11 I2C Schnittstelle

Student Group

First Name	Surname	Matrikel Nr.

Table of Contents

10 I2C Schnittstelle

Ziele

Nach dieser Lektion sollten Sie:

1. wissen wie die Kommunikation zwischen I2C Master und Slave funktioniert

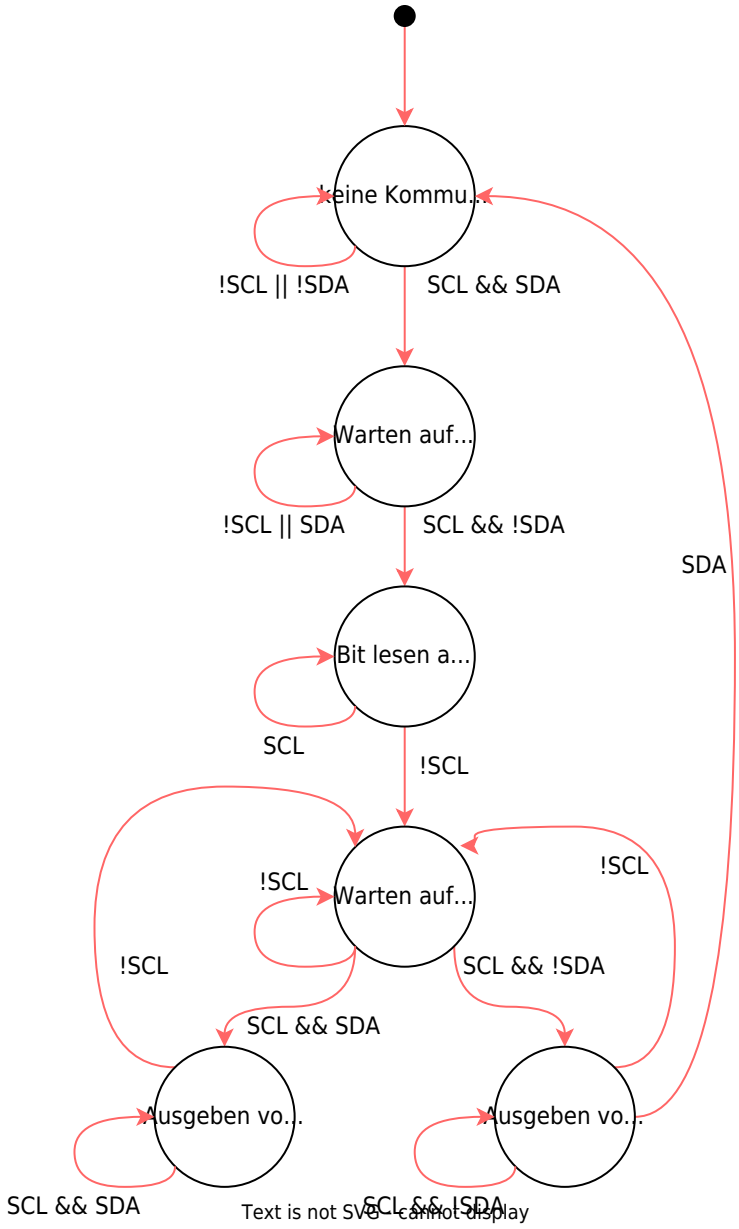
Video

Statemachine für Datenpaket

Statemachine der I2C Kommunikation

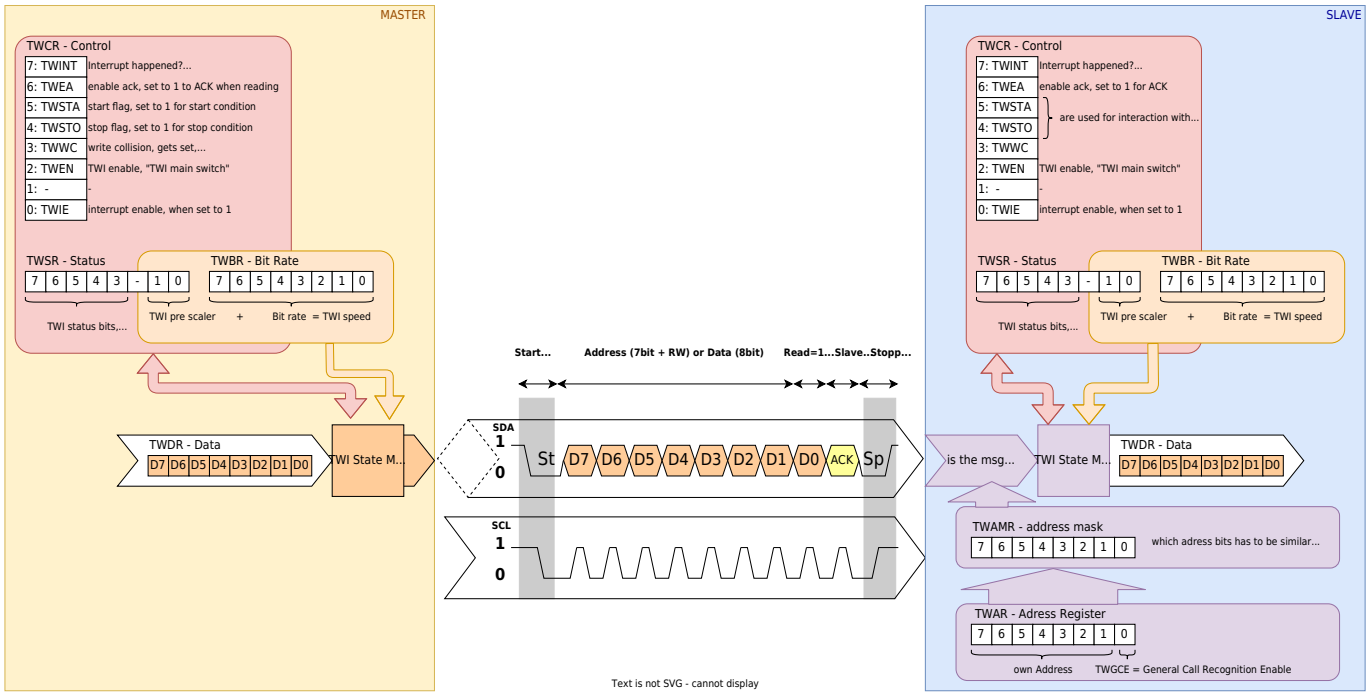
Statemachine der I2C Kommunikation

Fig. 1: Statemachine der I2C Kommunikation



I2C in Kürze und Zeitverlaufsdiagramm

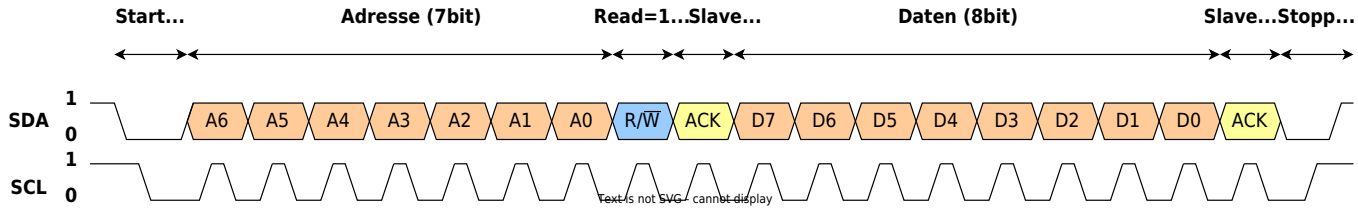
Fig. 2: Zusammenspiel der TWI-Register



Übertragung

Für die I2C Übertragung “trommelt” der Master-IC auf der Taktleitung (SCL). Bei jedem “Trommelschlag” (SCL=High), darf der Slave die Datenleitung (SDA) lesen.
D.h. während der Datenübertragung bleibt die Datenleitung bei SCL=High konstant.
Eine Flanke (=Signalwechsel) auf der Datenleitung während SCL=High definiert Beginn und Ende der Kommunikation.
Eine fallende Flanke auf SDA bei SCL=High stellt das Startbit dar, eine steigende Flanke das Stoppbit.
Läuft keine Kommunikation sind Daten- und Tankleitung auf High.

