
; Rückkehr: Z zeigt auf Anfang der Zahl, führende Nullen sind  mit Leerzeichen
;    überschrieben
; Benutzte Register: rBin1H:L (bleibt erhalten), rBin2H:L (wird überschrieben), rmp
; Aufgerufene Unterroutinen: Bin2ToBcd5
;
Bin2ToAsc5:
        rcall Bin2ToBcd5 ; wandle Binärzahl in BCD um
        ldi rmp,4 ; Zähler auf 4
        mov rBin2L,rmp
Bin2ToAsc5a:
        ld rmp,z ; Lese eine BCD-Ziffer
        tst rmp ; prüfe ob Null
        brne Bin2ToAsc5b ; Nein, erste Ziffer ungleich 0 gefunden
        ldi rmp,' ' ; mit Leerzeichen überschreiben
        st z+,rmp ; und ablegen
        dec rBin2L ; Zähler um eins senken
        brne Bin2ToAsc5a ; weitere führende Leerzeichen
        ld rmp,z ; Lese das letzte Zeichen
Bin2ToAsc5b:
        inc rBin2L ; Ein Zeichen mehr
Bin2ToAsc5c:
        subi rmp,-'0' ; Addiere ASCII-0
        st z+,rmp ; und speichere ab, erhöhe Zeiger
        ld rmp,z ; nächstes Zeichen lesen
        dec rBin2L ; noch Zeichen behandeln?
        brne Bin2ToAsc5c ; ja, weitermachen
        sbiw ZL,5 ; Zeiger an Anfang
        ret ; fertig
; Bin2ToAsc
; =========
; wandelt eine 16-Bit-Binärzahl in eine fünfstellige ASCII-kodierte Dezimalzahl um, Zeiger
```

```
;   zeigt auf die erste signifikante Ziffer der Zahl, und gibt Anzahl der Ziffern zurück
; Aufruf: 16-Bit-Binärzahl in rBin1H:L, Z zeigt auf Anfang der Zahl (5 Stellen
;         erforderlich, auch bei kleineren Zahlen!)
; Rückkehr: Z zeigt auf erste signifikante Ziffer der ASCII-kodierten Zahl, rBin2L enthält
;           Länge der Zahl (1..5)
; Benutzte Register: rBin1H:L (bleibt erhalten), rBin2H:L (wird überschrieben), rmp
; Aufgerufene Unterroutinen: Bin2ToBcd5, Bin2ToAsc5
;
Bin2ToAsc:
        rcall Bin2ToAsc5 ; Wandle Binärzahl in ASCII
        ldi rmp,6 ; Zähler auf 6
        mov rBin2L,rmp
Bin2ToAsca:
        dec rBin2L ; verringere Zähler
        ld rmp,z+ ; Lese Zeichen und erhöhe Zeiger
        cpi rmp,' ' ; war Leerzeichen?
        breq Bin2ToAsca ; Nein, war nicht
        sbiw ZL,1 ; ein Zeichen rückwärts
        ret ; fertig
; Bin2ToBcd5
; ==========
; wandelt 16-Bit-Binärzahl in 5-stellige BCD-Zahl um
; Aufruf: 16-Bit-Binärzahl in rBin1H:L, Z zeigt auf die erste Stelle der BCD-kodierten
;         Resultats
; Stellen: Die BCD-Zahl hat exakt 5 gültige Stellen.
; Rückkehr: Z zeigt auf die höchste BCD-Stelle
; Benötigte Register: rBin1H:L (wird erhalten), rBin2H:L (wird nicht erhalten), rmp
; Aufgerufene Unterroutinen: Bin2ToDigit
;
Bin2ToBcd5:
        push rBin1H ; Rette Inhalt der Register rBin1H:L
        push rBin1L
        ldi rmp,HIGH(10000) ; Lade 10.000 in rBin2H:L
        mov rBin2H,rmp
        ldi rmp,LOW(10000)
        mov rBin2L,rmp
        rcall Bin2ToDigit ; Ermittle 5.Stelle durch Abziehen
        ldi rmp,HIGH(1000) ; Lade 1.000 in rBin2H:L
        mov rBin2H,rmp
        ldi rmp,LOW(1000)
        mov rBin2L,rmp
        rcall Bin2ToDigit ; Ermittle 4.Stelle durch Abziehen
        ldi rmp,HIGH(100) ; Lade 100 in rBin2H:L
        mov rBin2H,rmp
        ldi rmp,LOW(100)
        mov rBin2L,rmp
        rcall Bin2ToDigit ; Ermittle 3.Stelle durch Abziehen
        ldi rmp,HIGH(10) ; Lade 10 in rBin2H:L
        mov rBin2H,rmp
        ldi rmp,LOW(10)
        mov rBin2L,rmp
        rcall Bin2ToDigit ; Ermittle 2.Stelle durch Abziehen
        st z,rBin1L ; Rest sind Einer
        sbiw ZL,4 ; Setze Zeiger Z auf 5.Stelle (erste Ziffer)
        pop rBin1L ; Stelle den Originalwert wieder her
        pop rBin1H
        ret ; und kehre zurück
; Bin2ToDigit
; ===========
; ermittelt eine dezimale Ziffer durch fortgesetztes Abziehen einer binär kodierten
; Dezimalstelle
```

```
; Unterroutine benutzt von: Bin2ToBcd5, Bin2ToAsc5, Bin2ToAsc
; Aufruf: Binärzahl in rBin1H:L, binär kodierte Dezimalzahl  in rBin2H:L, Z zeigt auf
;         bearbeitete BCD-Ziffer
; Rückkehr: Ergebis in Z (bei Aufruf), Z um eine Stelle erhöht, keine Fehlerbehandlung
