Anfängerkurs zum Erlernen der Assemblersprache von ATMEL-AVR-Mikroprozessoren

Gerhard Schmidt
http://www.avr-asm-tutorial.net
November 2003

Inhaltsverzeichnis

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

Assemblerbefehle 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-Befehle lernt man eben erst nach Monaten richtig nutzen.

AT90Sxxxx 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 Befehle 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 Megamaschine 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.

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 Programmierboard erstehen. Die Eigenschaften solcher Boards werden hier ebenfalls beschrieben.

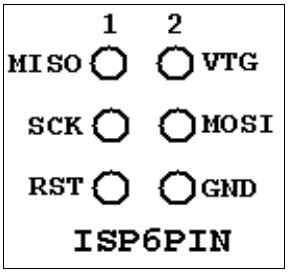
Das ISP-Interface der AVR-Prozessoren

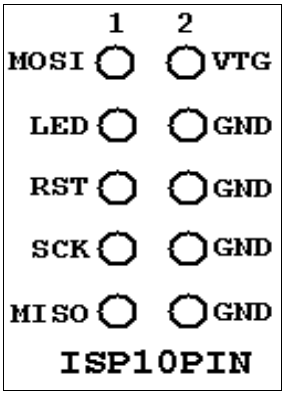
Bevor es ins Praktische geht, zunächst ein paar grundlegende Informationen zum Programmieren der Prozessoren. Nein, man braucht keine drei verschiedenen Spannungen, um das Flash-EEPROM eines AVR zu beschreiben und zu lesen. Nein, man braucht keinen weiteren Mikroprozessor, um ein Programmiergerät für 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 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,





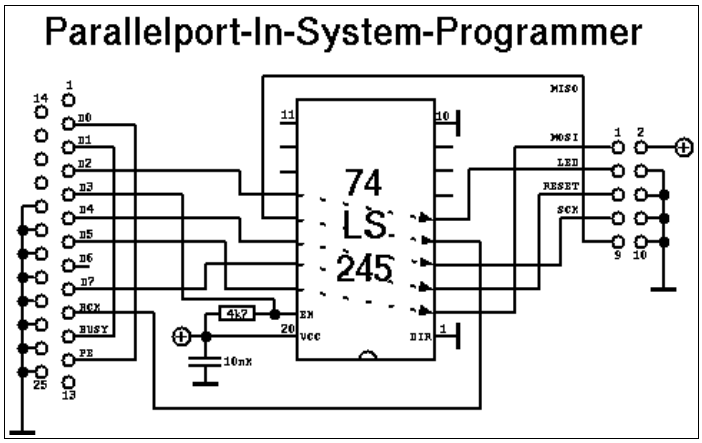
was die wilden Programmierimpulse mit dem Rest der Schaltung anstellen können.

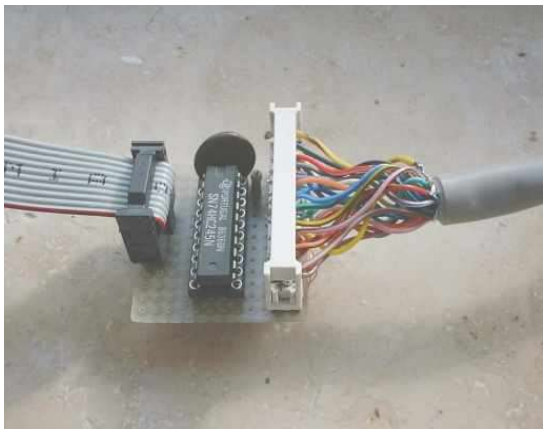
Nicht notwendig, aber bequem ist es, die Versorgungsspannung von Schaltung und Programmier-Interface gemeinsam zu beziehen und dafür zwei weitere Leitungen vorzusehen. GND versteht sich von selbst, VTG bedeutet Voltage Target und ist die Betriebsspannung des Zielsystems. Damit wären wir bei der 6-Draht-ISP-Programmierleitung.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

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.



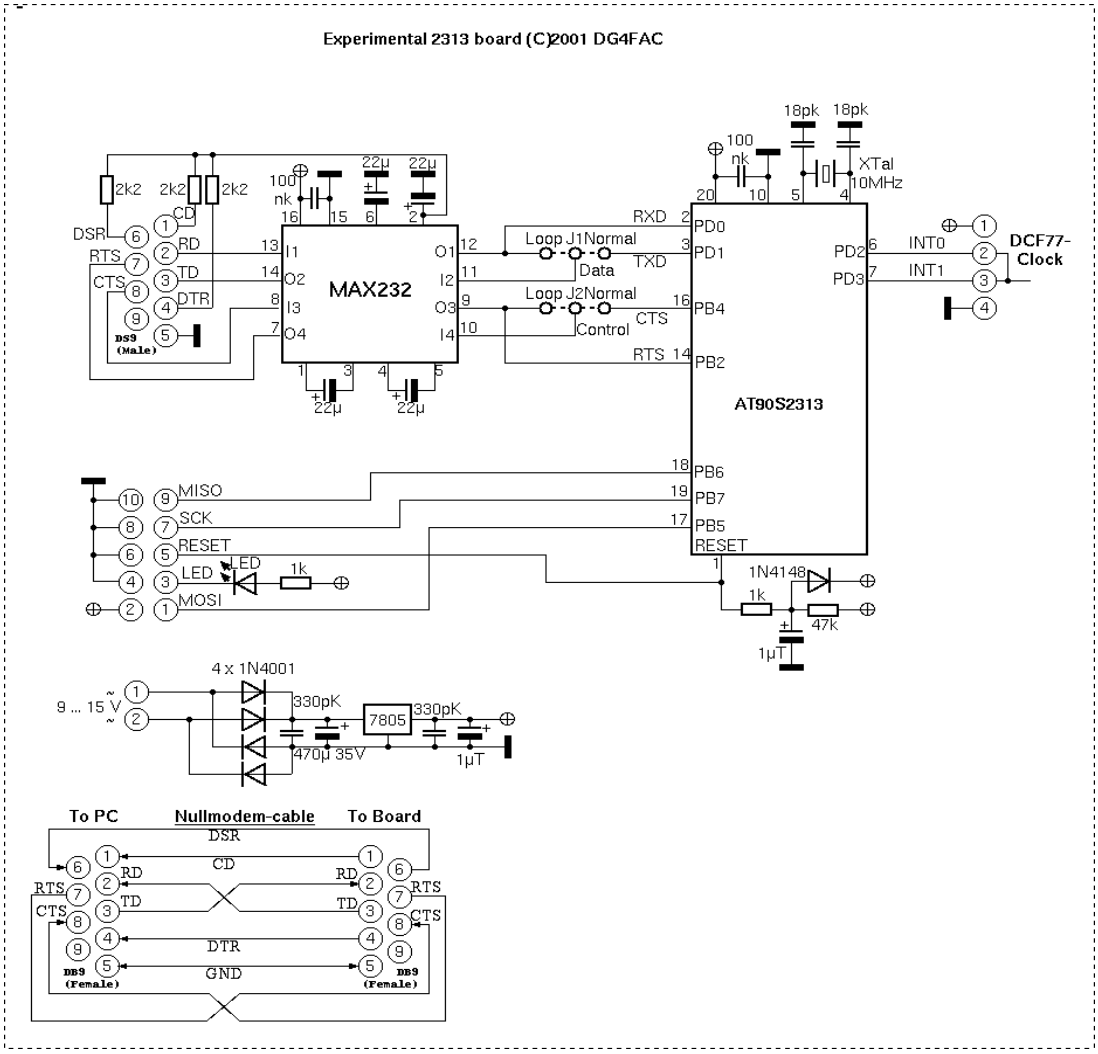


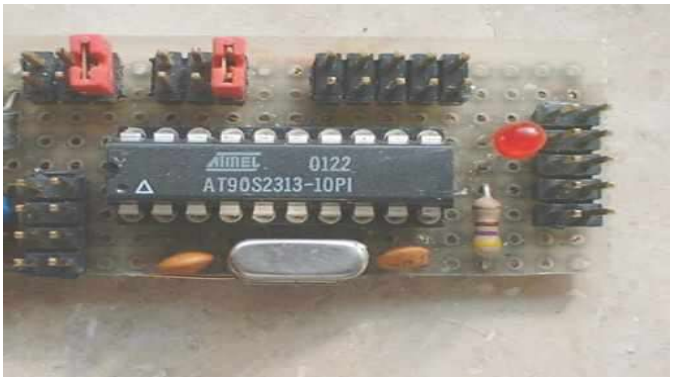
Ja, das ist alles, was es zum Programmieren braucht. Den 25-poligen Stecker steckt man in den Parallelport des PC's, den 10-poligen ISP-Stecker an die AVR-Experimentierschaltung. Wer gerade keinen 74LS245 zur Hand hat, kann auch einen 74HC245 verwenden. Allerdings sollten dann die unbenutzten Eingänge 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 ISP-Software.

