

Skriptum Mikrocontroller

Teil 6 Timer/Counter

DI Wolfgang Zukrigl, HTL Litec
DI(FH) Andreas Pötscher, HTL Litec

Inhaltsverzeichnis

Anwendung von Timer-Counter-Betrieb	3
Die Timer/Counter des ATmega 2560	3
Auslesen des aktuellen Timer/Counter-Zählerstands im C-Programm	4
Clock-Select-Logic - Auswahl der Zähl-Impulse	4
Der Prescaler	5
Programmieren der Clock-Select-Logik	7
Timer-Overflow	8

Copyright- und Lizenz-Vermerk: Das vorliegende Werk kann unter den Bedingungen der Creative Commons License CC-BY-SA 3.0, siehe <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.de>, frei vervielfältigt, verbreitet und verändert werden. Eine kurze, allgemein verständliche Erklärung dieser Lizenz kann unter <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.de> gefunden werden. Falls Sie Änderungen durchführen, dokumentieren Sie diese im folgenden Änderungsverzeichnis:

Datum	Beschreibung der durchgeführten Änderung	Autor
12.05.2014	V1.0 ... Korrektur kleinerer Fehler	Wolfgang Zukrigl, HTL Linz–Paul-Hahn-Straße (LiTec)
19.09.2014	V1.1 ... Übernahme in Markdown und allgemeine Überarbeitung	Wolfgang Zukrigl, HTL Linz–Paul-Hahn-Straße (LiTec)
24.02.2019	V2.0 ... : Einfügen von Merksätzen, Beispielen, Aufgaben. Viele Teile neu überarbeitet.	Wolfgang Zukrigl, HTL Linz–Paul-Hahn-Straße (LiTec)
01.04.2020	V2.1 ... Fehler bei Beispiel ausgebessert (PE6/INT6 auf PE5/INT5 geändert)	Wolfgang Zukrigl, HTL Linz–Paul-Hahn-Straße (LiTec)

Datum	Beschreibung der durchgeführten Änderung	Autor
19.03.2025	V2.2 ... Übernahme in Markdown und allgemeine Überarbeitung	Andreas Pötscher, HTL Linz–Paul-Hahn-Straße (LiTec)

Anwendung von Timer-Counter-Betrieb

Die meisten Mikrocontroller und Prozessoren enthalten einen oder mehrere Timer/Counter als Peripheriekomponenten. Ein Timer/Counter kann entweder als Timer oder als Counter verwendet werden:

Verwendung als Timer:

In dieser Betriebsart lassen sich exakte Zeitvorgaben realisieren. So kann zum Beispiel alle 100 Millisekunden ein Interrupt ausgelöst werden, womit sich etwa die Zeitmessung für eine Stoppuhr umsetzen lässt. Diese Zeitspanne wird vom CPU-Takt abgeleitet, der bei AVR-Mikrocontrollern meist von einem Quarzoszillator erzeugt wird. Die Frequenztoleranz eines 16-MHz-Quarzes beträgt typischerweise zwischen 10 ppm und 30 ppm (0,001 % bis 0,003 %). Eine auf dieser Basis arbeitende Stoppuhr würde somit pro Tag lediglich um etwa 0,8 bis 2,6 Sekunden abweichen.

Verwendung als Counter:

In dieser Betriebsart zählt der Counter automatisch mit, wie oft ein bestimmtes Hardware-Ereignis auftritt. Ein typisches Beispiel ist ein Magnet, der in die Speichen eines Fahrradreifens integriert ist und bei jeder Umdrehung einen elektrischen Impuls auslöst – also eine steigende oder fallende Flanke erzeugt. Bei einem Counter führt eine dieser Flanken automatisch zu einer Erhöhung des Zählerstands um eins (Inkrementierung). Der aktuelle Zählerstand entspricht somit der bislang zurückgelegten Strecke in Radumfängen. (Der Umfang eines 28Reifens eines Rennrads beträgt beispielsweise etwa 2,10 m.) Das Hauptprogramm in der CPU muss diesen Zählerstand lediglich auslesen, in Kilometer umrechnen und auf einem Display anzeigen.