; Benutzte Register: rBin1H:L (enthält Rest der Binärzahl),  rBin2H (bleibt erhalten), rmp
; Aufgerufene Unterroutinen: -
;
Bin2ToDigit:
        clr rmp ; Zähler auf Null
Bin2ToDigita:
        cp rBin1H,rBin2H ; Vergleiche MSBs miteinander
        brcs Bin2ToDigitc ; MSB Binärzahl kleiner, fertig
        brne Bin2ToDigitb ; MSB Binärzahl größer, subtrahiere
        cp rBin1L,rBin2L ; MSB gleich, vergleiche LSBs
        brcs Bin2ToDigitc ; LSB Binärzahl kleiner, fertig
Bin2ToDigitb:
        sub rBin1L,rBin2L ; Subtrahiere LSB Dezimalzahl
        sbc rBin1H,rBin2H ; Subtrahiere Carry und MSB
        inc rmp ; Erhöhe den Zähler
        rjmp Bin2ToDigita ; Weiter vergleichen/subtrahieren
Bin2ToDigitc:
        st z+,rmp ; Speichere das Ergebnis und erhöhe Zeiger
        ret ; zurück
; ***********************************************
; Paket III: Von Binär nach Hex-ASCII
;
; Bin2ToHex4
; ==========
; wandelt eine 16-Bit-Binärzahl in Hex-ASCII
; Aufruf: Binärzahl in rBin1H:L, Z zeigt auf erste Position des vierstelligen ASCII-Hex
; Rückkehr: Z zeigt auf erste Position des vierstelligen ASCII-Hex, ASCII-Ziffern A..F in
;           Großbuchstaben
; Benutzte Register: rBin1H:L (bleibt erhalten), rmp
; Aufgerufene Unterroutinen: Bin1ToHex2, Bin1ToHex1
;
Bin2ToHex4:
        mov rmp,rBin1H ; MSB in rmp kopieren
        rcall Bin1ToHex2 ; in Hex-ASCII umwandeln
        mov rmp,rBin1L ; LSB in rmp kopieren
        rcall Bin1ToHex2 ; in Hex-ASCII umwandeln
        sbiw ZL,4 ; Zeiger auf Anfang Hex-ASCII
        ret ; fertig
; Bin1ToHex2 wandelt die 8-Bit-Binärzahl in rmp in Hex-ASCII
; gehört zu: Bin2ToHex4
Bin1ToHex2:
        push rmp ; Rette Byte auf dem Stapel
        swap rmp ; Vertausche die oberen und unteren 4 Bit
        rcall Bin1ToHex1 ; wandle untere 4 Bits in Hex-ASCII
        pop rmp ; Stelle das Byte wieder her
Bin1ToHex1:
        andi rmp,$0F ; Maskiere die oberen vier Bits
        subi rmp,-'0' ; Addiere ASCII-0
        cpi rmp,'9'+1 ; Ziffern A..F?
        brcs Bin1ToHex1a ; Nein
        subi rmp,-7 ; Addiere 7 für A..F
Bin1ToHex1a:
        st z+,rmp ; abspeichern und Zeiger erhöhen
        ret ; fertig
; ***********************************************
; Paket IV: Von Hex-ASCII nach Binär
; Hex4ToBin2
```

```
; ==========
; wandelt eine vierstellige Hex-ASCII-Zahl in eine 16-Bit- Binärzahl um
; Aufruf: Z zeigt auf die erste Stelle der Hex-ASCII-Zahl
; Rückkehr: T-Flag zeigt Fehler an:
;   T=0: rBin1H:L enthält die 16-Bit-Binärzahl, Z zeigt  auf die erste Hex-ASCII-Ziffer
;        wie beim Aufruf
;   T=1: ungültige Hex-ASCII-Ziffer, Z zeigt auf ungültige Ziffer
; Benutzte Register: rBin1H:L (enthält Ergebnis), R0 (wieder hergestellt), rmp
; Aufgerufene Unterroutinen: Hex2ToBin1, Hex1ToBin1
;
Hex4ToBin2:
        clt ; Lösche Fehlerflag
        rcall Hex2ToBin1 ; Wandle zwei Hex-ASCII-Ziffern
        brts Hex4ToBin2a ; Fehler, beende hier
        mov rBin1H,rmp ; kopiere nach MSB Ergebnis
        rcall Hex2ToBin1 ; Wandle zwei Hex-ASCII-Ziffern
        brts Hex4ToBin2a ; Fehler, beende hier
        mov rBin1L,rmp ; kopiere nach LSB Ergebnis
        sbiw ZL,4 ; Ergebis ok, Zeiger auf Anfang
Hex4ToBin2a:
        ret ; zurück
; Hex2ToBin1 wandelt 2-stellig-Hex-ASCII nach 8-Bit-Binär
Hex2ToBin1:
        push R0 ; Rette Register R0
        rcall Hex1ToBin1 ; Wandle nächstes Zeichen in Byte
        brts Hex2ToBin1a ; Fehler, stop hier
        swap rmp; untere vier Bits in obere vier Bits
        mov R0,rmp ; zwischenspeichern
        rcall Hex1ToBin1 ; Nächstes Zeichen umwandeln
        brts Hex2ToBin1a ; Fehler, raus hier
        or rmp,R0 ; untere und obere vier Bits zusammen
Hex2ToBin1a:
        pop R0 ; Stelle R0 wieder her
        ret ; zurück
; Hex1ToBin1 liest ein Zeichen und wandelt es in Binär um
Hex1ToBin1:
        ld rmp,z+ ; Lese Zeichen
        subi rmp,'0' ; Ziehe ASCII-0 ab
        brcs Hex1ToBin1b ; Fehler, kleiner als 0
        cpi rmp,10 ; A..F ; Ziffer größer als 9?