Experimentalschaltung mit AT90S2313

Damit es was zum Programmieren gibt, hier eine einfache Schaltung mit einem schon etwas größeren AVR-Typ. 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.

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

- Sockel für die Programmierung der meisten AVR-Typen,
- serielle und parallele 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.

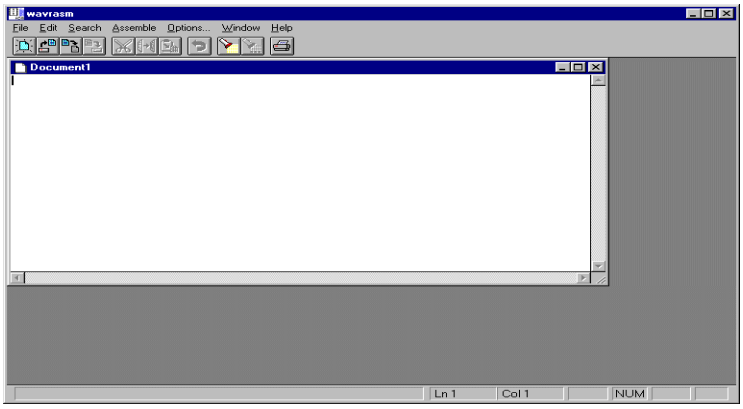
Die Experimente können mit dem mitgelieferten AT90S8515 sofort beginnen. Das Board wird über eine serielle Schnittstelle (COMx) an den Rechner gekoppelt und von den neueren Versionen des Studio's von ATMEL bedient. Damit dürften alle Hardware-Bedürfnisse für den Anfang abgedeckt sein.

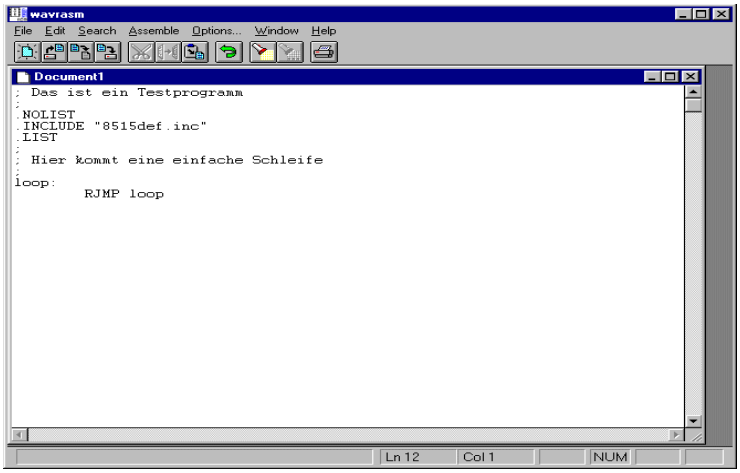
Werkzeuge für die AVR-Assembler-Programmierung

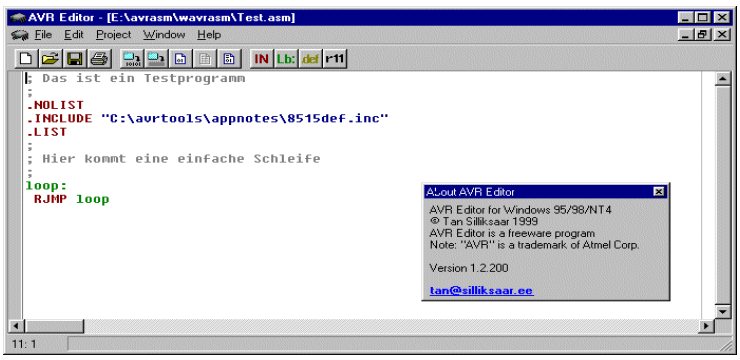
In diesem Abschnitt werden die Werkzeuge vorgestellt, die zum Assembler-Programmieren mit dem STK200 nötig sind. Die Programmierung mit dem STK500 und dem Studio ist anders und hier genauer beschrieben.
Für die Programmierung mit dem STK200 werden vier Teilprogramme benötigt. Diese Teile werden von ATMEL nicht mehr supported. Im einzelnen handelt es sich um

- den Editor,
- den Assembler,
- das Programmier-Interface, und
- den Simulator.

Die nötigen Software-Werkzeuge gibt es bei auf der Webseite von ATMEL, die auch das Copyright für diese freie Software besitzen. Die dargestellten Fenster sind alle © ATMEL. Es wird darauf hingewiesen, dass es unterschiedliche Versionen der Software mit unterschiedlichem Aussehen und unterschiedlicher Bedienung gibt. Diese Darstellung ist kein Handbuch, sie soll lediglich mit einigen wenigen Möglichkeiten vertraut machen, die Anfängern helfen können, die ersten Schritte zu machen.







Der Editor

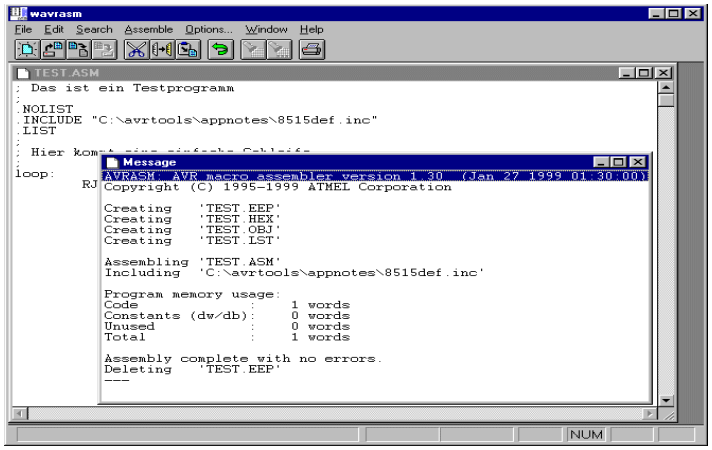
Assemblerprogramme schreibt man mit einem Editor. Der braucht im Prinzip nicht mehr können als ASCII-Zeichen zu schreiben und zu speichern. Im Prinzip täte es ein sehr einfaches Schreibgerät. Wir empfehlen hier aber die etwas fortgeschrittenere Version eines solchen Schreibgerätes, entweder den WAVRASM von ATMEL oder den von Tan Silliksaar (siehe unten). Der WAVRASM sieht nach der Installation und nach dem Start eines neuen Projektes etwa so aus wie nebenan.

Im WAVRASM schreiben wir einfach die Assemblerbefehle und Befehlszeilen drauf los, gespickt mit erläuternden Kommentaren (die alle mit einem Semikolon beginnen). Das sollte dann etwa wie nebenan aussehen.
Nun wird das Assembler-Programm mit dem File-Menue in irgendein Verzeichnis, am besten in ein eigens dazu errichtetes, abgespeichert. Fertig ist das Assembler-Programm.

Wer es etwas schöner haben möchte, verwendet den Editor von Tan Silliksaar. Den gab es auch kostenlos im Internet.
In diesem Editor sieht unser Programm aus wie nebenan.
Der Editor erkennt automatisch Befehlsworte und färbt sie buntig ein (Syntax-Highlighting genannt). Schreibfehler werden sofort in trauer-schwarz eingefärbt und sind schnell erkennbar. Auch hier hilft das Abspeichern gegen den frühen Verlust von Quellcode.

