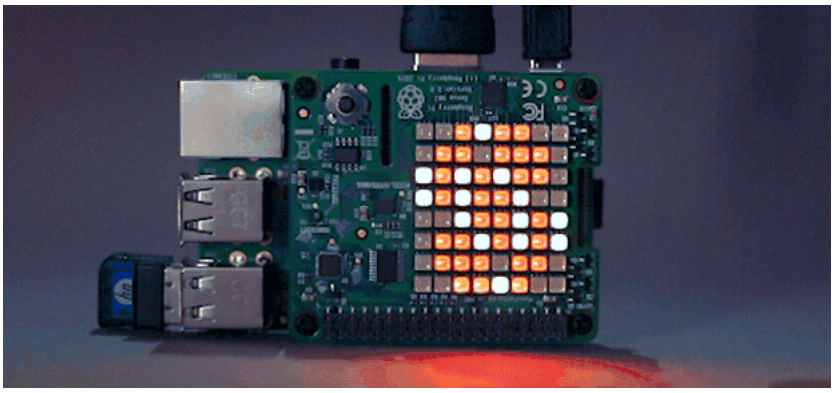
ATmega Controller

Parameter	Kursinformationen
Veranstaltung:	`Vorlesung Digitale Systeme`
Semester	`Sommersemester 2022`
Hochschule:	`Technische Universität Freiberg`
Inhalte:	`Überblick zur ATmega Familie`
Link auf den GitHub:	https://github.com/TUBAF-Ifi-LiaScript/VL_DigitaleSysteme/blob/main/lectures/02_ATmegaFamilie.md
Autoren	Sebastian Zug, Karl Fessel & Andrè Dietrich

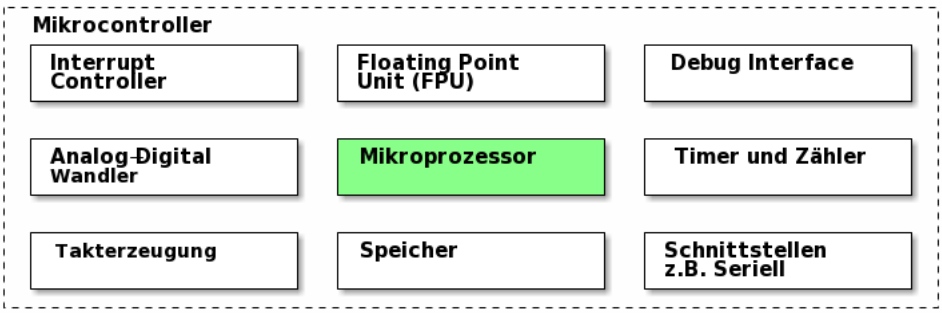


Mikrocontroller vs. Mikroprozessor

Typischerweise fehlen beim Mikroprozessor im Chip viele Dinge, die einen Rechner ausmachen, wie zum Beispiel der Arbeitsspeicher (RAM), Programmspeicher usw.. Entsprechend sind dann der Daten- und Adress-Bus zur Ansteuerung von externem Speicher sowie Leitungen für Interrupts aus dem Chip herausgeführt. Beim Mikrocontroller sind die Komponenten wie der Programmspeicher im Chip integriert:

- Timerbausteine
- Analoge Eingänge
- Digitale Eingänge
- Interruptsystem

Ziel ist es, möglichst alle benötigten Elemente in einem Chip zu vereinen.



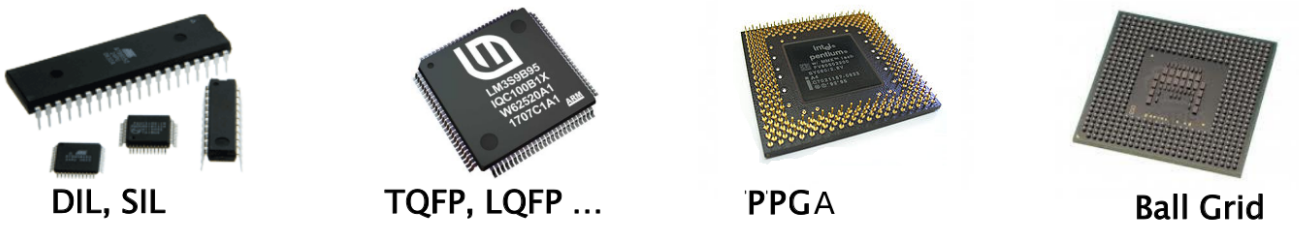
Merke: Der Übergang zwischen Mikrocontrollern und Mikroprozessoren ist fließend!