        brcs Hex1ToBin1c ; nein, fertig
        cpi rmp,$30 ; Kleinbuchstaben?
        brcs Hex1ToBin1a ; Nein
        subi rmp,$20 ; Klein- in Grossbuchstaben
Hex1ToBin1a:
        subi rmp,7 ; Ziehe 7 ab, A..F ergibt $0A..$0F
        cpi rmp,10 ; Ziffer kleiner $0A?
        brcs Hex1ToBin1b ; Ja, Fehler
        cpi rmp,16 ; Ziffer größer als $0F
        brcs Hex1ToBin1c ; Nein, Ziffer in Ordnung
Hex1ToBin1b: ; Error
        sbiw ZL,1 ; Ein Zeichen zurück
        set ; Setze Fehlerflagge
Hex1ToBin1c:
        ret ; Zurück
```

8.10 Umgang mit Festkommazahlen in AVR Assembler

Sinn und Unsinn von Fließkommazahlen

Oberster Grundsatz: Verwende keine Fließkommazahlen, es sei denn, Du brauchst sie wirklich. Fließkommazahlen sind beim AVR Ressourcenfresser, lahme Enten und brauchen wahnsinnige Verarbeitungszeiten. So oder ähnlich geht es einem, der glaubt, Assembler sei schwierig und macht lieber mit Basic und seinen höheren Genossen C und Pascal herum.

Nicht so in Assembler. Hier kriegst Du gezeigt, wie man bei 4 MHz Takt in gerade mal weniger als 60 Mikrosekunden, im günstigsten Fall in 18 Mikrosekunden, eine Multiplikation einer Kommmazahl abziehen kann. Ohne extra Fließkommazahlen-Prozessor oder ähnlichem Schnickschnack für Denkfaule.

Wie das geht? Zurück zu den Wurzeln! Die meisten Aufgaben mit Fließkommazahlen sind eigentlich auch mit Festkommazahlen gut zu erledigen. Und die kann man nämlich mit einfachen Ganzzahlen erledigen. Und die sind wiederum in Assembler leicht zu programmieren und sauschnell zu verarbeiten. Das Komma denkt sich der Programmierer einfach dazu und schmuggelt es an einem festem Platz einfach in die Strom von Ganzzahlen-Ziffern rein. Und keiner merkt, dass hier eigentlich gemogelt wird.

Lineare Umrechnungen

Als Beispiel folgende Aufgabe: ein 8-Bit-AD-Wandler misst ein Eingangssignal von 0,00 bis 2,55 Volt und liefert als Ergebnis eine Binärzahl zwischen $00 und $FF ab. Das Ergebnis, die Spannung, soll aber als eine ASCII-Zeichenfolge auf einem LC-Display angezeigt werden. Doofes Beispiel, weil es so einfach ist: Die Hexzahl wird in eine BCD-kodierte Dezimalzahl zwischen 000 und 255 umgewandelt und nach der ersten Ziffer einfach das Komma eingeschmuggelt. Fertig.

Leider ist die Elektronikwelt manchmal nicht so einfach und stellt schwerere Aufgaben. Der AD-Wandler tut uns nicht den Gefallen und liefert für Eingangsspannungen zwischen 0,00 und 5,00 Volt die 8-Bit-Hexzahlen $00 bis $FF. Jetzt stehen wir blöd da und wissen nicht weiter, weil wir die Hexzahl eigentlich mit 500/255, also mit 1,9608 malnehmen müssten. Das ist eine doofe Zahl, weil sie fast zwei ist, aber nicht so ganz. Und so ungenau wollten wir es halt doch nicht haben, wenn schon der AD-Wandler mit einem Viertel Prozent Genauigkeit glänzt. Immerhin zwei Prozent Ungenauigkeit beim höchsten Wert ist da doch zuviel des Guten.