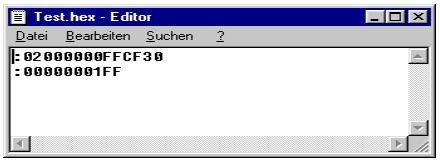
Der Assembler

Nun muss das ganze Programm von der Textform in die Maschinen-sprachliche Form gebracht werden. Den Vorgang heisst man Assemblieren, was in etwa Auftürmen oder zusammenschrauben bedeutet.



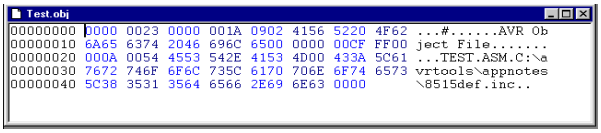
Beim WAVRASM klickt man dazu einfach auf den Menuepunkt mit der Aufschrift „Assemble“. Das Ergebnis ist im Bild nebenan zu sehen.
Der Assembler geruht uns damit mitzuteilen, dass er das Programm übersetzt hat. Andernfalls würfe er mit dem Schlagwort „Error“ um sich. Immerhin ein Wort Code ist dabei erzeugt worden. Und er hat aus unserer 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 wollen. Hat er gemerkt und die Datei gleich wieder gelöscht.

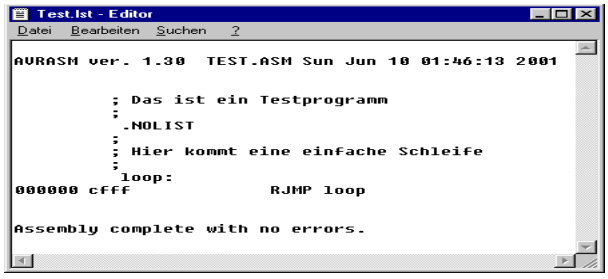


Die zweite Datei, TEST.HEX, ist schon wichtiger, weil hier die Befehlsworte untergebracht sind. Diese Datei brauchen wir zum Programmieren des Prozessors.
Sie enthält folgende Hieroglyphen.
Die hexadezimalen Zahlen sind als ASCII-Zeichen aufgelöst und werden mit Adressangaben und Prüfsummen zusammen 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 folgendermassen aus.



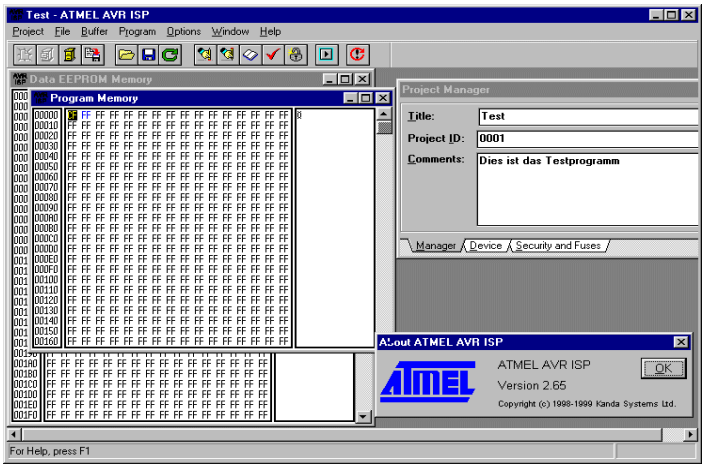
Merke: Diese Datei wird vom Programmiergerät nicht verstanden! Versentliche Verwendung zum Programmieren in einen Chip endet mit Fehlermeldungen oder damit, dass der Chip nicht tut was er soll!



Die vierte Datei, TEST.LST, können wir uns mit einem Editor anschauen. Sie enthält folgendes.
Wir sehen das Programm mit allen Adressen, Maschinenbefehlen und Fehlermeldungen des Assemblers. Braucht man selten, aber gelegentlich.

Das Programmieren des Chips

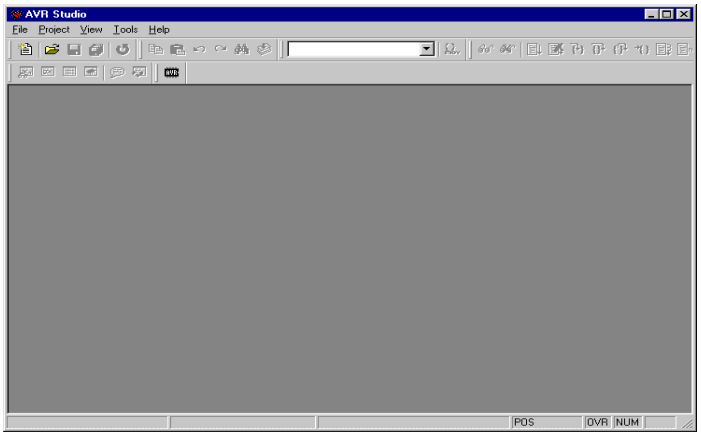
Dazu hat ATMEL den ISP gemacht. Wir starten das Programm ISP, erzeugen ein neues Projekt und laden die gerade erzeugte Hex-Datei mit LOAD PROGRAM. Das sieht dann so aus:



Wenn wir nun mit dem Menue Program den Chip programmieren, dann legt dieser gleich los. Es gibt eine Reihe von weiteren Voraussetzungen (richtige Parallel-Schnittstelle auswählen, Adapter an Schnittstelle angeschlossen, Chip auf dem Programmierboard vorhanden, Stromversorgung auf dem Board eingeschaltet, ...), ohne die das natürlich nicht geht.
Inzwischen hat ATMEL aus mir unverständlichen Gründen die ISP-Software von der Internetseite genommen. Selbstverständlich gibt es auch Soft- und Hardware, die alternative Möglichkeiten der Chip-Programmierung zur Verfügung stellt (z.B. PonyProg). Das Internet gibt hier weitere erschöpfende Auskunft.

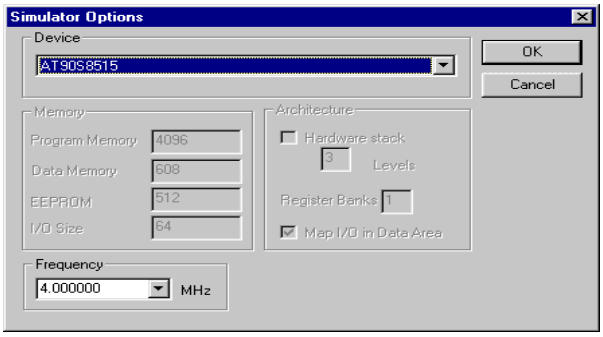
Das Simulieren im Studio

Es kommt oft vor, dass eine geschriebene Software nicht auf Anhieb das tut, was sie soll. Das Ausprobieren im Chip selber kann schwierig sein, besonders wenn man aufgrund minimaler Hardware wenig Möglichkeiten hat, sich Zwischenergebnisse ausgeben zu lassen. Dafür ist das Studio von ATMEL ideal. Mit seiner Hilfe kann das Programm auf dem Trockenen getestet werden und Schritt für Schritt beobachtet werden.