Kenngrößen eines Controllers

Feature/Parameter des Controllers

- x-Bit-Architektur
- vorhandene Peripheriebausteine (Kommunikationsschnittstellen, Debug-Interfaces, Gleitkomma-Recheneinheiten)
- maximale/minimale Taktrate
- Größe des internen / extern anschließbaren Speichers
- Energieverbrauch
- Debugging-Interfaces
- ...
- verfügbare Compiler
- unterstützte Programmiersprachen, Bibliotheken
- ...
- garantierte Lieferbarkeit

Mechanische Konfiguration



Grundsätzlich unterscheidet man bei elektronischen Bauteilen zwischen:

- „durchsteckmontierbaren“ (Through Hole Technology – THT) und
- „oberflächenmontierbaren“ (Surface Mounted Technologys – SMT)

Bauformen. „Surface Mounted Devices – SMD“ bezieht sich auf ein Bauteil der vorgenannten Gruppe. Durchsteck-Teile benötigen zusätzliche Arbeitsschritte und werden in hochautomatisiert gefertigten Platinen nur aus Gründen der Stabilität realisiert.

Das Rastermaß der Pins wird aus historischen Gründen im Zoll-Basis (25,4mm) beschrieben. Das „Grundmaß“ war demzufolge das Zoll und für kleine Maße wurde meist das `mil` verwendet (1/1000 Zoll = 25,4 µm). Im Zuge der Internationalisierung setzen sich immer mehr die metrischen Maße durch, so dass typische Pitches heute bei z. B. 0,5 mm liegen.

Bezeichnung	Bedeutung
DIP / DIL	Dual In-Line (Package) meist im Raster 2,54 mm (=100 mil)
xQFP	(Low Profile / Thin) Quad Flat Package Pins an vier Seiten, Raster 1,27 bis 0,4 mm
xPGA	(Plastic / Ceramic) Pin Grid Array mit Pin-Stiften an der Unterseite
xBGA	Ball Grid Array Package mit kleinen Lotkügelchen an der Unterseite

Das Gehäuse schützt den Mikrocontroller vor Umwelteinflüssen. Achten Sie bei der Auswahl insbesondere auf den Temperaturbereich!

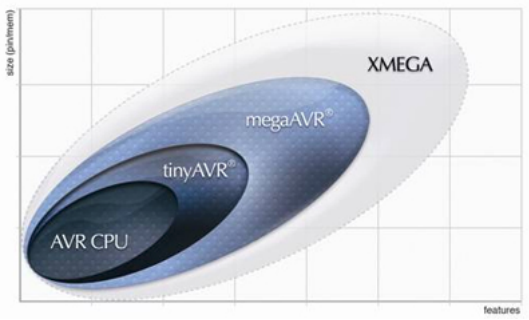
Für unseren Controller gibt das Handbuch einen zulässigen Temperaturbereich von -40°C to 85°C an. Dabei ist aber kein vollständig identisches Verhalten innerhalb dieses Spektrums zu erwarten. Vielmehr unterscheiden sich die Stromaufnahme und die Verlässlichkeit der Speicherelemente:

Reliability Qualification results show that the projected data retention failure rate is much less than 1 PPM over 20 years at 85°C or 100 years at 25°C (Handbuch, Seite 17)

Mikrocontroller Familie

> Von einer Familie spricht man in Bezug auf einen Mikrocontroller, wenn um einen Mikroprozessor unterschiedlichen Peripherie angeordnet wird. Damit verändert sich die Funktionalität von Familienmitglied zu Familienmitglied, der grundlegende Kern ist aber identisch.