Um uns aus der Affäre zu ziehen, multiplizieren wir das Ganze dann eben mit 500*256/255 oder 501,96 und teilen es anschließend wieder durch 256. Wenn wir jetzt anstelle 501,96 mit aufgerundet 502 multiplizieren (es lebe die Ganzzahl!), beträgt der Fehler noch ganze 0,008%. Mit dem können wir einstweilen leben. Und das Teilen durch 256 ist dann auch ganz einfach, weil es eine bekannte Potenz von Zwei ist, und weil der AVR sich beim Teilen durch Potenzen von Zwei so richtig pudelwohl fühlt und abgeht wie Hund. Beim Teilen einer Ganzzahl durch 256 geht er noch schneller ab, weil wir dann nämlich einfach das letzte Byte der Binärzahl weglassen können. Nix mit Schieben und Rotieren wie beim richtigen Teilen.

Die Multiplikation einer 8-Bit-Zahl mit der 9-Bit-Zahl 502 (hex 01F6) kann natürlich ein Ergebnis haben, das nicht mehr in 16 Bit passt. Hier müssen deshalb 3 Bytes oder 24 Bits für das Ergebnis vorbereitet sein, damit nix überläuft. Während der Multiplikation der 8-Bit-Zahl wird die 9-Bit-Zahl 502 immer eine Stelle nach links geschoben (mit 2 multipliziert), passt also auch nicht mehr in 2 Bytes und braucht also auch drei Bytes. Damit erhalten wir als Beispiel folgende Belegung von Registern beim Multiplizieren:

Zahl	*Wert (Beispiel)*	*Register*
Eingangswert	255	R1
Multiplikator	502	R4:R3:R2
Ergebnis	128010	R7:R6:R5

Nach der Vorbelegung von R4:R3:R2 mit dem Wert 502 (Hex 00.01.F6) und dem Leeren der Ergebnisregister R7:R6:R5 geht die Multiplikation jetzt nach folgendem Schema ab:

1. Testen, ob die Zahl schon Null ist. Wenn ja, sind wir fertig mit der Multiplikation.
2. Wenn nein, ein Bit aus der 8-Bit-Zahl nach rechts heraus in das Carry-Flag schieben und gleichzeitig eine Null von links hereinschieben. Die Instruktion heißt Logical-Shift-Right oder LSR.
3. Wenn das herausgeschobene Bit im Carry eine Eins ist, wird der Inhalt des Multiplikators (beim ersten Schritt 502) zum Ergebnis hinzu addiert. Beim Addieren auf Überläufe achten (Addition von R5 mit R2 mit ADD, von R6 mit R3 sowie von R7 mit R4 mit ADC!). Ist es eine Null, unterlassen wir das Addieren und gehen sofort zum nächsten Schritt.
4. Jetzt wird der Multiplikator mit zwei multipliziert, denn das nächste Bit der Zahl ist doppelt so viel wert. Also R2 mit LSL links schieben (Bit 7 in das Carry herausschieben, eine Null in Bit 0 hineinschieben), dann das Carry mit ROL in R3 hineinrotieren (Bit 7 von R3 rutscht jetzt in das Carry), und dieses Carry mit ROL in R4 rotieren.
5. Jetzt ist eine binäre Stelle der Zahl erledigt und es geht bei Schritt 1 weiter.

Das Ergebnis der Multiplikation mit 502 steht dann in den Ergebnisregistern R7:R6:R5. Wenn wir jetzt das Register R5 ignorieren, steht in R7:R6 das Ergebnis der Division durch 256. Zur Verbesserung der Genauigkeit können wir noch das Bit 7 von R5 dazu heranziehen, um die Zahl in R7:R6 zu runden. Und unser Endergebnis in binärer Form braucht dann nur noch in dezimale ASCII-Form umgewandelt werden (siehe Umwandlung binär zu Dezimal-ASCII). Setzen wir dem Ganzen dann noch einen Schuss Komma an der richtigen Stelle zu, ist die Spannung fertig für die Anzeige im Display.

Der gesamte Vorgang von der Ausgangszahl bis zum Endergebnis in ASCII dauert zwischen 79 und 228 Taktzyklen, je nachdem wieviel Nullen und Einsen die Ausgangszahl aufweist. Wer das mit der Fließkommaroutine einer Hochsprache schlagen will, soll sich bei mir melden.

Beispiel 1: 8-Bit-AD-Wandler mit Festkommaausgabe

Assembler Quelltext der Umwandlung einer 8-Bit-Zahl in eine dreistellige Festkommazahl

```
; Demonstriert Fließkomma-Umwandlung in
; Assembler, (C)2003 www.avr-asm-tutorial.net
; Die Aufgabe: Ein 8-Bit-Analog-Wandler-Signal in Binärform wird eingelesen, die Zahlen
;    reichen von hex 00 bis FF. Diese Zahlen sind umzurechnen in eine Fließkommazahl
;    zwischen 0,00 bis 5,00 Volt.
; Der Programmablauf:
;    1. Multiplikation mit 502 (hex 01F6).
;       Dieser Schritt multipliziert die Zahl mit den Faktoren 500 und 256 und dividiert
;       mit 255 in einem Schritt.
;    2. Das Ergebnis wird gerundet und das letzte Byte abgeschnitten.
;       Dieser Schritt dividiert durch 256, indem das letzte Byte des Ergebnisses
;       ignoriert wird. Davor wird das Bit 7 des Ergebnisses  abgefragt und zum Runden des
;       Ergebnisses  verwendet.