Das Studio wird gestartet und sieht so aus (auch hiervon gibt es neuere Versionen, die anders aussehen):

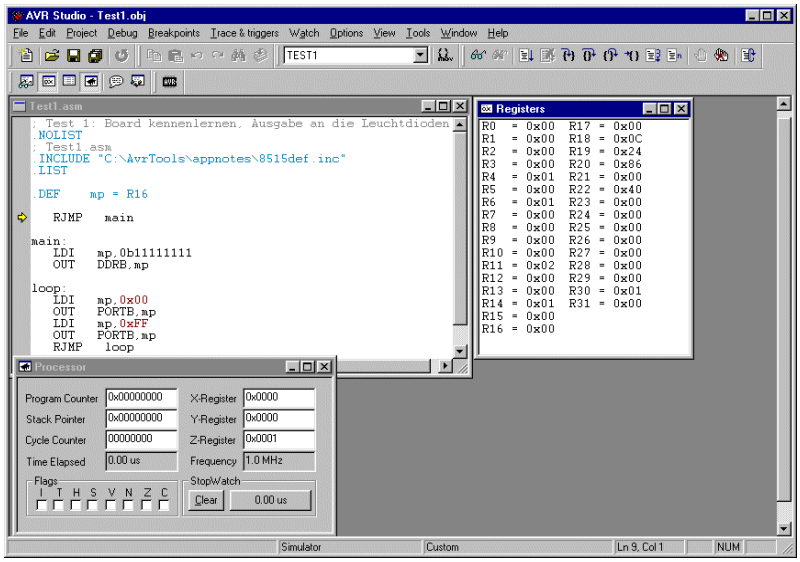
Als erstes öffnen wir eine Datei (Menue File Open). Wir verwenden hier die Tutorial-Datei test1.asm, weil sie etwas mehr Befehle enthält als unser einfaches Testprogramm. Wir öffnen die Datei TEST1.OBJ. Dabei werden wird vermutlich gefragt, welche Options wir dazu verwenden wollen (wenn nicht: im Options-Menue Simulator-Options auswählen).



Die stellen wir so ein:

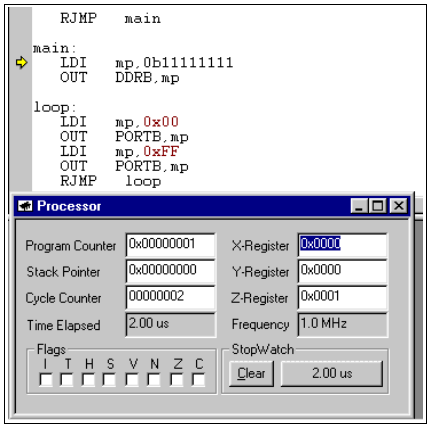
Bei der Device-Auswahl werden die richtigen Parameter voreingestellt, wir müssen nur die Taktfrequenz unseren Zwecken anpassen.

Damit wir beim Simulieren etwas sehen, öffnen wir mit dem View-Menue die beiden Zusatzfenster View Processor und View Registers. In diesen beiden Fenstern wird der Zustand des Prozessors und der Register angezeigt.
Die Anzeige sollte jetzt etwa so aussehen.



Im Prozessorfenster sind alle Werte abgebildet, die mit der Programmsteuerung, den Flags und den Ausführungszeiten zu tun haben (hier: 1 MHz ist eingestellt). Mit der Stopuhr lassen sich Ausführungszeiten des Programmes oder einzelner Routinen messen.

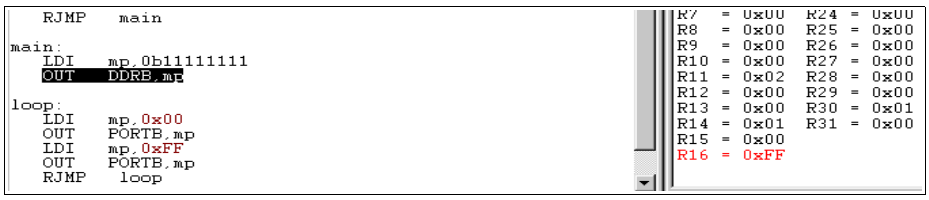
Jetzt starten wir das Programm. Aber nicht etwa mit GO, weil dann die Befehle nur so durchrattern und wir nichts sehen würden. Wir starten im Einzelschritt mit Trace Into oder F11. Damit wird der erste Befehlsschritt ausgeführt.



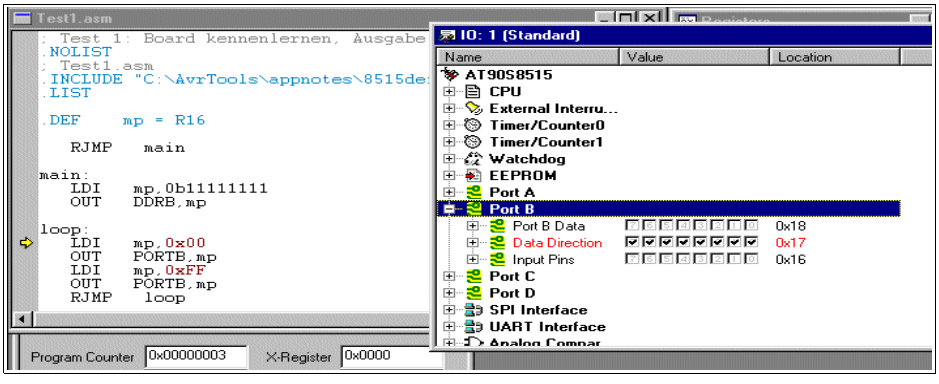
Nun sieht der Prozessor wie im folgenden Bild aus.

Der Programmzähler steht jetzt bei 1, der Zykluszähler bei 2 (der RJMP braucht zwei Zyklen). Bei einem MHz Takt sind 2 Mikrosekunden vergangen und an den Flags und Pointerregistern ist dabei nichts passiert. Im Quelltextfenster ist der Zeiger auf den nächsten Befehl gesetzt.

Erneutes Drücken von F11 führt den zweiten Schritt aus, das Register mp (=R16) wird mit 0xFF geladen.



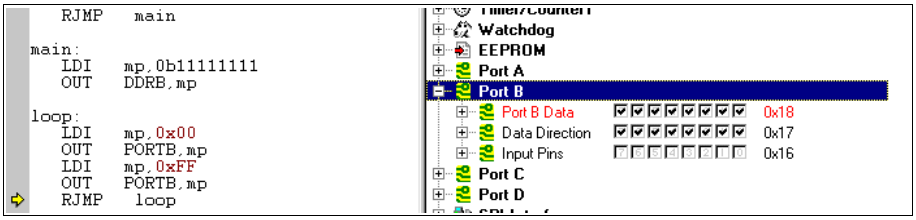
Jetzt wird unser Register-Fenster interessant. Das Register R16 zeigt, in rot gehalten, den neuen Wert an. Wir können übrigens Prozessorgott spielen und einfach Registerinhalte im Registerfenster willkürlich ändern, wenn wir mit dem Wert im Simulator nicht einverstanden sind.



Jetzt kommt Schritt 3, die Ausgabe an das PortB-Richtungsregister. Damit wir was sehen nach der Ausführung mit F11, öffnen wir mit View einen neuen I/O-view und dort den Port B.
Die Anzeige sieht jetzt so wie nebenan aus.

Im Data Direction Register des I/O-View-Fensters wird der neue Wert des Richtungsregisters mit kleinen Häkchen angezeigt. Auch die Ein- und Ausgabe-Pins können wir hier manipulieren und bei Bedarf einen Pin ändern.

Die beiden nächsten Schritte führen wir mit F11 aus. Sie sind hier nicht abgebildet.



Das Setzen der Ausgabe-Pins auf Eins mit LDI mp,0xFF und OUT PORTB,mp ergibt in einem neuen I/O-View dann folgendes Bild.

Nun sind auch die ausgabeseitigen Port-Bits alle Eins geworden, der I/O-View des Ports zeigt dies an.

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

Register

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 Numerierung der Bits: sie beginnt immer bei Null.
In einen solchen Speicher passen Zahlen von 0 bis 255 (Ganzzahl ohne Vorzeichen), 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 Befehlen verwendet werden können,
- Operationen mit ihrem Inhalt mit nur einem Befehlswort ausgeführt werden können,
- direkt an das Rechenwerk, den Akkumulator, angeschlossen sind,
- sowohl Quelle von Daten als auch Ziel des Ergebnisses der Operation sein können.

Es gibt 32 davon in jedem AVR. Sie 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, sie stellen Regieanweisungen an den Assembler dar und erzeugen selbst keinen ausführbaren Code. Sie beginnen immer in Spalte 1 der Zeile mit einem Punkt.
Statt des Registernamens R16 wird dann fürderhin immer der neue Name verwendet. Das könnte also ein schreibintensives Programm werden.