Wichtig!

Timer/Counter werden als Timer verwendet, um exakt zeitgesteuerte Aufgaben zu erledigen.
Sie werden als Counter verwendet, um das Auftreten von Hardware-Ereignissen zu zählen.

Die Timer/Counter des ATmega 2560

Der ATmega2560 verfügt insgesamt über sechs voneinander unabhängige Timer/Counter. Das Herzstück jedes Timer/Counters ist ein Zählerstandsregister, dessen Wert durch bestimmte Zählimpulse inkrementiert wird (d. h. um eins erhöht). Nach einem Reset des Mikrocontrollers steht der Zählerstand eines solchen Registers auf 0. Beim ersten eintreffenden Zählimpuls wird der Registerinhalt automatisch – also ohne Eingreifen des CPU-Programms – von 0 auf 1 erhöht, beim nächsten Impuls von 1 auf 2 usw.

Im Counter-Betrieb entstehen diese Zählimpulse durch steigende oder fallende Spannungsflanken an einem bestimmten Pin des Mikrocontrollers. Durch Auslesen des Zählerstandsregisters kann das Hauptprogramm ermitteln, wie viele dieser Flanken bisher aufgetreten sind.

Beim Timer/Counter1 trägt das Zählerstandsregister die Bezeichnung TCNT1, beim Timer/Counter3 entsprechend TCNT3, und so weiter.

Die sechs Timer/Counter des ATmega2560 tragen die Bezeichnungen Timer/Counter0 bis Timer/Counter5:

- Timer/Counter0 und Timer/Counter2 verwenden 8 Bit breite Register. Das bedeutet, dass das Zählerstandsregister Werte von 0 bis 255 annehmen kann. Solche Timer/Counter werden als 8-Bit-Timer/Counter bezeichnet.

- Timer/Counter1, Timer/Counter3, Timer/Counter4 und Timer/Counter5 besitzen 16 Bit breite Register. Die möglichen Werte des Zählerstandsregisters liegen daher zwischen 0 und 65.535.

Die 8-Bit-Timer/Counter werden typischerweise für spezielle Aufgaben eingesetzt und werden in diesem Zusammenhang nicht weiter behandelt.

Die 16-Bit-Timer/Counter sind untereinander identisch aufgebaut. Im Folgenden wird exemplarisch der Timer/Counter1 behandelt; die anderen 16-Bit-Timer/Counter können auf die gleiche Weise verwendet werden.

Wichtig!

Der ATmega2560 hat zwei 8-Bit-Timer/Counter und vier 16-Bit-Timer/Counter namens Timer/Counter1, 3, 4 und 5. Herzstück jedes Timer/Counter ist ein 8 bzw. 16 Bit breites Zählerstands-Register, das durch bestimmte Zähl-Impulse ständig inkrementiert wird.

Auslesen des aktuellen Timer/Counter-Zählerstands im C-Programm

Um die Special-Function-Register (SFR) direkt manipulieren zu können, ist – wie üblich – folgender include nötig:

```
#include <avr/io.h>
```

Der aktuelle Zählerstand ist im Register TCNTn gespeichert, wobei n die Nummer des verwendeten Timer/Counter ist. Für den Timer/Counter 1 also.

```
uint16_t cnt;  
cnt = TCNT1;
```

Clock-Select-Logic - Auswahl der Zähl-Impulse

Im folgenden Bild ist dargestellt, welche Möglichkeiten zur Auswahl der Zählimpulse für den Timer/Counter1 bestehen (Clock Select Logic). Jeder Zählimpuls bewirkt eine Inkrementierung des Zählerstands, das heißt: Der Zählerstand des Timer/Counter wird bei jedem Impuls um 1 erhöht.