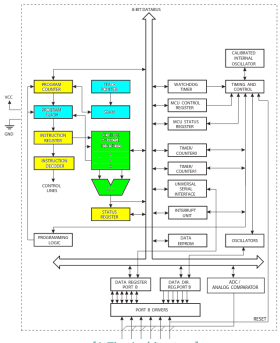
Die vormalige Firma AVR (jetzt Microchip) macht das anhand einer Grafik deutlich:



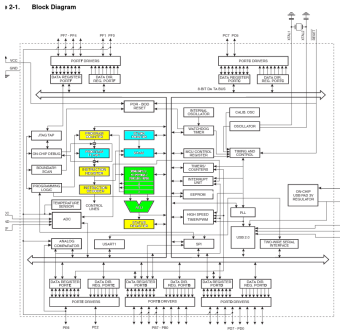
Gegenüberstellung verschiedener Mikrocontroller auf der Basis der AVR CPU [Atmel]

ATtiny Controller

Der Tiny Controller findet sich im unteren Teil der Leistungsklasse wieder, der in AtMega32U4 repräsentiert eine besondere Ausprägung der 32KByte Flash Systeme (zu der auch der auf dem Arduino Uno verbaute Atmega328 gehört).



ATtiny Architektur [AtTinyArchitecture]



ATMega32U4 Architektur [AtMega32U4Architecture]

Atmega Vergleich

Einen umfangreicheren Überblick zu den 8-Bit Controllern der Firma Microchip gibt die Aufstellung unter dem [Link](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30010135E.pdf).

Die Namensgebung ergibt sich dabei aus der Speichergröße des verwendeten Typs:

Device	Flash	EEPROM	RAM	Interrupt Vector Size
ATmega48A	4KBytes	256Bytes	512Bytes	1 instruction word/vector
ATmega48PA	4KBytes	256Bytes	512Bytes	1 instruction word/vector
ATmega88A	8KBytes	512Bytes	1KBytes	1 instruction word/vector
ATmega88PA	8KBytes	512Bytes	1KBytes	1 instruction word/vector
ATmega168A	16KBytes	512Bytes	1KBytes	2 instruction words/vector
ATmega168PA	16KBytes	512Bytes	1KBytes	2 instruction words/vector
ATmega328	32KBytes	1KBytes	2KBytes	2 instruction words/vector
ATmega328P	32KBytes	1KBytes	2KBytes	2 instruction words/vector

[AtMega32U4Architecture] Firma Microchip, Handbuch ATmega32U4, https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4_Datasheet.pdf

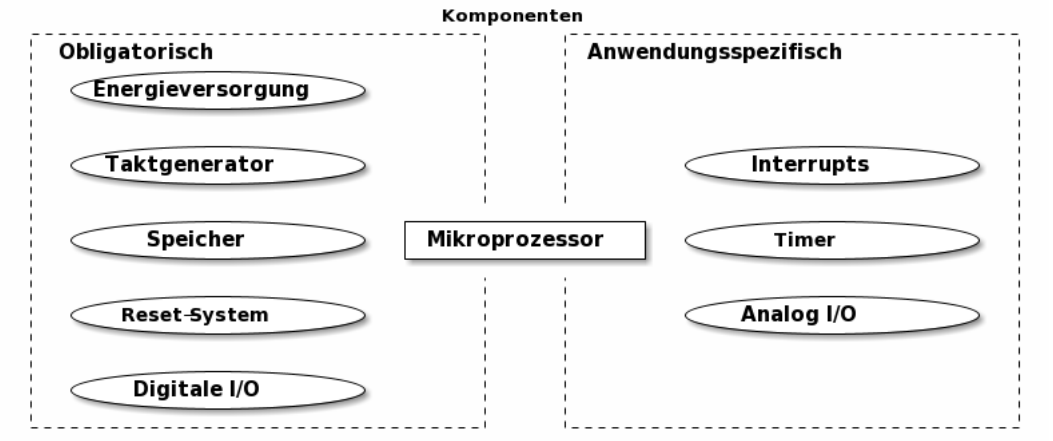
[AtTinyArchitecture] Firma Microchip, Handbuch AtTiny Family, https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2586-AVR-8-bit-Microcontroller-ATtiny25-ATtiny45-ATtiny85_Datasheet.pdf

[Atmel] Werbematerial der Firma AVR

Inbetriebnahme

ATmega328 Pinbelegung [AtMega328]

> Wir nehmen nun an, dass wir uns für den Controller entschieden haben, um ein Problem zu lösen ... wie kommen wir von einen Chip zu einem funktionsfähigen System?



[AtMega328] Firma Microchip, Handbuch AtMega328, http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf

Energieversorgung

Die folgende Darstellung zeigt die Stromaufnahme eines AtmegaX Controllers.