Mit dem Befehl

```
        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 der Load-Befehl als auch das Zielregister (R16) als auch die Konstante 150, auch wenn man das auf den ersten Blick nicht sieht. Zum Glück müssen wir uns um diese Übersetzung nicht kümmern, das macht der Assembler.

In einem Befehl können auch zwei Register vorkommen. Der einfachste Befehl dieser Art ist der Kopierbefehl 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
```

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

Das erstgenannte Register im Assemblerbefehl 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 lernen!)

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. Dieser Befehl

```
       CLR MeinLieblingsRegister
```

ist für alle Register zulässig.

Diese zwei Klassen von Registern gibt es ausser bei LDI noch bei folgenden Befehlen:

- 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 Befehlen ein Register zwischen R16 und R31 sein! Wer also vorhat, solche Befehle 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 leichter ein Register, wenn man ihm einen besonderen Namen gegeben hat.

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-Kommandos 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 den Befehl LPM. Er 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 zweite Byte des Wortes im Programmspeicher gelesen. Da die Erhöhung des 16-Bit-Speichers um Eins auch oft vorkommt, gibt es auch hierfür einen Spezialbefehl 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). Der analoge Befehl zum Zeiger vermindern heisst SBIW (SuBtract Immediate Word). Anwendbar sind die beiden Befehle 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-Anweisungen für den Assembler. Byteweise Listen werden so erzeugt:

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

Auf jeden Fall ist darauf achten, dass die Anzahl der einzufügenden Bytes pro Zeile geradzahlig sein muss. Sonst fügt der Assembler ein Nullbyte am Ende hinzu, das vielleicht gar nicht erwünscht ist.
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 Befehle...]
Label2:
    [... hier kommen noch irgendwelche Befehle...]
Sprungtabelle:
.DW Label1,Label2
```

Beim Lesen per LPM erscheint übrigens 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.

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.

Ports

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.

Es gibt insgesamt 64 Ports, die aber nicht bei allen AVR-Typen auch tatsächlich physikalisch vorhanden sind. 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.

Ports haben eine feste Adresse, über die sie angesprochen werden können. Die Adresse gilt weitgehend unabhängig vom AVR-Typ. So befindet sich der Ausgabeport der Parallelschnittstelle B an der Portadresse 0x18 (0x für hexadezimal!). Die Adressen 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 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. Die Include-Datei 8515def.inc kommt mit folgender Direktive in die Quellcode-Datei:

```
.INCLUDE "C:\Irgendwo\8515def.inc"
```

und alle für diesen Typ bekannten Register sind jetzt mit ihrem Alias-Namen leichter ansprechbar.

Ports nehmen oft ganze Zahlen auf, 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. Diese Namen für Bitpositionen in einem Port sind auch in den Include-Dateien definiert, so dass man sich auch die konkrete Bitposition bestimmter Bits nicht mehr merken muss. Die Bitnamen sind in den Datenblättern und bei den hier detaillierter dargestellten Ports dargestellt.

So enthält z.B. das MCU General Control Register, genannt MCUCR, eine Reihe von Steuerbits, die das generelle Verhalten des Chips beeinflussen (siehe die Beschreibung des MCUCR im Detail). Ein 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 Befehlsfolge die entsprechende einschläfernde Wirkung programmieren, also z.B. so: ...

```
.DEF MeinLieblingsregister = R16
       LDI MeinLieblingsregister, 0b00100000
       OUT MCUCR, MeinLieblingsregister
       SLEEP
```

Der Out-Befehl 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 eine SLEEP-Instruktion findet. 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.

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.

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 Befehle 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 Befehle haben einen gravierenden Nachteil: sie lassen sich nur auf Ports bis zur Adresse 0x1F anwenden, für Ports darüber sind sie leider unzulässig.

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. dem ST-Befehl. Da die ersten 32 Adressen 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,ZL
```

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).

Details wichtiger Ports in den AVR

Die folgende Tabelle kann als Nachschlagewerk für die wichtigsten gebräuchlichsten Ports 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	*Register*	*Name*
Akkumulator	Flagregister	SREG
Stapel (Stack)	Stackpointer	SPH:SPL
Ext.SRAM,Ext. Interrupt	MCU General Control Register	MCUCR
Ext.Interrupt	Interrupt Mask Register	GIMSK
	Interrupt Flag Register	GIFR
Timer Interrupts	Timer Int Mask Register	TIMSK
	Timer Int Flag Register	TIFR
Timer 0	Timer/Counter 0 Control Register	TCCR0
	Timer/Counter 0	TCNT0
Timer 1	Timer/Counter 1 Control Register 1 A	TCCR1A
	Timer/Counter 1 Control Register 1 B	TCCR1B
	Timer/Counter 1	TCNT1
	Output Compare Register 1 A	OCR1AH:OCR1AL
	Output Compare Register 1 B	OCR1BH:OCR1BL
	Input Capture Register	ICR1H:ICR1L
Watchdog Timer	Watchdog Timer Control Register	WDTCR
EEPROM	EEPROM Adress Register	EEAR
	EEPROM Data Register	EEDR
	EEPROM Control Register	EECR
SPI	Serial Peripheral Control Register	SPCR
	Serial Peripheral Status Register	SPSR
	Serial Peripheral Data Register	SPDR
UART	UART Data Register	UDR
	UART Status Register	USR
	UART Control Register	UCR
	UART Baud Rate Register	UBRR
Analog Comparator	Analog Comparator Control and Status Register	ACSR

Gerät	*Register*	*Name*
I/O-Ports	Ausgaberegister	PORTx
	Datenrichtungsregister	DDRx
	Eingaberegister	PINx

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-Befehle, die die jeweiligen Status-Bits beeinflussen.

Bit	*Rechnen*	*Logik*	*Ver-gleich*	*Bits*	*Schieben*	*Sonst*
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
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

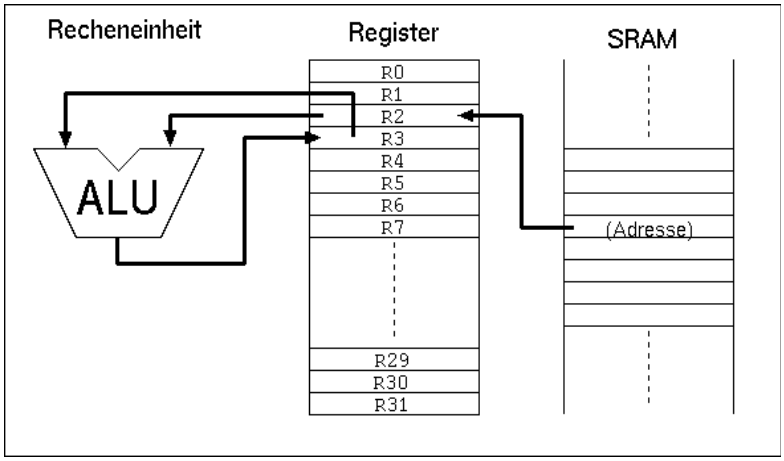
SRAM

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.

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.Befehl), irgendwie mit dem Inhalt von Register R3 verknüpft und das Ergebnis in Register R3 gespeichert (Befehl 2). Im letzten Schritt kann der geänderte Wert auch wieder in das SRAM geschrieben werden (3.Befehl).
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.

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 feste 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.

Wie verwendet man SRAM?

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 dem Befehl

```
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
```

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

Eine weitere Adressierungsart für SRAM-Zugriffe ist die Verwendung von Pointern, auch Zeiger genannt. Dazu braucht es zwei Register, die die 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 addressierte 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.

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 Pointerregister 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 Pointerregister 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 zwei werden nur für den Zugriff addiert, der Registerinhalt von Y wird nicht verändert. Zur weiteren Verwirrung des Publikums geht diese Konstruktion nur mit dem Y- und dem Z-Pointer, nicht aber mit dem X-Pointer!

Der korrespondierende Befehl 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.

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 Stapel hin wäre. Das kluge Wort für diese Struktur ist Last-In-First-Out (LIFO) oder schlichter: die Letzten werden die Ersten sein.