Fig. 3: Zeitverlaufsdiagramm der I2C Kommunikation

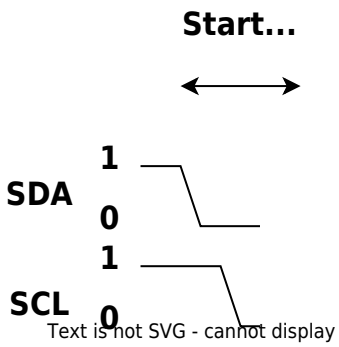


Startbedingung

Um die Übertragung zu beginnen muss die Startbedingung eingeleitet werden. Während SCL HIGH ist (a), geht SDA von HIGH auf LOW. Anschließend startet SCL mit LOW (b).

Für eine Startbedingung werden die Bits innerhalb des TWCR wie folgt gesetzt:

Fig. 4: Startbedingung

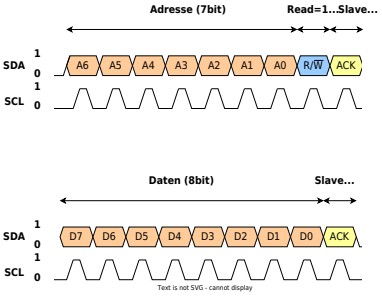



```
TWCR = (1<<TWINT)|(1<<TWEN);       // Setting
TWINT clears interupt flag
                                   // to set the
following state:
     | (1<<TWIE )                  // Enable TWI
Interrupt. --> nur wichtig, falls der Interrupt
geprüft wird!
     | (1<<TWSTA)|(0<<TWSTO);      // Initiate a
START condition.
```

Übertragung

Die entscheidende Voraussetzung für eine erfolgreiche Bitübertragung ist, dass sich der Zustand von SDA nur ändern darf solange SCL auf LOW ist. Allerdings ist der Zustand von SDA erst gültig, wenn SCL auf HIGH ist.

Fig. 5: Übertragung



Für die Übertragung eines Bytes muss TWDR und TWCR wie folgt gesetzt werden.
Zunächst wird die Übertragung der Adresse (SLA_W) betrachtet:

```
TWDR = SLA_W;                      // Load SLA_W
into TWDR
TWCR = (1<<TWINT)|(1<<TWEN);       // Setting
TWINT clears interupt flag
                                   // to start
transmission of address
```

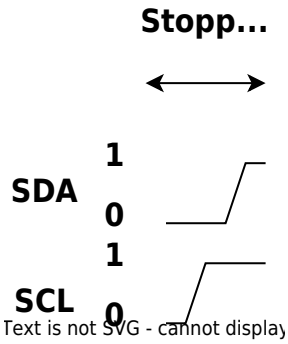
Die Daten (DATA) werden in gleicher Weise übertragen:

```
TWDR = DATA;                       // Load DATA
into TWDR
TWCR = (1<<TWINT)|(1<<TWEN);       // Setting
TWINT clears interupt flag
                                   // to start
transmission of address
```

Stoppbedingung

Die Stoppbedingung beendet die Übertragung. SCL geht auf HIGH (c), anschließend wechselt die SDA-Leitung von LOW nach HIGH (d).

Fig. 6: Stoppbedingung



Für eine Stoppbedingung werden die Bits innerhalb des TWCR wie folgt gesetzt:

```
TWCR = (1<<TWINT)|(1<<TWEN);       // Setting
TWINT clears interupt flag
                                   // to set the
following state:
     | (1<<TWIE )                  // Enable TWI
Interrupt. --> nur wichtig, falls der Interrupt
geprüft wird!
     | (0<<TWSTA)|(1<<TWSTO);      // Initiate a
STOP condition.
```

Software

einfache Anwendung

Im ersten Schritt ist im folgenden eine einfache Anwendung dargestellt.
Bei dieser werden Schalterstellungen vom Master an den Slave übertragen.