;    3. Die erhaltene Zahl wird in ASCII-Zeichen umgewandelt und mit einem Dezimalpunkt
;       versehen.
;       Das Ergebnis, eine Ganzzahl zwischen 0 und und 500 wird in eine Dezimalzahl ;
;       verwandelt und in der Form 5,00 als Fließkommazahl in ASCII-Zeichen dargestellt.
; Die verwendeten Register:
;    Die Routinen benutzen die Register R8 bis R1, ohne diese vorher zu sichern.
;    Zusätzlich wird das Vielzweckregister rmp verwendet, das in der oberen Registerhälfte
;    liegen muss. Bitte beachten, dass diese verwendeten Register nicht mit anderen
;    Verwendungen in Konflikt kommen können.
;    Zu Beginn wird die 8-Bit-Zahl im Register R1 erwartet.
;    Die Multiplikation verwendet R4:R3:R2 zur Speicherung des Multiplikators 502 (der
```

```
;    bei der Berechnung maximal 8 mal links geschoben wird - Multiplikation mit 2). Das
;    Ergebnis der Multiplikation wird in den Registern R7:R6:R5 berechnet.
;    Das Ergebnis der sogenannten Division durch 256 durch Ignorieren von R5 des
;    Ergebnisses ist in R7:R6 gespeichert. Abhängig von Bit 7 in R5 wird zum Registerpaar
;    R7:R6 eine Eins addiert. Das Ergebnis in R7:R6 wird  in das Registerpaar R2:R1
;    kopiert.
;    Die Umwandlung der Binärzahl in R2:R1 in eine ASCII-Zeichenfolge verwendet das Paar
;    R4:R3 als Divisor für die Umwandlung. Das Ergebnis, der ASCII-String, ist in den Re-
;    gistern R5:R6:R7:R8 abgelegt.
; Weitere Bedingungen:
;   Die Umwandlung benutzt Unterprogramme, daher  muss der Stapel funktionieren. Es werden
;   maximal drei Ebenen Unterprogrammaufrufe verschachtelt (benötigt sechs Byte SRAM).
; Umwandlungszeiten:
;   Die gesamte Umwandlung benötigt 228 Taktzyklen  maximal (Umwandlung von $FF) bzw. 79
;   Taktzyklen (Umwandlung von $00). Bei 4 MHz Takt entspricht dies 56,75 Mikrosekunden
;   bzw. 17,75 Mikrosekunden.
; Definitionen:
;   Register
.DEF rmp = R16 ; als Vielzweckregister verwendet
;   AVR-Typ
;   Getestet für den Typ AT90S8515, die Angabe wird nur für den Stapel benötigt. Die
;   Routinen arbeiten auf anderen AVR-Prozessoren genauso gut.
.NOLIST
.INCLUDE "8515def.inc"
.LIST
; Start des Testprogramms
; Schreibt eine Zahl in R1 und startet die Wandlungsroutine, nur für Testzwecke.
.CSEG
.ORG $0000
        rjmp main
main:
        ldi rmp,HIGH(RAMEND) ; Richte den Stapel ein
        out SPH,rmp
        ldi rmp,LOW(RAMEND)
        out SPL,rmp
        ldi rmp,$FF ; Wandle FF um
        mov R1,rmp
        rcall fpconv8 ; Rufe die Umwandlungsroutine
no_end:   ; unendliche Schleife, wenn fertig
        rjmp no_end
; Ablaufssteuerung der Umwandlungsroutine, ruft die verschiedenen Teilschritte auf
fpconv8:
        rcall fpconv8m ; Multipliziere mit 502
        rcall fpconv8r ; Runden und Division mit 256
        rcall fpconv8a ; Umwandlung in ASCII-String
        ldi rmp,'.' ; Setze Dezimalpunkt
        mov R6,rmp
        ret ; Alles fertig
;
; Unterprogramm Multiplikation mit 502
; Startbedingung:
; +----+
; | R1 |  Eingabezahl, im Beispiel $FF
; | FF |
; +----+
; +----+----+----+
; | R4 | R3 | R2 | Multiplikant 502 = $00 01 F6
; | 00 | 01 | F6 |
; +----+----+----+
;
;
```

```
; +----+----+----+
; | R7 | R6 | R5 | Resultat, im Beispiel 128.010
; | 01 | F4 | 0A |
; +----+----+----+
fpconv8m:
        clr R4 ; Setze den Multiplikant auf 502
        ldi rmp,$01
        mov R3,rmp
        ldi rmp,$F6
        mov R2,rmp
        clr R7 ; leere Ergebnisregister
        clr R6
        clr R5
fpconv8m1:
        or r1,R1 ; Prüfe ob noch Bits 1 sind
        brne fpconv8m2 ; Noch Einsen, mach weiter