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. (Der Stapel oder Turm wächst nach unten, d.h. zu niedrigeren Adressen hin.)

```
.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 mit der Assembler-Direktive

```
.INCLUDE "C:\irgendwo\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. Das Ablegen des Registers auf den Stapel lohnt also programmtechnisch immer nur dann, wenn

- der Wert in Kürze, d.h. ein paar Befehle 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.

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 dem Befehl

```
       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 PUSHs, dann sind die 16 Bits auf dem Stapel. Beim Erreichen des Befehls 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. 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 beim vollstopftem SRAM.

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, Verzweigungen, Unterbrechungen, etc.

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 des Befehles

```
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 0000 stehende Code wortweise in die Ausführungsmimik des Prozessors geladen und ausgeführt. Während der Ausführung wird die Adresse um 1 erhöht und schon mal der nächste Befehl aus dem Programmspeicher geholt (Fetch during Execution). Wenn der erste Befehl keine Verzweigung des Programmes auslöst, kann der zweite Befehl also direkt nach dem ersten ausgeführt werden. Jeder Taktzyklus am Takteingang des Prozessors entspricht daher einem ausgeführten Befehl (wenn nichts dazwischenkommt).

Der erste Befehl 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 Spezialbefehle, 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 Befehle, mit denen auf eine Unterbrechung reagiert werden soll, müssen an dieser

Stelle stehen. Werden also Interrupts verwendet, dann kann der erste Befehl 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.
```

Der Befehl 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.

Linearer Programmablauf und Verzweigungen

Nachdem die ersten Schritte im Programm gemacht sind, noch etwas triviales: Programme laufen linear ab. Das heißt: Befehl für Befehl 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 dem Befehl 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 beim INC-Befehl 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. Der entsprechende Sprungbefehl 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 Befehle und Bedingungen gesetzt oder rückgesetzt werden (auch Prozessorflags genannt), geht aus den einzelnen Befehlsbeschreibungen in der Befehlsliste hervor. Entsprechend kann mit den bedingten Sprungbefehlen

```
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 Befehle braucht man sehr selten. Nur Zero und Carry sind für den Anfang wichtig.

Zeitzusammenhänge beim Programmablauf

Wie oben schon erwähnt entspricht die Zeitdauer zur Bearbeitung eines Befehls in der Regel exakt einem Prozessortakt. Läuft der Prozessor mit 4 MHz Takt, dann dauert die Bearbeitung eines Befehls 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 Befehlen, z.B. die Sprungbefehle oder die Lese- und Schreibbefehle für das SRAM, die zwei oder mehr Taktzyklen erfordern. Hier hilft nur die Befehlstabelle weiter.

Um genaue Zeitbeziehungen herzustellen, muss man manchmal den Programmablauf um eine bestimmte Anzahl Taktzyklen verzögern. Dazu gibt es den sinnlosesten Befehl des Prozessors, den Tunix-Befehl:

```
        NOP
```

Dieser Befehl 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 dieser Befehl 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 Sprungbefehle. 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 dem DEC-Befehl 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.

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.

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 abschließende Return-Befehl. 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 dem Befehl 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 den absoluten Sprungbefehl:

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

Jetzt muss das "Unterprogramm" allerdings anstelle des RET natürlich ebenfalls einen RJMP-Befehl 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 einem bedingten Verzweigungsbefehl kombiniert werden, der unter bestimmten Bedingungen das Unterprogramm ausführt oder den Aufruf eben überspringt. Für solche bedingten Verweigungen zu einem Unterprogramm eignen sich die beiden folgenden Befehle ideal. Soll in Abhängigkeit vom Zustand eines Bits in einem Register zu einem Unterprgramm 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 der Befehl bei einer Null (Clear) übersprungen wird. Will man auf die umgekehrte Bedingung hin ausführen, so kommt statt SBRC der analoge Befehl SBRS zum Einsatz. Der auf SBRC/SBRS folgende Befehl kann sowohl ein Ein-Wort- als auch ein Zwei-Wort-Befehl sein, der Prozessor weiß die Länge des Befehles korrekt Bescheid und überspringt dann eben um die richtige Anzahl Befehlsworte. Zum Überspringen von mehr als einem Befehl kann dieser bedingte Sprung natürlich nicht benutzt werden.

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

```
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 den nächsten Befehl überspringen. Die entsprechenden Befehle heißen SBIC und SBIS, also etwa so:

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

Hier wird der RJMP-Befehl 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 Befehlen nur die unteren 32 infrage, für die oberen 32 Ports können diese Befehle 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 einem Sprungbefehl 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.

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!)
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 durchnumeriert. 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 niedrigerwertige 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 dem Befehl

```
RETI
```

abschließen. Dieser Befehl stellt den ursprünglichen Befehlszähler wieder her, der vor der Unterbrechung gerade bearbeitet werden sollte und setzt das Interrupt-Status-Bit auf Eins. Der zweite Weg ist das Setzen des Status-Bits per Befehl

```
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 der anschließende Return-Befehl bearbeitet wird, weil das Status-Bit schon um einen Befehl 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 den noch verbliebenen RET-Befehl, 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 der vorherige richtig beendet wurde, 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 einen Ein-Wort-Befehl Platz ist. Das ist in der Regel ein RJMP-Befehl an die Adresse des Interrupt- Unterprogrammes. Es kann auch einfach ein RETI-Befehl 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: Der erste Befehl einer Interrupt-Service-Routine ist die Rettung des Statusregisters auf dem Stapel oder in einem Register. Der letzte Befehl der Routine ist die Wiederherstellung desselben in den Originalzustand vor der Unterbrechung. Jeder Befehl 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.

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.

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 einzelnes 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. Aus hier noch nicht ganz einfach zu erklärenden Gründen stellt man in diesem Fall alle Zahlenbits mit ihrem invertierten Wert dar. 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 (vier Bits = 0 .. 15), bleibt dabei ziemlich viel Raum leer. Für das Speichern der Zahl 250 werden schon drei Register gebraucht, also z.B. so:

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

Befehle 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 folgendermaäßen aussehen:

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

Befehle 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 herübergerettetes siebenbittiges 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 hinzuzuzählen oder die Bits 4 und 5 auf eins zu setzen, wenn wir deren 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.

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 R1,0x30
```

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

```
OR R1,R2
```

Zurück ist es schon schwieriger, weil der naheliegende umgekehrt wirkende Befehl,

```
ANDI R1,0x0F
```

der 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 Befehle 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 ; Umdrehen aller geraden Bits
EOR R1,R16 ; in Register R1 und speichern in R1
```

Sollen alle Bits eines Bytes umgedreht werden, kommt das Einerkomplement 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 der Befehl

```
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 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
```

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 ehmalige 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 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)!

Bei vorzeichenbehafteten Zahlen würde das Rechtsschieben das Vorzeichen in Bit 7 übel verändern. Das darf nicht sein. Desdewegen gibt es neben dem logischen Rechtsschieben auch das arithetische Rechtsschieben. 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
```

Beim ersten Befehl gelangt Bit 7 des unteren Bytes in das Carry-Bit, beim zweiten Befehl dann im Bit 0 des oberen Bytes. Nach dem zweiten Befehl 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 Dividieren 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 amn 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.

Addition, Subtraktion und Vergleich

Ungeheuer schwierig in Assembler ist Addieren, Dividieren und Vergleichen. Zart-besaitete Anfänger sollten 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 zu den Registern R1:R2 die Inhalte 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, 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 der Sockenauszieher-Hammer-Befehl! 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 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 auftrat? Am Halbübertrags-Bit im Status-Register. Dieses H-Bit zeigt für einige Befehle 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 Eregebnisregister R1 erhöht und eine Korrektur des oberen Nibbles ist nicht nötig (die obere 6 im Korrekturspeicher 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.

Umwandlung von Zahlen

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 höchstwertigen 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. Tritt bei irgendeinem Schieben 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 dem LPM-Befehl 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.

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 Multplikation 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 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:
; 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-
```