I. Vorarbeiten

Laden Sie die Datei simple_i2c.zip herunter und entpacken Sie diese.
In ihr finden Sie die Simulation als `simple_I2C.sim1` und das Microchip Solution File `simple_I2C.atsln`.

II. Analyse des fertigen Programms

1. Initialisieren des Programms
    1. Öffnen Sie SimulIDE und öffnen Sie dort mittels  die Datei `simple_I2C.sim1`
    2. In der Simulation finden Sie unten links 8 Dip-Schalter, welche durch Klick auf eine der acht kleinen Quadrate aktiviert (Wechsel auf grün)bzw deaktiviert werden kann.
    3. Die hex Files sollten bereits in der simulation verlinkt sein, sodass diese nach dem Start auch lauffähig sei soll.
    Falls nicht finden Sie die hex Files unter `..\simple_I2C_Master\Debug` bzw `..\simple_I2C_Slave\Debug`.
    4. Wenn Sie die Simulation starten, sehen Sie oben rechts im Logic Analyzer den Verlauf der Signale auf SDA (Daten) und SCL (Clock, also Takt).
    5. Sobald die Stopp-Bedingung erfüllt ist (positive Flanke auf SDA, wenn SCL bereits

High ist), wird die Simulation automatisch gestoppt.
Dies geschieht, da im Logic Analyzer als Trigger `Ch1R & Ch2H`eingetragen wurde.

2. Sie können hier einige Dinge analysieren:
    1. Was passiert in den I2C Registern (TWAR, TWBR, TWCR, TWDR, TWSR) auf beiden Seiten?
    2. Was wird übertragen?
3. Das Programm zu diesem Hexfile soll nun erstellt werden

III. Code in Microchip Studio

TWI Master

```
/*=====================================
=====================================
=
/* ------------------------
-------------------------
----------------------
 Experiment 10:   I2C
Kommunikation
 =============
============================
===
 Dateiname      :
I2C_SimpleMaster.c
 Autoren        : Tim
Fischer       (Hochschule
Heilbronn, Fakultaet TE)
 Datum          : 18.11.2023
 Version        : 1.1
 Hardware       : Simulide
1.0.0 >R810
 Software       :
Entwicklungsumgebung:
AtmelStudio 7.0
                  C-
Compiler: AVR/GNU C Compiler
5.4.0
 Funktion       : einfacher
I2C Master, der
Schalterwerte überträgt
 Displayanzeige : keine
 Tastenfunktion : Die
Tastenstellung der Dip-
Schalter an Port B werden
als Wert über I2C
weitergegeben.
                  Dabei
zählt ein gedrückter
Schalter (= hellgrün) als
logisches High Signal
```

Ändern Sie auch hier wieder die Beschreibung am Anfang des C-Files, je nachdem was Sie entwickeln

```
 Jumperstellung : keine
 Fuses im uC    : keine
// ------------------------
---------------------------
----------------------*/
// Deklarationen
============================
============================
======
// Festlegung der
Quarzfrequenz
#define F_CPU 8000000UL
// CPU Frequenz von 8MHz
#define F_SCL   100000L
// Baudrate von 100 kHz

// Include von Header-
Dateien
#include <avr/interrupt.h>
#include <util/delay.h>

// Konstanten
#define SET_BIT(BYTE, BIT)
((BYTE) |=  (1 << (BIT))) //
Bit Zustand in Byte setzen
#define CLR_BIT(BYTE, BIT)
((BYTE) &= ~(1 << (BIT))) //
Bit Zustand in Byte loeschen
#define TGL_BIT(BYTE, BIT)
((BYTE) ^=  (1 << (BIT))) //
Bit Zustand in Byte wechseln
(toggle)

#define SET_ALL_PULLUPS
(0xFF)
// Konstante für die
Aktivierung der Pullup
#define INVERING_MASK
(0xFF)
// Konstante für die
invertierung der
Schalterstellungen
#define TWI_ADRESS
(0b0001010)
// Konstante für die I2C
Adresse

//Funktionsprototypen
void I2C_Init();
void I2C_transmitStart();
void
```

```
Deklarationen
==================================
```