        ret ; fertig, kehre zurück
fpconv8m2:
        lsr R1 ; Schiebe Zahl nach rechts (teilen durch 2)
        brcc fpconv8m3 ; Wenn das niedrigste Bit eine 0 war, dann überspringe den
Additionsschritt
        add R5,R2 ; Addiere die Zahl in R4:R3:R2 zum Ergebnis
        adc R6,R3
        adc R7,R4
fpconv8m3:
        lsl R2 ; Multipliziere R4:R3:R2 mit 2
        rol R3
        rol R4
        rjmp fpconv8m1 ; Wiederhole für das nächste Bit
; Runde die Zahl in R7:R6 mit dem Wert von Bit 7 von R5
fpconv8r:
        clr rmp ; Null nach rmp
        lsl R5 ; Rotiere Bit 7 ins Carry
        adc R6,rmp ; Addiere LSB mit Übertrag
        adc R7,rmp ; Addiere MSB mit Übertrag
        mov R2,R7 ; Kopiere den Wert nach R2:R1 (durch 256 teilen)
        mov R1,R6
        ret
; Wandle das Wort in R2:R1 in einen ASCII-Text in R5:R6:R7:R8
; +----+----+
; + R2 | R1 | Eingangswert 0..500
; +----+----+
; +----+----+
; | R4 | R3 | Dezimalteiler
; +----+----+
; +----+----+----+----+
; | R5 | R6 | R7 | R8 | Ergebnistext (für Eingangswert 500)
; | '5'| '.'| '0'| '0'|
; +----+----+----+----+
fpconv8a:
        clr R4 ; Setze Dezimalteiler auf 100
        ldi rmp,100
        mov R3,rmp
        rcall fpconv8d ; Hole ASCII-Ziffer durch wiederholtes Abziehen
        mov R5,rmp ; Setze Hunderter Zeichen
        ldi rmp,10 ; Setze Dezimalteiler auf 10
        mov R3,rmp
        rcall fpconv8d ; Hole die nächste Ziffer
        mov R7,rmp
        ldi rmp,'0' ; Wandle Rest in ASCII-Ziffer um
        add rmp,R1
```

```
        mov R8,rmp ; Setze Einer Zeichen
        ret
; Wandle Binärwort in R2:R1 in eine Dezimalziffer durch fortgesetztes  Abziehen des
; Dezimalteilers
;    in R4:R3 (100, 10)
fpconv8d:
        ldi rmp,'0' ; Beginne mit ASCII-0
fpconv8d1:
        cp R1,R3 ; Vergleiche Wort mit Teiler
        cpc R2,R4
        brcc fpconv8d2 ; Carry nicht gesetzt, subtrahiere Teiler
        ret ; fertig
fpconv8d2:
        sub R1,R3 ; Subtrahiere Teilerwert
        sbc R2,R4
        inc rmp ; Ziffer um eins erhöhen
        rjmp fpconv8d1 ; und noch einmal von vorne
; Ende der Fließkomma-Umwandlungsroutinen
; Ende des Umwandlungstestprogramms
```

9 Tabellenanhang

Instruktionen nach Funktion geordnet

Zur Erklärung über Abkürzungen bei Parametern siehe die Liste der Abkürzungen am Ende des Anhangs.

Funktion	*Unterfunktion*	*Instruktion*	*Flags*	*Clk*
Register setzen	0	CLR r1	Z N V	1
	255	SER rh		1
	Konstante	LDI rh,k255		1
Kopieren	Register => Register	MOV r1,r2		1
	SRAM => Register, direkt	LDS r1,k65535		2
	SRAM => Register	LD r1,rp		2
	SRAM => Register mit INC	LD r1,rp+		2
	DEC, SRAM => Register	LD r1,-rp		2
	SRAM, indiziert => Register	LDD r1,ry+k63		2
	Port => Register	IN r1,p1		1
	Stack => Register	POP r1		2
	Programmspeicher Z => R0	LPM		3
	Register => SRAM, direkt	STS k65535,r1		2
	Register => SRAM	ST rp,r1		2
	Register => SRAM mit INC	ST rp+,r1		2
	DEC, Register => SRAM	ST -rp,r1		2
	Register => SRAM, indiziert	STD ry+k63,r1		2
	Register => Port	OUT p1,r1		1
	Register => Stack	PUSH r1		2
Addition	8 Bit, +1	INC r1	Z N V	1
	8 Bit	ADD r1,r2	Z C N V H	1
	8 Bit+Carry	ADC r1,r2	Z C N V H	1
	16 Bit, Konstante	ADIW rd,k63	Z C N V S	2
Subtraktion	8 Bit, -1	DEC r1	Z N V	1
	8 Bit	SUB r1,r2	Z C N V H	1
	8 Bit, Konstante	SUBI rh,k255	Z C N V H	1
	8 Bit - Carry	SBC r1,r2	Z C N V H	1
	8 Bit - Carry, Konstante	SBCI rh,k255	Z C N V H	1
	16 Bit	SBIW rd,k63	Z C N V S	2
Schieben	Logisch, links	LSL r1	Z C N V	1
	Logisch, rechts	LSR r1	Z C N V	1
	Rotieren, links über Carry	ROL r1	Z C N V	1
	Rotieren, rechts über Carry	ROR r1	Z C N V	1