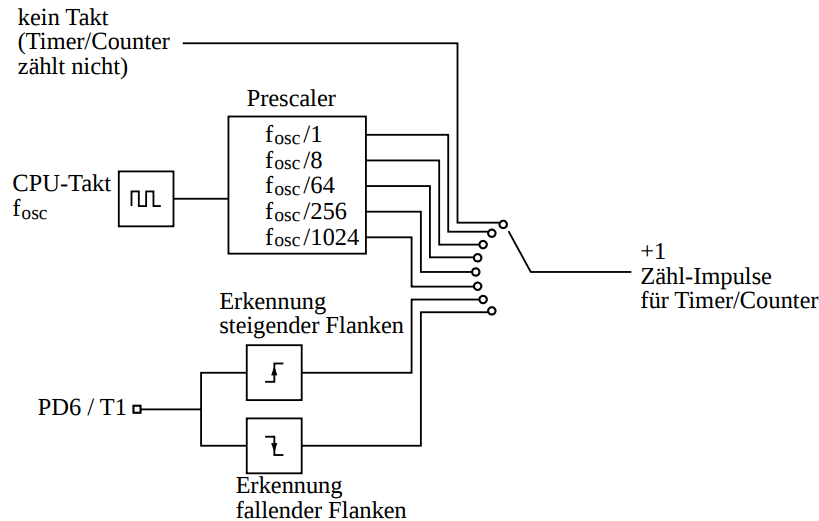


Abbildung 1: Clock-Select-Logic von Timer/Counter 1

Der Schalter im obigen Bild symbolisiert eine von acht Auswahlmöglichkeiten:

- Oberste Stellung: Der Timer/Counter ist gestoppt; der Zählerstand bleibt unverändert.
- Nächste fünf Stellungen: Es liegt Timer-Betrieb vor. Der Zählerstand wird durch die CPU-Taktfrequenz, geteilt durch einen von fünf möglichen Prescaler-Werten, erhöht.
- Unterste zwei Stellungen: Hier handelt es sich um Counter-Betrieb. Der Zählerstand wird durch steigende oder fallende Flanken am Pin PD6, der die alternative Funktion T1 besitzt, erhöht.

Für die anderen Timer/Counter muss im Datenblatt des Mikrocontrollers nachgeschlagen werden, welche Pins für den Counter-Betrieb vorgesehen sind.

Der Prescaler

Im Timer-Betrieb wird die CPU-Taktfrequenz verwendet, um den Zählerstand eines Timer/Counters zu erhöhen.

Bei Arduino-Boards wird die CPU-Taktfrequenz von einem $f_{osc} = 16 \text{ MHz}$ Schwingquarz erzeugt. Dieses Taktsignal durchläuft eine spezielle Hardware-Schaltung, den sogenannten Prescaler (auch Vorteiler genannt). Dabei handelt es sich um eine einfache Zähler- bzw. Frequenzteilerschaltung. Der Prescaler erzeugt fünf verschiedene Ausgangs-Taktsignale mit unterschiedlichen Frequenzen f_T und somit auch Periodendauern T_T :

Prescaler-Wert	Ausgangsfrequenz f_T	Periodendauer T_T
1	16 MHz	$0,0625 \mu s$
8	2 MHz	$0,5 \mu s$
64	250 kHz	$4 \mu s$
256	62,5 kHz	$16 \mu s$
1024	15,625 kHz	$64 \mu s$

Beispiel:

Nach einem Reset beträgt der Zählerstand aller Timer/Counter gleich 0. Angenommen, in der Initialisierungsphase des Hauptprogramms wird beim Timer/Counter1 ein Prescaler-Wert von 256 ausgewählt. Dadurch startet der Timer/Counter1 und sein Zählerstand beginnt sich von null weg zu erhöhen. Wie lange dauert es, bis ein Zählerstand von 32000 erreicht ist?