1. Hier wird wieder geprüft ob die Frequenz des Quarz bereits eingestellt wurde und - falls nicht - dessen Frequenz eingestellt.
2. Die Header-Dateien entsprechen denen der letzten Programme.
3. Auch die Makros entsprechen denen der letzten Programme.
4. Die Konstanten entsprechen denen der letzten Programme.
5. Auch die anfänglichen Variablen entsprechen denen der letzten Programme. Hierbei sind alle vier Schalter berücksichtigt.
6. Wird die Taste S1 gedrückt, so wird `sw1_neu` gesetzt. `sw1_alt` entspricht dem vorherigen Wert. Gleiches gibt es für die anderen Taster.

```
I2C_transmitDataOrAddress(char Data);
void I2C_transmitStop();

uint8_t TWI_Address = TWI_ADRESS;
uint8_t TWI_Data    = 0b00000000;
// Variable für die I2C Daten


int main(void)
{
    PORTB = SET_ALL_PULLUPS;
// Pull-up Widerstände an Port B aktivieren
    while (1)
    {
        I2C_Init();
// Initialisierung von TWI anstoßen
        I2C_transmitStart();
// Startbit schreiben
I2C_transmitDataOrAddress((TWI_Address<<1) + 0);// Adresse senden: LSB = 0, zeigt Slave an, dass dieser nur empfangen soll
        TWI_Data = PINB^INVERING_MASK;
// Lese Tasterstellungen ein. Invertiere jedes Bit
I2C_transmitDataOrAddress(TWI_Data);           // Daten senden
        I2C_transmitStop();
// Stoppbit schreiben
// ggf. kann am Ende der ÜBertragung ein _delay_us(1) zur Synchronisierung helfen
    }
}

////////////////////////////////////////////
// I2C Initialisierung
////////////////////////////////////////////
void I2C_Init()
{
```

7. Wird eine ansteigende Flanke der Taste S1 gedrückt, so wird `sw1_slope` gesetzt. Das heißt, wenn die Taste gerade von 'nicht gedrückt' auf 'gedrückt' gewechselt hat, so wird `sw1_slope` gesetzt. Gleiches gibt es für die anderen Taster.

8. Bei den Funktionsprototypen sind einige bekannte Unterprogramme vorhanden. Details werden weiter unten erklärt.

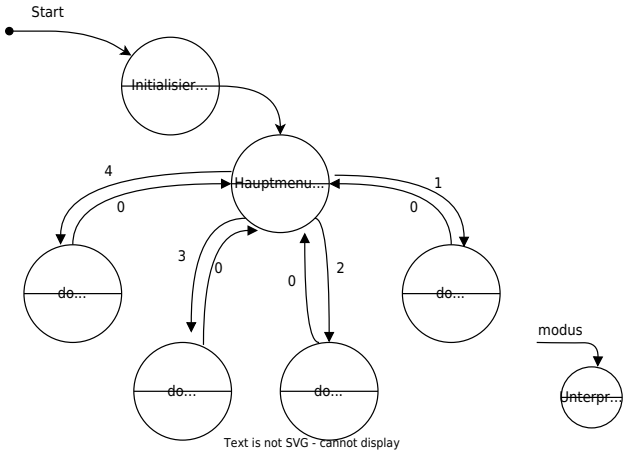
`Hauptprogramm ==========================`