	Arithmetisch, rechts	ASR r1	Z C N V	1
	Nibbletausch	SWAP r1		1

Funktion	*Unterfunktion*	*Instruktion*	*Flags*	*Clk*
Binär	Und	AND r1,r2	Z N V	1
	Und, Konstante	ANDI rh,k255	Z N V	1
	Oder	OR r1,r2	Z N V	1
	Oder, Konstante	ORI rh,k255	Z N V	1
	Exklusiv-Oder	EOR r1,r2	Z N V	1
	Einer-Komplement	COM r1	Z C N V	1
	Zweier-Komplement	NEG r1	Z C N V H	1
Bits ändern	Register, Setzen	SBR rh,k255	Z N V	1
	Register, Rücksetzen	CBR rh,255	Z N V	1
	Register, Kopieren nach T-Flag	BST r1,b7	T	1
	Register, Kopie von T-Flag	BLD r1,b7		1
	Port, Setzen	SBI pl,b7		2
	Port, Rücksetzen	CBI pl,b7		2
Statusbit setzen	Zero-Flag	SEZ	Z	1
	Carry Flag	SEC	C	1
	Negativ Flag	SEN	N	1
	Zweierkompliment Überlauf Flag	SEV	V	1
	Halbübertrag Flag	SEH	H	1
	Signed Flag	SES	S	1
	Transfer Flag	SET	T	1
	Interrupt Enable Flag	SEI	I	1
Statusbit rücksetzen	Zero-Flag	CLZ	Z	1
	Carry Flag	CLC	C	1
	Negativ Flag	CLN	N	1
	Zweierkompliment Überlauf Flag	CLV	V	1
	Halbübertrag Flag	CLH	H	1
	Signed Flag	CLS	S	1
	Transfer Flag	CLT	T	1
	Interrupt Enable Flag	CLI	I	1
Vergleiche	Register, Register	CP r1,r2	Z C N V H	1
	Register, Register + Carry	CPC r1,r2	Z C N V H	1
	Register, Konstante	CPI rh,k255	Z C N V H	1
	Register, ≤0	TST r1	Z N V	1
Unbedingte Verzweigung	Relativ	RJMP k4096		2
	Indirekt, Adresse in Z	IJMP		2
	Unterprogramm, relativ	RCALL k4096		3
	Unterprogramm, Adresse in Z	ICALL		3
	Return vom Unterprogramm	RET		4
	Return vom Interrupt	RETI	I	4

Funktion	***Unterfunktion***	***Instruktion***	***Flags***	***Clk***
Bedingte Verzweigung	Statusbit gesetzt	BRBS b7,k127		1/2
	Statusbit rückgesetzt	BRBC b7,k127		1/2
	Springe bei gleich	BREQ k127		1/2
	Springe bei ungleich	BRNE k127		1/2
	Springe bei Überlauf	BRCS k127		1/2
	Springe bei Carry=0	BRCC k127		1/2
	Springe bei gleich oder größer	BRSH k127		1/2
	Springe bei kleiner	BRLO k127		1/2
	Springe bei negativ	BRMI k127		1/2
	Springe bei positiv	BRPL k127		1/2
	Springe bei größer oder gleich (Vorzeichen)	BRGE k127		1/2
	Springe bei kleiner Null (Vorzeichen)	BRLT k127		1/2
	Springe bei Halbübertrag	BRHS k127		1/2
	Springe bei HalfCarry=0	BRHC k127		1/2
	Springe bei gesetztem T-Bit	BRTS k127		1/2
	Springe bei gelöschtem T-Bit	BRTC k127		1/2
	Springe bei Zweierkomplementüberlauf	BRVS k127		1/2
	Springe bei Zweierkomplement-Flag=0	BRVC k127		1/2
	Springe bei Interrupts eingeschaltet	BRIE k127		1/2
	Springe bei Interrupts ausgeschaltet	BRID k127		1/2
Bedingte Sprünge	Registerbit=0	SBRC r1,b7		1/2/3
	Registerbit=1	SBRS r1,b7		1/2/3
	Portbit=0	SBIC pl,b7		1/2/3
	Portbit=1	SBIS pl,b7		1/2/3
	Vergleiche, Sprung bei gleich	CPSE r1,r2		1/2/3
Andere	No Operation	NOP		1
	Sleep	SLEEP		1
	Watchdog Reset	WDR		1

Instruktionen, alphabetisch

ADC r1,r2
ADD r1,r2
ADIW rd,k63
AND r1,r2
ANDI rh,k255
ASR r1
BLD r1,b7
BRCC k127
BRCS k127
BREQ k127
BRGE k127
BRHC k127
BRHS k127
BRID k127
BRIE k127
BRLO k127
BRLT k127
BRMI k127
BRNE k127
BRPL k127
BRSH k127
BRTC k127
BRTS k127
BRVC k127
BRVS k127
BST r1,b7
CBI pl,b7
CBR rh,255
CLC
CLH
CLI
CLN
CLR r1
CLS
CLT
CLV
CLZ
COM r1
CP r1,r2
CPC r1,r2
CPI rh,k255
CPSE r1,r2
DEC r1
EOR r1,r2
ICALL
IJMP IN r1,p1
INC r1
LD rp,(rp,rp+,-rp)
LDD r1,ry+k63
LDI rh,k255
LDS r1,k65535
LPM
LSL r1
LSR r1
MOV r1,r2
NEG r1
NOP
OR r1,r2 ORI rh,k255 OUT p1,r1
POP r1
PUSH r1
RCALL k4096
RET
RETI
RJMP k4096
ROL r1
ROR r1
SBC r1,r2
SBCI rh,k255
SBI pl,b7
SBIC pl,b7
SBIS pl,b7
SBIW rd,k63
SBR rh,255
SBRC r1,b7
SBRS r1,b7
SEC
SEH
SEI
SEN
SER rh
SES
SET
SEV
SEZ
SLEEP
ST (rp/rp+/-rp),r1
STD ry+k63,r1
STS k65535,r1
SUB r1,r2
SUBI rh,k255
SWAP r1
TST r1
WDR

Ports, alphabetisch

ACSR, Analog Comparator Control & Status Reg.