[AtMega328] Seite 596

[AtMega328] Seite 597

[AtMega328, Seite 312]

> **Aufgabe:** Zeichen Sie ein Diagramm das die maximale Taktfrequenz über der anliegenden Betriebsspannung zeigt.

Für jede Anwendung sollte geprüft werden, welche Komponenten des Controllers überhaupt gebraucht werden! Die Energieaufnahme lässt sich damit erheblich reduzieren.

In verschiedenen „Sleep“-Modi kann der Controllers im Hinblick auf:

- Aktive Clocks
- Oszillatoren
- Wake-Up Geräte

abgestimmt werden.

[AtMega328] Seite 47

Idle Mode Die CPU stoppt die Abarbeitung, die Timer, UART, ADC arbeiten aber weiter. Der Controller kann damit zum Beispiel auf ein Ereignis abwarten ohne selbst Energie zu verbrauchen. Der Stromverbrauch sinkt auf ca. 0,04 mA, Aus diesem Modus kann jeder Interrupt die CPU wieder wecken.

ADC Noise Reduction Mode Dieser Mode schränkt die aktivien Module noch weiter ein, der Takt für die IO-Module abgeschaltet. Nur noch der AD-Wandler, die externen Interrupts, das TWI und der Watchdog sind funktionsfähig (wenn man sie nutzen will). Zielstellung ist die reduzierung potentieller Störungen für die Analog-Digital-Wandlung.

Power Save Mode Hier werden fast alle Oszillatoren gestoppt. Die einzige Ausnahme ist der Timer2, welcher asynchron betrieben werden kann. Der ausgewählte Hauptoszillator läuft aber weiter. Damit kann eine minimale Aufweckzeit für das Reaktivieren der CPU realisiert werden.

Power Down Mode Das ist der "tiefste" Schlafmodus. Es werden alle Module gestoppt, das Aufwecken ist allein über die asynchronen Timer möglich. Die Stromaufnahme wird nur noch von Leckströmen bestimmt und liegt bei abgeschaltetem Watchdog-Timer bei 100 nA.

[AtMega328] Firma Microchip, Handbuch AtMega328, http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf

Taktgenerator

[AtMega328] Seite 36

- Interne Oszillatoren (RC-osciallators)
  - Schwingkreis aus Widerstand und Kondensator
  - Maximale Frequenz 8 MHz
  - standardmäßig als Taktquelle vorkonfiguriert
  - Frequenzabweichung +/- (3-10) %

[AtMega328] Seite 312

- Schwingquarze (crystal oscillators)
  - deutliche geringere Maximalabweichung +/- 0.1 %
  - Einschwingdauer deutlich höher (10.000 Taktzyklen)
  - mindestens 3 externe Bauteile (2 Lastkondensatoren + Quarz)
- Externes Taktsignal

[AtMega328] Firma Microchip, Handbuch AtMega328, http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf

Speicher

[AtMega328] Seite 18

Bei der Analyse der Struktur des AVRs haben wir bisher 3 Arten von Speicher kennengelernt:

	Flash	EEPROM	RAM
Zweck	Programmspeicher		Arbeitsspeicher
Größe im Atmega328p	32 KByte	1 KByte	2 KByte
Schreibzyklen	> 10.000	> 100.000	unbegrenzt
Lesezyklen	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt
flüchtig	nein	nein	ja

Flash-ROM des AVRs werden die Programme abgelegt. Über das Programmierinterface werden die kompilierten Programme vom PC an den Controller übertragen und hier gespeichert. Die Adressierung erfolgt über den Programmcounter. Bei der Programmausführung wird der Flash-Speicher Wort für Wort (16 Bit Breite) ausgelesen. Hier können neben den eigentlichen Programminformationen aber auch Daten abgelegt werden. Es kann beliebig oft ausgelesen werden, aber theoretisch nur ~10.000 mal beschrieben werden.

$$3FFF = 16383 Speicherstellen$$

$$16383 \cdot 2Byte = 32766Byte = 32KB = 2^{15}Bit$$

Das **EEPROM** ist ein nichtflüchtiger Speicher, der aus dem Programm heraus beschrieben und gelesen werden kann. Es kann beliebig oft gelesen und mindestens 100.000 mal beschrieben werden. In Mikrocontrollern wird dieser Speicher für das Hinterlegen von Nutzerparametern, Kalibrierdaten usw. genutzt.