1. Zunächst werden zwei Initialisierungsroutinen aufgerufen (siehe weiter unten)
2. Dann werden die “Timer/Counter Control Register” des Timers 2 TCCR2A und TCCR2B gesetzt. Der Timer 2 ist im wesentlichen mit dem Timer 0 aus dem Up/Down Counter vergleichbar. Er ist ein 8-Bit Timer und auch hier wird der “Normal Mode” zum hochzählen genutzt. Auch hier gibt das Register TCCR2B den Prescaler an.
3. Auch hier gibt es eine “Timer Interrupt MaSK” TIMSK2. Auch hier wird mit dem Bit TOIE2 (“Timer Overflow Interrupt Enable”) der Interrupt bei Überlauf aktiviert.
4. Mit dem Befehl `sei()` wird die Bearbeitung von Interrupts aktiv
5. in der Endlosschleife ist nur eine switch-case Anweisung zu finden. Diese stellt den Auswahlteil einer Zustandsmaschine dar:

```
    TWSR = CLR_BIT(TWSR,
TWPS0);
// Es wird kein Prescaler
verwendet:
    TWSR = CLR_BIT(TWSR,
TWPS1);
//        Deshalb TWPS0 = 0
und TWPS1 = 0
    TWCR = 0;
// Control Register
zurücksetzen
    TWBR =
((F_CPU/F_SCL)-16)/2;
// die Bitrate wird mittels
CPU Frequenz und Serial
Clock Frequenz ermittelt
}

////////////////////////////
/////////////
// I2C Startbit senden
////////////////////////////
/////////////
void I2C_transmitStart()
{
    TWCR =
(1<<TWINT)|(1<<TWEN)|(1<<TWS
TA);               // TWSTA
= Startbit aktivieren, TWEN
= TWI starten (ENable),
TWINT = Interrupt bit
löschen (durch beschreiben)
    while (!(TWCR &
(1<<TWINT)));
// warten bis Übertragung
erfolgreich, Trigger ist
hier das Setzen von TWINT
}


////////////////////////////
/////////////
// I2C Adressbyte/Daten
senden
////////////////////////////
/////////////
void
I2C_transmitDataOrAddress(ch
ar Data)
{
    TWDR = Data;
```



Aus jedem Unterprogramm wird wieder zurück ins Hauptmenü gesprungen.

6. Beim `case 1…4` wird zunächst das jeweilige Programm aufgerufen. Nachdem Rückkehr aus diesem Programm wird zunächst der `modus` wieder auf 0 zurückgesetzt, sodass beim nächsten Durchlauf der Schleife der `case 0` ausgeführt wird. Jeder case wird mit `break` beendet.

Interrupt Routine

1. Mit dem Befehl `ISR()` wird eine Interrupt Service Routine für den OVerFlow Interrupt für TIMER2 angelegt.
2. Der Überlauf-Interrupt durch den Timer2 wird erst bei Überlauf des 8-Bit Wert ausgeführt. Auch hier ergibt sich durch den Prescaler und Modus (TCCR2A und TCCR2B) eine Periode von $T_{\rm ISR}= 0,16\bar{6}~\rm ms$.
3. Die Ermittlung von `Timertick`, `vorteiler`, `takt10ms`, `hundertstel` und `takt100ms` ist hier wieder gleich dem im Up/Down Counter.
4. Eine große Änderung ist, dass bereits im Interrupt alle 10ms die Unterfunktion `readButton()` aufgerufen wird.

```
// Data Variabel in Daten Register schreiben
    TWCR = (1<<TWINT)|(1<<TWEN);
// TWEN = TWI starten (ENable), TWINT = Interrupt bit löschen (durch setzen)
    while (!(TWCR & (1<<TWINT)));
// warten bis Übertragung erfolgreich, Trigger ist hier das Setzen von TWINT
}

////////////////////////////////////////////
// I2C Stoppbit senden
////////////////////////////////////////////
void I2C_transmitStop()
{
TWCR=(1<<TWINT)|(1<<TWEN)|(1<<TWSTO);             // TWSTO = Stopptbit aktivieren, TWEN = TWI starten (ENable), TWINT = Interrupt bit löschen (durch setzen)
}
```

`Funktion Tasten einlesen ==========`

1. In dieser Funktion werden zunächst die Stellungen aller Taster eingelesen (vgl. `counterCounting(void)` bei Up/down Counter).