Lösung:

Die Frequenz des Taktsignals, das den Zählerstand erhöht, hat eine Frequenz von

$$f_T = \frac{f_{osc}}{256} = 62,5kHz$$

Die Periodendauer ist der Kehrwert daraus:

$$T_T = \frac{1}{f_T} = \frac{1}{62,5kHz} = 16\mu s$$

Direkt nach dem Starten des Timer/Counter1 durch Auswahl des Prescaler-Werts von 256 beträgt der Zählerstand noch 0. Eine Zeitspanne von $16\mu s$ später (T_1) wird der Zählerstand von 0 auf 1 inkrementiert. Weitere $16\mu s$ später, also $32\mu s$ nach dem Starten des Timer/Counters wird der Zählerstand von 1 auf 2 inkrementiert.

Der Zählerstand erhöht sich genau alle $16\mu s$ um 1. Er ist somit eine Stufenfunktion der Zeit.

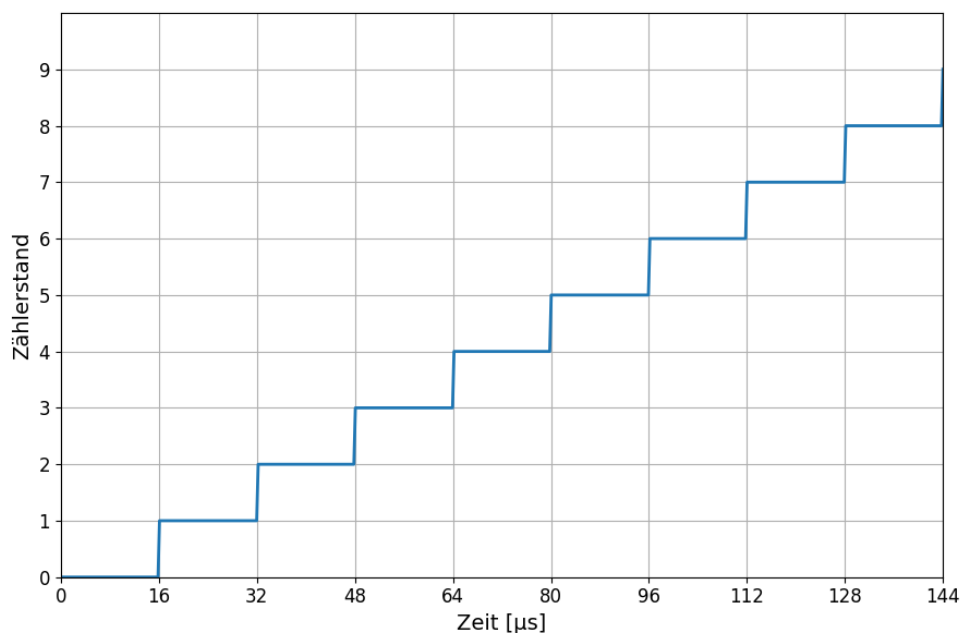


Abbildung 2: Zählerstand am Anfang

Insgesamt dauert es bis ein Zählerstand von 32000 erreicht wird dann

$$32000 * T_T = 32000 * 16\mu s = 512ms$$

Bei einem Zählerstand von 32000 ist die Stufenfunktion Aufgrund der vielen Punkte nicht mehr zu sehen.