Das **RAM** ist ein flüchtiger Speicher, mit dem Ausschalten gehen die Daten verloren. Es kann beliebig oft gelesen und beschrieben werden, der Zugriff wird über den Stack-Pointer gelöst. Einige AVR ermöglichen die Erweiterung des SRAM durch nach außen geführte Adressleitungen

General Purpose Register R0-R31 sind flüchtige, 8 Bit breite temporäre Speicher, die Daten aufnehmen und als Ausgangspunkt für Operationen der ALU genutzt werden (Load-Store Architektur).

Die **I/O Register** dienen der Konfiguration des Controllers bzw. der Interaktion mit der Peripherie (Ergebnis einer Analog-Digital-Wandlung, Zähler Wert, eingehendes Byte auf der seriellen Schnittstelle).

> **Merke** Die unterschiedlichen Speicherformen (RAM, GP Register, I/O Register) werden entsprechend der Idee des *Mapped Memory IO* über einheitliche Befehle adressiert.

[AtMega328] Seite 28

getrennter Adressraum	gemeinsamer Adressraum
- klaren Trennung von Speicher- und Ein-/Ausgabezugriffen.	- homogene Befehle und Adressierungsarten
- der Speicheradressraum wird nicht durch Ein-/Ausgabe-Einheiten reduziert	
- Ein-/Ausgabeadressen können schmaler gehalten werden als Speicheradressen	

Der EEPROM ist beim AVR nicht Bestandteil des *Mapped Memory IO* Konzepts! Vielmehr existiert für diesen ein eigener Zugriffsmechanismus, der über die zugehörigen IO-Register realsiert wird.

[AtMega328] Firma Microchip, Handbuch AtMega328, http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf

Reset-System

[AtMega328] Seite 57

Quellen für Reset

- Power-on Reset
- External Reset
- Watchdog Reset
- Brown-out Reset
- JTAG AVR Reset

Was passiert beim Reset?

- Einschwingen des Oszilatoren
- Initialisieren des Speichers
- Konfiguration der Schlafmodi, Clocks entsprechend den FUSE-Bits
- Prozessorstart an der Adresse 0000. An dieser Adresse MUSS ein Sprungbefehl an die Adresse des Hauptprogrammes stehen (RJMP, JMP)
- Initialisieren des Stacks
- Beginn der Programmabarbeitung

[AtMega328] Firma Microchip, Handbuch AtMega328, http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf

Digitale Ein/Ausgaben

Für die letztendliche Inbetriebnahme fehlt uns noch ein Baustein, die Ansteuerung eines "externen Gerätes". Im Bereich der eingebetteten Systeme ist dies zumeist ein LED, die direkt an einen der Pins des Mikrocontrollers angeschlossen wird.

Wie ist das Ganze konkret am AVR umgesetzt?

[AtMega328] Seite 85

DDRx	PORTx	Zustand des Pin
0 (input)	0	Eingang ohne Pull-Up
0 (input)	1	Eingang mit Pull-Up
1 (output)	0	Push-Pull Ausgang auf Low
1 (output)	1	Push-Pull Ausgang auf High

https://www.youtube.com/watch?v=bDPdrWS-YUc&feature=emb_logo

Das Latch entkoppelt die Eingangsspannung und deren Erfassung, bewirkt aber eine Verzögerung. Im schlimmsten Fall beträgt diese 1.5 Clockzyklen im besten 1 Clockzyklus.

[AtMega328] Seite 86

[AtMega328] Firma Microchip, Handbuch AtMega328, http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf

Integration in Schaltung

Und wie setzen wir das Ganze in einer konkreten Schaltung um?

Schaltplan des Arduino Uno Boards Version 3 [Arduino]

Arduino Uno Boards

Arduino Hardware/Software Cosmos

Ziel: Einfache Entwicklung für Mikrocontroller für studentische (& professionelle) Projekten

- Open-Hardware:
  - Hardwareentwurf und Software sind Open Source
  - Basismodule mit unterschiedlichen Controllern
  - „Shields“ zur Erweiterung der Funktionalität
- Software
  - Entwicklungsumgebung auf der Basis von Processing
  - Bibliotheken für häufig genutzte Funktionen
  - Abstraktion der Programmstruktur `loop` und `setup`

> **Merke:** Die Programmierung erfolgt allein mit der `avrlibc`.