2. Neu hier ist, dass über `if ( (sw1_neu==0) & (sw1_alt==1) )` die positive Flanke (=aufsteigende Flanke) erkannt wird und dies im Flag `sw1_slope` gespeichert wird.

`Initialisierung Display-Anzeige ==========`

1. Die Funktion `initDisplay()` wird zu Beginn des Programms aufgerufen und führt zunächst die Initialisierung des Displays aus.
2. Danach wird der erste Text auf den Bildschirm geschrieben und damit der Programmname dargestellt.
3. Nach zwei Sekunden wird der Auswahlbildschirm angezeigt.

`Anzeige Hauptmenu ==========`

1. Da der Auswahlbildschirm mit dem Hauptmenu nicht nur beim Start, sondern auch nach jeder Rückkehr aus Unterprogrammen dargestellt werden muss, wird der Auswahlbildschirm in einem neuen Unterprogramm angezeigt.

```
/* Teilprogramm 1: Blinkende LED =====
```

Hier ist das Programm der Blinking LED etwas angepasst eingefügt.

1. Zunächst wird ein Unterprogramm zur Anzeige das Displays aufgerufen
2. `SET_BIT(DDRB, DDB0)` wandelt den Anschluss B0 in einen Ausgang um
3. Die Schleife wird solange ausgeführt, bis die Flanke des Schalters 1 über `sw1_slope` erkannt wurde
4. Beim Aktivieren der LED wird auch auf dem Display eine 1 geschrieben.

5. Nach einer Sekunde wird die LED ausgeschalten und auf dem Display eine geschrieben.

6. Nach Beendigung der Schleife werden alle Flanken gelöscht. Damit wird verhindert, dass beim Aufruf des Hauptmenus sofort ein Sprung in ein Unterprogramm ausgeführt wird.

```
/* Teilprogramm 2: Soundgenerierung
====
```

Hier ist das Programm Sound und Timer etwas angepasst eingefügt.

1. Die Port Initialisierung, um Lautsprecher und LED anzusteuern, wurde übernommen.
2. Hier wird Timer 0 genutzt, um das gepulste Signal an den Lautsprecher zu verändern.
3. Die while-Schleife wird wieder abgebrochen, wenn die Taste 1 gedrückt wurde.
4. Neben dem Herunterzählen der Periodenlänge (über `OCR0A--`), wird auch der Periodenzähler ausgegeben. Die Ausgabe ähnelt `counterDisplay` aus dem Programm Up/Down Counter.
5. Da die for-Schleife zum Herunterzählen der Periodenlänge sehr lange dauert (etwa 2 Sekunden) wird auch darin der Tastendruck der Taste 1 abgefragt werden.
6. Falls die Taste 1 gedrückt wurde, wird sowohl in der for-Schleife, als auch nach der while-Schleife der Timer gestoppt und die Flanken zurückgesetzt.

7. Das Heraufzählen der Frequenz gleich dem Herunterzählen, bis auf die Werte der for-Schleife.

```
/* Teilprogramm 3: Logische Funktionen
====
```

Hier ist das Programm Logische Funktionen etwas angepasst eingefügt.

1. Durch den Anschluss des Tasters zwischen Port und Masse erzeugt ein geschlossener ein LOW Signal (logisch 0). Hier sollen aber nun der Tastendruck dem Wert HIGH (logisch 1) entsprechen. Aus diesem Grund sind die Tasterwerte in den Bedingungen negiert, z.B. `(!sw3_alt)&&(!sw4_alt)`

```
/* Teilprogramm 4: Up-Down-Counter ====
```

Hier ist das Programm Up/Down Counter etwas angepasst eingefügt.