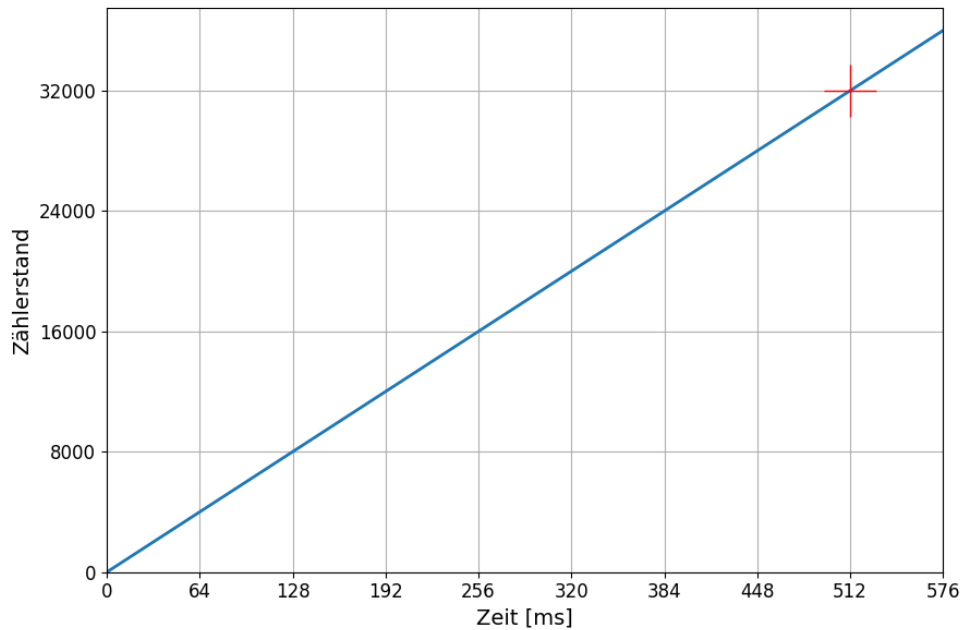


Abbildung 3: Nach 512 ms wird ein Wert von 32000 erreicht

Wichtig!

Im Timer-Betrieb wird die CPU-Taktfrequenz durch einen Prescaler mit einem wählbaren Teilungsfaktor reduziert. Das so erzeugte Taktsignal dient als Zählimpulsquelle für das Zählerstandsregister. Im Counter-Betrieb entstehen die Zählimpulse durch steigende oder fallende Flanken an einem festgelegten Pin des Mikrocontrollers.

Programmieren der Clock-Select-Logik

Die Auswahl einer Taktquelle startet den Timer/Counter sofort. In der Praxis erfolgt dieser Schritt während der Initialisierungsphase des Programms – nachdem der Timer/Counter vollständig konfiguriert wurde, typischerweise in der Funktion `main()`, und zwar vor dem Eintritt in die Endlosschleife.

Die Auswahl der Taktquelle geschieht durch das Setzen der Bits `CSn2`, `CSn1` und `CSn0` (CS steht für Clock Select) im Timer/Counter Control Register B (`TCCRnB`). Dabei steht das „n“ für die Nummer des jeweiligen Timer/Counter und ist entsprechend zu ersetzen.

Als Beispiel wird dieses Special-Function-Register für Timer/Counter1 gezeigt (`TCCR1B`):

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
TCCR1B:	—	—	—	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10

Die Bedeutung der `WGMnx`-Bits wird weiter unten erklärt. Die Bits Nr. 7 bis 5 sind hier nicht weiter relevant, und sollten beim Beschreiben des Registers mit 0 beschrieben werden. Mit den drei Bits `CSn[2..0]` kann für jeden Timer/Counter eine der acht möglichen Taktquellen gewählt werden:

CSn2	CSn1	CSn0	Taktquelle für Timer/Counter
0	0	0	keine Taktquelle der Timer ist gestoppt.
0	0	1	Prescaler 1 $f_T = 16MHz$
0	1	0	Prescaler 8 $f_T = 2MHz$
0	1	1	Prescaler 64 $f_T = 250kHz$
1	0	0	Prescaler 256 $f_T = 62,5kHz$
1	0	1	Prescaler 1024 $f_T = 15,625kHz$
1	1	0	Fallende Flanke am GPIO Pin mit der Funktion "Tn"
1	1	1	Steigende Flanke am GPIO Pin mit der Funktion "Tn"

Beispiel:

Timer/Counter3 soll als Timer mit einem Prescaler-Wert von 256 betrieben werden.