DDRx, Port x Data Direction Register
EEAR, EEPROM Adress Register
EECR, EEPROM Control Register
EEDR, EEPROM Data Register
GIFR, General Interrupt Flag Register
GIMSK, General Interrupt Mask Register
ICR1L/H, Input Capture Register 1
MCUCR, MCU General Control Register
OCR1A, Output Compare Register 1 A
OCR1B, Output Compare Register 1 B
PINx, Port Input Access
PORTx, Port x Output Register
SPL/SPH, Stackpointer
SPCR, Sreial Peripheral Control Register
SPDR, Serial Peripheral Data Register
SPSR, Serial Peripheral Status Register
SREG, Status Register
TCCR0, Timer/Counter Control Register 0
TCCR1A, Timer/Counter Control Register 1 A
TCCR1B, Timer/Counter Control Register 1 B
TCNT0, Timer/Counter Register, Counter 0
TCNT1, Timer/Counter Register, Counter 1
TIFR, Timer Interrupt Flag Register
TIMSK, Timer Interrupt Mask Register
UBRR, UART Baud Rate Register
UCR, UART Control Register
UDR, UART Data Register
WDTCR, Watchdog Timer Control Register

Assemblerdirektiven

.BYTE x	: reserviert x Bytes im Datensegment (siehe auch .DSEG)
.CSEG	: compiliert in das Code-Segment
.DB x,y,z	: Byte(s), Zeichen oder Zeichenketten einfügen (in .CSEG, .ESEG)
.DEF x=y	: dem Symbol x ein Register y zuweisen
.DEVICE x	: die Syntax-Prüfung für den AVR-Typ x durchführen (in Headerdatei enthalten)
.DSEG	: Datensegment, nur Marken und .BYTE zulässig
.DW x,y,z	: Datenworte einfügen (.CSEG, .ESEG)
.ELIF x	: .ELSE mit zusätzlicher Bedingung x
.ELSE	: Alternativcode, wenn .IF nicht zutreffend war
.ENDIF	: schließt .IF bzw. .ELSE ab
.EQU x=y	: dem Symbol x einen festen Wert y zuweisen
.ERROR x	: erzwungener Fehler mit Fehlertext x
.ESEG	: compiliert in das EEPROM-Segment
.EXIT	: Beendet die Compilation
.IF x	: compiliert den folgenden Code, wenn Bedingung x erfüllt ist
.IFDEF x	: compiliert den Code, wenn Variable x definiert ist
.IFNDEF x	: compiliert den Code, wenn Variable x undefiniert ist
.INCLUDE x	: fügt Datei "Name/Pfad" x in den Quellcode ein
.MESSAGE x	: gibt die Meldung x aus
.LIST	: Schaltet die Ausgabe der List-Datei ein
.LISTMAC	: Schaltet die vollständige Ausgabe von Makrocode ein
.MACRO x	: Definition des Makros mit dem Namen x
.ENDMACRO	: Beendet die Makrodefinition (siehe auch .ENDM)
.ENDM	: Beendet die Makrodefinition (siehe auch .ENMACRO)
.NOLIST	: Schaltet die Ausgabe der List-Datei aus
.ORG x	: Setzt den CSEG-/ESEG-/DSEG-Zähler auf den Wert x
.SET x=y	: Dem Symbol x wird ein variabler Wert y zugewiesen

Verwendete Abkürzungen

Die in diesen Listen verwendeten Abkürzungen geben den zulässigen Wertebereich mit an. Bei Doppelregistern ist das niederwertige Byte-Register angegeben. Konstanten bei der Angabe von Sprungzielen werden dabei automatisch vom Assembler aus den Labels errechnet.

Kategorie	***Abk.***	***Bedeutung***	***Wertebereich***
Register	r1	Allgemeines Quell- und Zielregister	R0..R31
	r2	Allgemeines Quellregister	
	rh	Oberes Register	R16..R31
	rd	Doppelregister	R24(R25), R26(R27), R28(R29), R30(R31)
	rp	Pointerregister	X=R26(R27), Y=R28(R29), Z=R30(R31)
	ry	Pointerregister mit Ablage	Y=R28(R29), Z=R30(R31)
Konstante	k63	Pointer-Konstante	0..63
	k127	Bedingte Sprungdistanz	-64..+63
	k255	8-Bit-Konstante	0..255
	k4096	Relative Sprungdistanz	-2048..+2047
	k65535	16-Bit-Adresse	0..65535
Bit	b7	Bitposition	0..7
Port	p1	Beliebiger Port	0..63
	pl	Unterer Port	0..31