[Arduino] Arduino Webseite Link

Umsetzung eines Hello-World Beispiels

Für das Verständnis der Abläufe sind folgende Dokumente elementar:

Dokument	Link	Bedeutung
AtMega328 Handbuch	microchip	Beschreibung der Architektur und der Features des Controllers
AtMega Assemblerhandbuch	microchip	Präsentation des Assembler Instruktionssets der ATmega Familie
Arduino Uno Schaltplan	arduino	
Arduino Uno Pinbelegung	arduino	

Assembler

```
main:  ; ------- INIT --------------------
       ; set DDRB as output
       ; sbi 0x04, 7               ; set bit in I/O register
       sbi _SFR_IO_ADDR(DDRB),5    ; more general by using MACROS
       ; ------- Busy waiting 1 s -------
loop:  ldi  r18, 41
       ldi  r19, 150
       ldi  r20, 128
L1:    dec  r20       ; 128
       brne L1        ; 255  * (1 + 2)
       dec  r19       ;        150
       brne L1        ;        255  * (1 + 2)
       dec  r18       ;                41 * (1 + 2)
       brne L1        ;
       ; next assembly does not work with tiny avr controlers!
       ; see data sheet I/O
       sbi  _SFR_IO_ADDR(PINB),5
       rjmp loop
```

```
avr-gcc -mmcu=atmega328p -nostdlib as_code.S -o as_code.elf
```

Die Generierung der Warteschleife von 1s ist dem Delay-Generator http://darcy.rsgc.on.ca/ACES/TEI4M/AVRdelay.html entnommen.

[AtMega328] Seite 85

Warum funktioniert der "Trick" mit dem Pin?

Ohne diese Möglichkeit müsste das exklusive Oder für ein Toggeln genutzt werden.

```
in     R24, PORTB   ; Daten lesen
ldi    R25, 0x20    ; Bitmaske laden, hier Bit #5 = 0b0010000
eor    R24, R25     ; Exklusiv ODER
out    PORTB, R24   ; Daten zurückschreiben
```

[AtMega328] Firma Microchip, Handbuch AtMega328, http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf

C++ / C

Variante mittels C und der avrlibc

Simulation time: 00:21.562

avrlibc.cpp

```
// preprocessor definition
#define F_CPU 16000000UL

#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>

int main (void) {
    DDRB |= (1 << PB5);
    while(1) {
        PORTB ^= ( 1 << PB5 );  // Variante 1
        // PINB = (1 << PB5);   // Variante 2
        _delay_ms(1000);
    }
    return 0;
}
```

```
Sketch uses 162 bytes (0%) of program storage space. Maximum is 32256 bytes.
Global variables use 0 bytes (0%) of dynamic memory, leaving 2048 bytes for local variables. Maximum is 2048
bytes.
```

Das gleiche Programm auf der Basis des Arduino Frameworks.

arduino.cpp

```
// the setup function runs once
void setup() {
  // initialize digital pin 13 as an output.
  pinMode(12, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(12, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(12, LOW);
  delay(1000);
}
```

```
Sketch uses 924 bytes (2%) of program storage space. Maximum is 32256 bytes.
Global variables use 9 bytes (0%) of dynamic memory, leaving 2039 bytes for local variables. Maximum is 2048
bytes.
```

Simulink

[16]

[16] Mathworks Simulink, Simulink Support Package for Arduino Hardware, Link

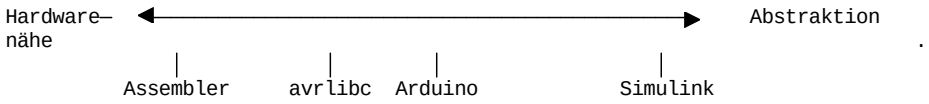
Vergleich

Aspekte	Simulink	Arduino	avrlibc	Assembler	
Code Größe	3232 Byte	928 Byte	30 Byte	24 Byte	
			(162 Byte)		
Bemerkung	Kompletter Scheduler, erweiterte Interfaces	Hardware Timer, printf	Statische Loop für blockierendes Warten	Statische Loop für blockierendes Warten	
Übertragbarkeit des Codes	einige Arduino Boards	Alle Arduino Boards	Gesamte ATmega Familie	Einige Controller der Atmega Familie	
Taktrate	explizit	implizit	explizit	implizit	
Expertenwissen	gering	mittel	hoch	sehr hoch	

Was wir nicht betrachtet haben ...