Lösung: Im Register TCCR3B müssen die Bits CS32, CS31, CS30 auf den Binärcode 100 gesetzt werden, damit der Timer mit einer Zählfrequenz von $16MHz/256$ zu zählen beginnt:

```
TCCR3B |= (0x01<<CS32); //Bit Nr. 2 (CS32) setzen
TCCR3B &= ~( (0x01<<CS31)|(0x01<<CS30) ); //Bits Nr. 1 und 0 (CS31, CS30) löschen
```

Timer-Overflow

Eine Variable vom Datentyp `uint16_t` (also ein 16-Bit breiter, vorzeichenloser Integer) kann Werte im Bereich von 0 bis $2^{16} - 1$ annehmen, also von 0 bis 65.535.

Was passiert, wenn eine solche Variable ihren maximalen Wert hat und anschließend inkrementiert wird? Welchen Wert enthält die Variable a nach Ausführung des folgenden Programmcodes?

```
uint16_t a;
a = 65535;
a++;
```

Der Wert $65535 + 1 = 65536$ (also 2^{16}) liegt außerhalb des darstellbaren Wertebereichs einer `uint16_t`-Variablen. Man spricht in diesem Fall von einem sogenannten Überlauf (Overflow). Die Variable erhält dann wieder den Wert 0.

Dieser Mechanismus ähnelt dem eines mechanischen Zählwerks, wie es früher in Kilometerzählern von Tachos verwendet wurde – und heute noch in Wasseruhren oder Gaszählern zum Einsatz kommt: Stellen Sie sich ein vierstelliges Zählwerk vor, das die Werte von „0000“ bis „9999“ anzeigen kann. Wenn es bereits „9999“ anzeigt und um eins weitergedreht wird, springt es wieder auf „0000“ zurück.

Ein ähnlicher Überlauf tritt auch bei den 16-Bit-Timer/Countern der AVR-Mikrocontroller auf: Wenn der Wert des Zählerstandsregisters den maximalen Wert 65535 erreicht hat (binär: 1111111111111111, hexadezimal: 0xFFFF), wird er beim nächsten Zählimpuls wieder auf 0 zurückgesetzt – ein Overflow tritt ein.

Gleichzeitig wird bei einem Overflow ein Interrupt-Flag gesetzt. Beim Timer/Counter1 heißt dieses Flag TOV1 (Timer Overflow 1). Ist zusätzlich das zugehörige Interrupt-Enable-Flag gesetzt, wird das Hauptprogramm unterbrochen und die zugehörige Interrupt Service Routine (ISR) ausgeführt – in diesem Fall die Routine mit dem Vektor `TIMER1_OVF_vect`.

Wichtig!

Wenn der höchstmögliche Zählerstand (255 bei 8-Bit-Timer/Counter, bzw. 65535 bei 16-Bit-Timer/Counter) erreicht ist, erzeugt der nächste Zähl-Impuls einen Overflow: Der Zählerstand beginnt wieder bei 0, und ein Interrupt-Flag wird gesetzt.

Beispiel:

Timer/Counter1 verwendet als Clock-Source die mit einem Prescaler-Wert von 8 geteilte CPU-Taktfrequenz (16MHz). In welchem Zeitabständen erfolgen die Overflows des Zählerstand-Registers?

Lösung:

Der Zählerstand wird wegen des Prescaler-Werts von 8 mit einer Frequenz von

$$f_T = \frac{f_{osc}}{8} = 2MHz$$

inkrementiert.

Die Periodendauer ist der Kehrwert daraus:

$$T_T = \frac{1}{f_T} = \frac{1}{2MHz} = 0,5\mu s$$

Die Zeitdauer zwischen zwei Overflows beträgt 65536 bzw. 2^{16} mal dieser Zeitspanne (Zählerstände 0 bis 65535 bzw. 0 bis $2^{16} - 1$).

Die Zeitdauer zwischen den Overflows T_{OVF} berechnet sich dann aus

$$T_{OVF} = T_T * 2^{16} = 32,768ms$$

Die Frequenz der Overflows

$$f_{OVF} = \frac{1}{T_{OVF}} = \frac{1}{32,768ms} = 30,53Hz$$