1. Im wesentlichen gleicht das Programm dem bereits bekanntem. Es kann aber auf die bereits berechnete Flanken `sw2_slope` bis `sw4_slope` zurückgegriffen.

```
Auswahl im Hauptmenu ermitteln
==========
```

1. Je nach gedrückter Taste wird hier die Variable

modus gesetzt

TWI Slave

TWI Slave

```
/* ------------------------------------------------------------
-------------

 Experiment 10:   I2C Kommunikation
 =============    ================================

 Dateiname  : I2C_SimpleMaster.c

 Autoren    : Tim Fischer       (Hochschule Heilbronn, Fakultaet
T1)

 Datum      : 23.06.2021

 Version    : 1.0
 Hardware:  Simulide 0.5.16-RC5

 Software:  Entwicklungsumgebung: AtmelStudio 7.0
            C-Compiler: AVR/GNU C Compiler 5.4.0

 Funktion:  tbd


// ------------------------------------------------------------
-------------*/

// Deklarationen
================================================================

// Festlegung der Quarzfrequenz
#define F_CPU 16000000UL
#define F_SCL 10000L //100 kHz

// Include von Header-Dateien
#include <avr/interrupt.h>

// Konstanten
#define SET_BIT(BYTE, BIT)    ((BYTE) |=  (1 << (BIT))) // Bit
Zustand in Byte setzen
#define CLR_BIT(BYTE, BIT)  ((BYTE) &= ~(1 << (BIT))) // Bit
Zustand in Byte loeschen
#define TGL_BIT(BYTE, BIT)  ((BYTE) ^=  (1 << (BIT))) // Bit
Zustand in Byte wechseln (toggle)
```

```
//Funktionsprototypen
void I2C_Init();
void I2C_setAddress(char Address);
char I2C_readData();

uint8_t TWI_Address         =  0b0001010;
uint8_t TWI_AddressMask     = 0b11111110;

int main(void)
{
    DDRD= 0xFF;                                 // Auf DDRC die
Daten ausgeben
    I2C_setAddress(TWI_Address);                 // eigene Adresse
setzen
    while (1)
    {
        PORTD = I2C_readData();                 // Daten an PortC
ausgeben
    }
}

////////////////////////////////////////////////
// Setzen der I2C Adresse auf die der Slave hört
////////////////////////////////////////////////
void I2C_setAddress(char Address)
{
    TWAR = (Address<<1);                                  // Adresse
in das Pseudoregister schreiben
    TWAMR= TWI_AddressMask;                                  //
Adressmaske in das Pseudoregister schreiben
    TWCR = (1<<TWEA)|(1<<TWEN);                              //
Enable Ack, Enable Interupt und Enable TIW

}

////////////////////////////////////////////////
// Auslesen der übermittelten Daten
////////////////////////////////////////////////
char I2C_readData()
{
    while (!(TWCR & (1<<TWINT)));                         // warte
solange bis TWINT gesetzt ist
    return TWDR;                                         //
übermittle Daten
}
```

komplexere Anwendung

Als Beispiel wurde die Temperaturmessung gewählt

- twi_slave_master.zip

Bibliotheken

- TWI Module as I2C Master (AVR315):
  - Application Note: doc2564.pdf
  - Library und Beispielcode: avr315.zip
- TWI Module as I2C Slave (AVR311):
  - Application Note: doc2565.pdf
  - Library und Beispielcode: avr311.zip
- alternative und schlanke Implementierung des Slaves von The Gouger (GitHub) (Kopie vom 16.01.22: avr-i2c-slave-master.zip)

Beispiele

- Simulide: `…\share\simulide\examples\Arduino\sofware_i2c_lcd\i2c_lcd-arduino` (hierbei wird Software I2C eingesetzt)
- Software I2C:
  - Library von Peter Fleury: library, Dokumentation
  - Software I2C Slave

weiterführende Unterlagen

- Die “Microchip University” hat auch eine schöne Einführung in I2C. Hier wird aber nicht die Implementierung in Microchip Studio auf einem AVR-Chip gezeigt, sondern in MPLAB X auf einem PIC. D.h. der Code ist nicht direkt übertragbar.