- Konfigurationen der verschiedenen Toolchains
- Optimierungsstufen des Compilers
- Einbettung weiterer Hardwarefunktionalität (Timerbausteine)

Welche Abgrenzung ist zudem möglich?



Resultat

Wie sieht unser ausführbarer Code am Ende aus? Betrachten wir das Ergebnis der Kompilierung unseres C Beispiels.

```
 Byte Count
 |     Type (00 = Data, 01 = EOF, 02 ...)
 |     |                                Checksumme
 _     _                                _
:100000000C9472000C947E000C947E000C947E0084
:100010000C947E000C947E000C947E000C947E0068
:100020000C947E000C947E000C947E000C947E0058
…
:1000A0000C947E000C947E000C947E000C947E00D8
:1000B0000C947E000C947E000C947E000C947E00C8
:1000C0000C947E000C947E000C947E000C947E00B8
:1000D0000C947E000C947E000C947E000C947E00A8
:1000E0000C947E0011241FBECFEFD1E2DEBFCDBF46
:1000F00000E00CBF0E9480000C9483000C94000070
:0A010000279A2F98FFCFF894FFCF            45
:00000001FF

   |    |                  |
   |          Daten (hier 16 Byte)
  Adresse                                    .
```

Wie können wir die Inhalte interpretieren?

Die erste Zeile wird im Speicher wie folgt dargestellt:

Adresse	Inhalt
0x0000	0C
0x0001	94
0x0002	72
0x0003	00
0x0004	0C
0x0005	94
0x0006	7E
0x0007	00

Die 16 Bit breiten Befehle sind im Little Endian Muster im Speicher abgelegt.

> **Aufgabe:** Recherchieren Sie die Unterschiede zwischen Big Endian und Little Endian Darstellungen.

Das erste Befehlswort entspricht somit $940c = 1001.0100.0000.1100$. Wir übernehmen nun die Rolle des Instruktion-Dekoders und durchlaufen alle Befehle, die im Befehlssatz vorhanden sind.

Auszug Intruction Set [InstManual] Seite 103

Offenbar handelt es sich um einen `Jump` Befehl. Dieser besteht aus 2 Worten, wir müssen also ein weiteres mal auf dem Speicher zugreifen. Im Anschluss steht die Binärrepräsentation unseres Befehls komplett bereit. Die `-` markieren jeweils die Opcode-Bits.

```
    ---- ---       ---
94 0c = 1001.0100.0000.1100
00 72 = 0000.0000.0111.0010

Folgeadresse 00.0000.0000.0000.0111.0010 = 0x72
```

Nun greift aber eine Besonderheit des AVR Controllers. Dieser adressiert seine Speicherinhalte Wortweise. Der GCC erzeugt aber byteweise adressierten Code. Im Objektfile finden sie die byteweisen Adressierungen in der ersten Spalte. Um also die wortbasierten Adressen "umzurechnen" müssen Sie mit 2 multipliziert werden. In unserem Fall folgt daraus `0xe4`.

```
00000000 <__vectors>:
   0: 0c 94 72 00   jmp 0xe4  ; 0xe4 <__ctors_end>
   4: 0c 94 7e 00   jmp 0xfc  ; 0xfc <__bad_interrupt>
   8: 0c 94 7e 00   jmp 0xfc  ; 0xfc <__bad_interrupt>
   c: 0c 94 7e 00   jmp 0xfc  ; 0xfc <__bad_interrupt>
   ...

000000e4 <__ctors_end>:
  e4: 11 24         eor r1, r1
  e6: 1f be         out 0x3f, r1  ; 63
  ...

000000fc <__bad_interrupt>:
  fc: 0c 94 00 00   jmp 0 ; 0x0 <__vectors>
```

Im Programmspeicher steht auf den ersten 8 Byte `jmp 0xe4`

[InstManual] Firma Microchip, Atmel AVR Instruction Set Manual, Seite 103

Aufgaben

- [ ] Machen Sie sich mit den Struktur des Handbuches des Controllers vertraut.
- [ ] Ermitteln Sie die Abläufe bei der Generierung von Atmega Code. Evaluieren Sie Assembler-Dateien und experimentieren Sie mit verschiedenen Optimierungsstufen.