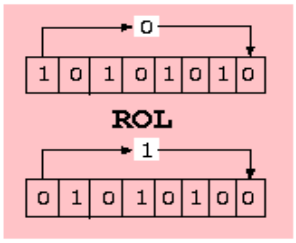
```
; plikator 2 enthalten sind, wenn ja, dann weitermachen
        tst rm2 ; alle bits Null?
        brne MULT8a ; wenn nicht null, dann weitermachen
; Ende der Multiplikation, Ergebnis in reh:rel
; Endlosschleife
LOOP:
        rjmp loop
```

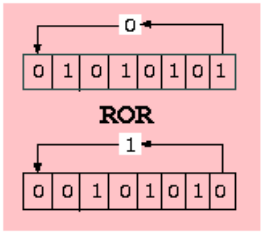
Zu Beginn der Berechnung liegen die folgenden Bedingungen vor:

	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

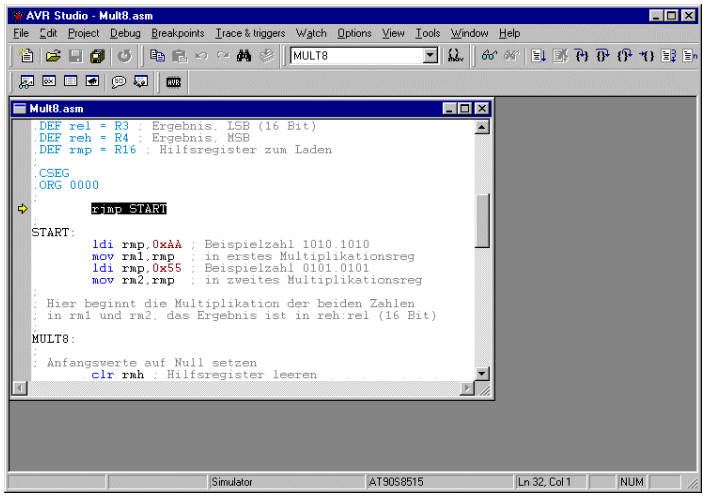
Für das Verständnis der Berechnung ist die Kenntnis des Assembler-Befehles ROL bzw ROR wichtig. Der Befehl verschiebt die Bits eines Registers nach links (ROL) bzw. rechts (ROR), schiebt das Carry-Bit aus dem Statusregister in die leer werdende Position im Register und schiebt dafür das beim Rotieren 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:



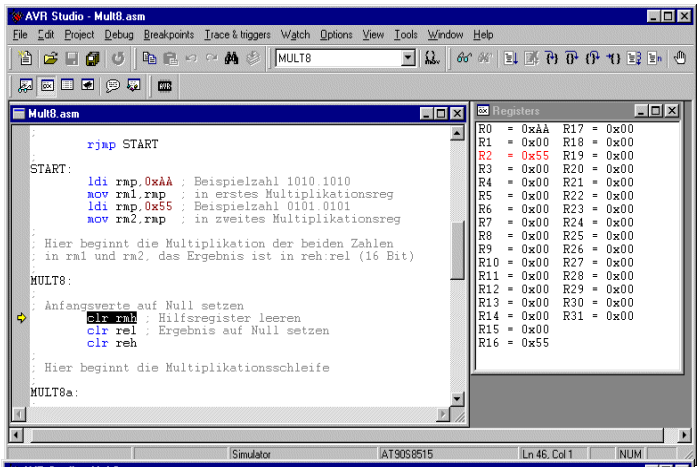


Multiplikation im Studio

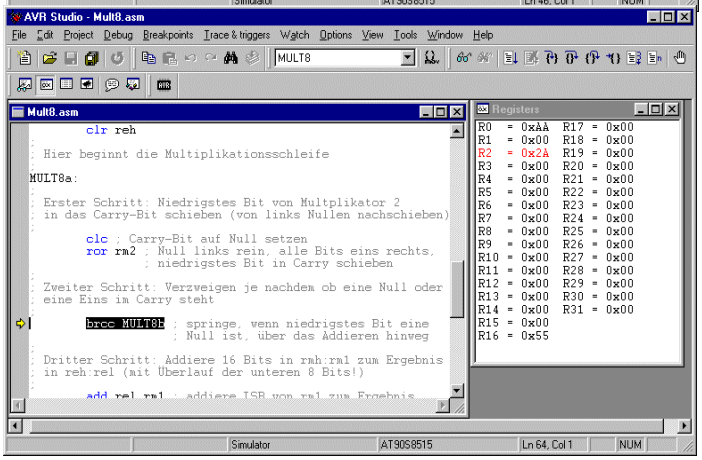
Die folgenden Bilder zeigen die einzelnen Schritte im Studio:
Der Object-Code ist gestartet, der Cursor steht auf dem ersten Befehl. Mit F11 machen wir Einzelschritte.



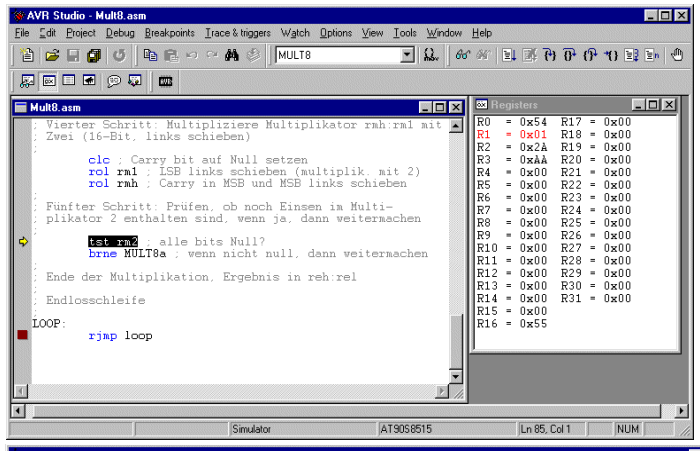
In die Register R0 und R2 werden die beiden Werte AA und 55 geschrieben, die wir multiplizieren wollen.



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.



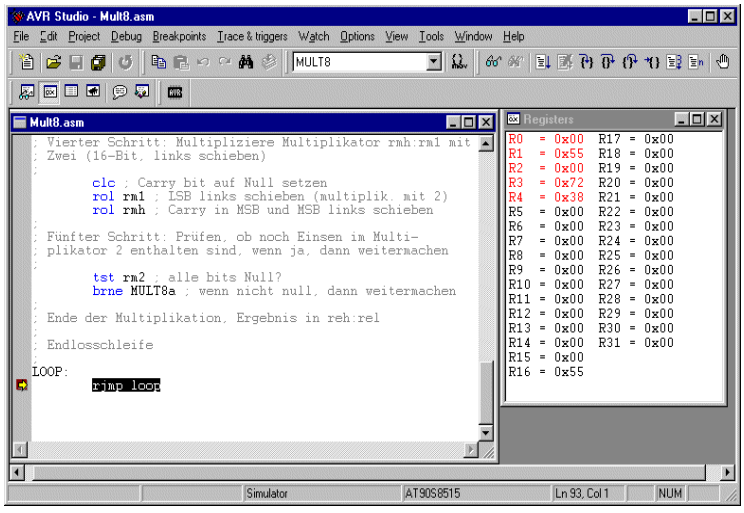
Weil im Carry eine Eins war, wird 00AA in den Registern R1:R0 zu dem (leeren) Registerpaar R4:R3 hinzu addiert. 00AA steht nun auch dort herum.



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!

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
```

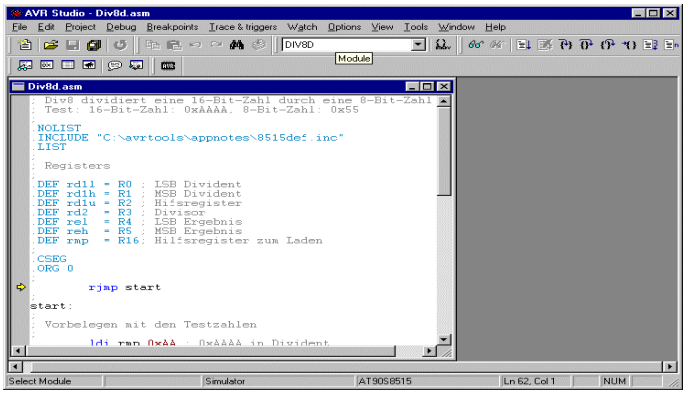
Programmschritte beim Dividieren

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.

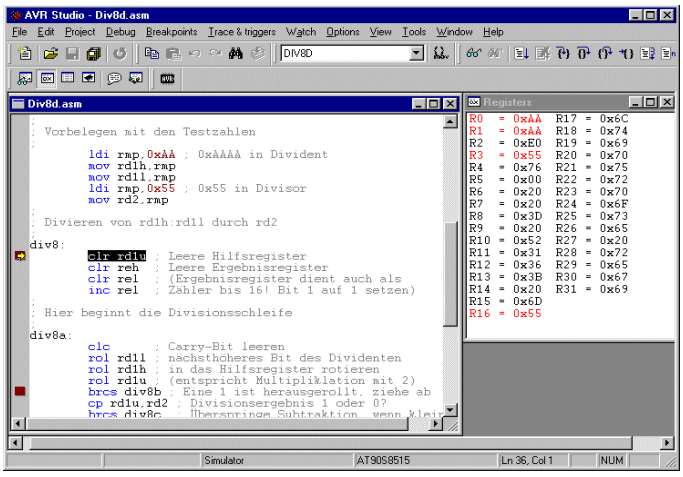
Für das Rotieren gilt das oben dargestellte Procedere (siehe oben, zum Nachlesen).

Das Dividieren im Simulator

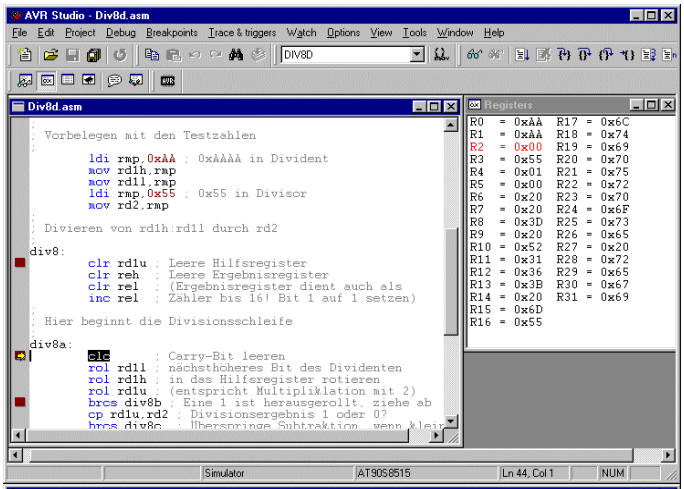


Die folgenden Bilder zeigen die Vorgänge im Simulator, dem Studio. Dazu wird der Quellcode assembliert und die Object-Datei in das Studio geladen.

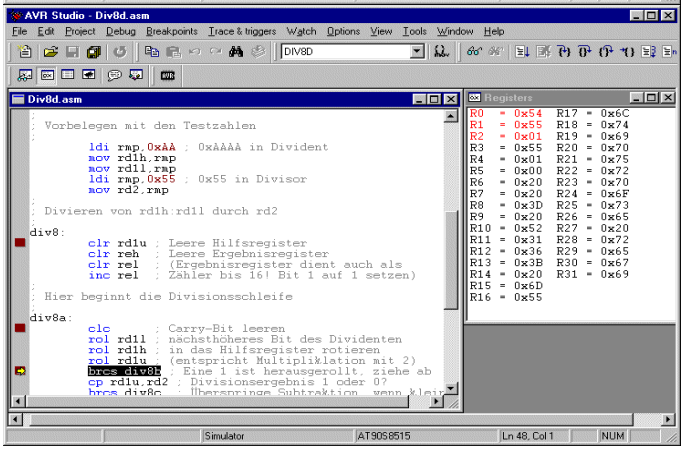
Der Object-Code ist gestartet, der Cursor steht auf dem ersten Befehl. Mit F11 machen wir Einzelschritte.



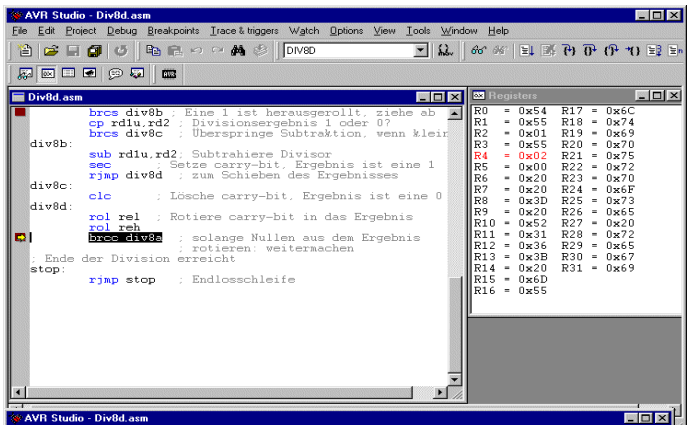
In die Register R0, R1 und R3 werden die beiden Werte 0xAAAA und 0x55 geschrieben, die wir dividieren wollen.



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 der nächste Befehl (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.

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, Version 0.1 Januar 2002 , (C)2002 by info@avr-asm-tutorial.net
;*****************************************************************************************************************
; Die folgenden Regeln gelten für alle Routinen zur Zahlumwandlung:
; - Fehler während der Umwandlung werden durch ein gesetz tes 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 einigenRoutinen
;   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 verneiden 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 benutzt. 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 Fehlermel dung 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 dezima len 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 ungülti ges 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 wieder hergestellt), 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
```

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 ASCII-Zeichenfolge auf einem LCD-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-Hexzahl $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. Der Befehl 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 verwan-
;       delt 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 Takt-
;   zyklen (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 AT90S-Prozessoren genauso gut.
.NOLIST
.INCLUDE "8515def.inc"
.LIST
; Start des Testprogramms
; Schreibt eine Zahl in R1 und startet die Wand-
; lungsroutine, 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
```

Tabellen

Befehle nach Funktion geordnet

Zur Erklärung über Abkürzungen bei Parametern siehe die Liste der Abkürzungen.

Funktion	*Unterfunktion*	*Befehl*	*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
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

Funktion	*Unterfunktion*	*Befehl*	*Flags*	*Clk*
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	R JMP 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*	*Befehl*	*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

Befehle, alphabetisch

ADC r1,r2
ADD r1,r2
ADIW rd,k63
AND r1,r2
ANDI rh,k255, Register
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, Register
CLC
CLH
CLI
CLN
CLR r1
CLS
CLT, Anwendung
CLV
CLZ
COM r1
CP r1,r2
CPC r1,r2
CPI rh,k255, Register
CPSE r1,r2
DEC r1
EOR r1,r2
ICALL
IJMP IN r1,p1
INC r1
LD rp,(rp,rp+,-rp) (Register), SRAM-Zugriff, Ports
LDD r1,ry+k63
LDI rh,k255 (Register), Pointer
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, in Int-Routine
PUSH r1, in Int-Routine
RCALL k4096
RET, in Int-Routine
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, Register
SBRC r1,b7
SBRS r1,b7
SEC
SEH
SEI, in Int-Routine
SEN
SER rh
SES
SET, Anwendung
SEV
SEZ
SLEEP
ST (rp/rp+/-rp),r1 (Register), SRAM-Zugriff, Ports
STD ry+k63,r1
STS k65535,r1
SUB r1,r2
SUBI rh,k255
SWAP r1
TST r1
WDR

Ports, alphabetisch

ACSR, Analog Comparator Control and Status Register
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, Timer 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

.CSEG ; Assembliere in das Code-Segment
.DB ; Füge Datenbyte(s) in das Code- oder EEPROM-Segment ein
.DEF ; Definiere Registername
.DW ; Füge Wort in das Code- oder EEPROM-Segment ein
.ENDMACRO ; Beende die Makrodefinition
.ESEG ; Assembliere in das EEPROM-Segment
.EQU ; Definiere Konstante einmalig
.INCLUDE ; Füge Quelltext aus Datei ein
.MACRO ; Beginne Makro-Definition
.ORG ; Setze Adresszähler auf Wert

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