

1	Wichtige Begriffe und Eigenschaften .....	1
1.1	Pin.....	1
1.2	VCC (VDD), GND (VSS).....	1
1.3	General Purpose IO (GPIO) .....	2
1.4	Port .....	2
1.5	H, L, H-aktiv, L-aktiv.....	2
1.6	Multifunktions-Anschluß .....	3
1.7	Z, Tristate .....	3
1.8	Pullup .....	3
1.9	Register.....	4
1.10	Typische Pinbeschaltung.....	5
2	Einbauformen .....	6
2.1	Ohne Gehäuse (Die) .....	6
2.2	Mit Gehäuse (Package) .....	6
3	Elektrische Eigenschaften .....	7
3.1	Grenzwerte (Absolute Maximums Ratings).....	7
3.2	Statische Eigenschaften (DC).....	7
3.3	Leistungsaufnahme (Power).....	7
3.4	Dynamische Eigenschaften (AC) .....	8
4	Takterzeugung .....	9
4.1	Externer Takt.....	9
4.2	Stabilisierte Oszillatoren .....	9
4.3	RC-Oszillatoren.....	10
4.4	PLL.....	10

## 1 Wichtige Begriffe und Eigenschaften

Rund um den uC gibt es einigen immer wiederkehrende Begriffe sowie einige allgemeingültige Eigenschaften.

### 1.1 Pin

Mit Pin wird ein Anschluss an einem Schaltkreis, hier dem uC, bezeichnet. Zu einem Pin gehören eine oder mehrere Funktionen sowie eine Nummer. Die Nummer wird benötigt, um den Anschluss am Baustein finden zu können. Die Funktion(en) treten dagegen im Schaltplan und im Programm auf.

### 1.2 VCC (VDD), GND (VSS)

Mit Vcc (oder Vdd) werden die Versorgungsanschlüsse des uC bezeichnet. Ein uC hat häufig mehrere Vcc-Pins, um die Energieversorgung im Schaltkreis gleichmäßiger zu gewährleisten. Mit GND (Ground, auch VSS) werden die Masseanschlüsse bezeichnet. Einige uC haben für bestimmte Peripherielemente besondere Versorgungsanschlüsse. Damit kann man einen bestimmten Teil des uC mit einer anderen Spannung als den Rest versorgen oder man benötigt eine sehr gute Entkopplung von der allgemeinen Spannungsversorgung.

Der Praktikums-uC hat beispielsweise eine besondere Versorgung für den eingebauten A/D-Wandler und den USB-Anschluss.

Sehr häufig können die Anschlüsse des uC mit einer anderen Spannung als der Kern im Inneren selbst versorgt werden. Die Kernspannung ist dabei deutlich niedriger als die Spannung für die Anschlüsse (VCCIO, VDDIO). Damit wird die nötige elektrische Leistung erheblich gesenkt, trotzdem können nach außen Signale mit den gerade üblichen Pegeln (z.B. 3.3 V) abgegeben werden bzw. solche Spannungen verarbeitet werden.

Der nötige Spannungsregler kann bei den uC auf dem Chip mit enthalten sein.

Der Praktikums-uC hat beispielsweise 6 voneinander getrennte Spannungsanschlüsse (siehe auch DB, Fig. 9, Power Domains):

- VDDREG  
Versorgung für die eingebauten Spannungsregler (Spannung für den Kern)
- VDDIO  
Versorgung für fast alle Anschlüsse (Kommunikation mit Außenwelt)
- VDDA  
Versorgung für die Analogteile im uC (ADC/DAC)
- VBAT  
Hilfsversorgung für den Tiefschlaf (zum Datenerhalt und für eine Uhr)
- USB0\_VDDA  
Referenzspannung für den USB-Anschluss
- VPP  
Spannung zum Programmieren des OTP-Speichers

Eine derartige Aufteilung der Versorgung in voneinander getrennte Bereiche mit jeweils speziellen Aufgaben ist bei allen vergleichbaren uC üblich.

### 1.3 General Purpose IO (GPIO)

Damit werden alle Signale bezeichnet, die das Programm ohne weitere Einschränkung als Ein- oder Ausgang konfiguriert und benutzt werden können. Früher gab es uC, bei denen manche Signale nur als Ausgänge und andere nur als Eingänge benutzt werden konnten. Bei heutigen uC ist es üblich, dass jeder als GPIO gekennzeichnete Anschluß unabhängig von allen anderen konfiguriert werden kann. Die Verwendung von GPIOs ist zwar völlig frei, da das Programm aber alle Signalwechsel selber herbeiführen muß (bzw. alle Signalabfragen durchführen muß) nur für langsame Anwendungen geeignet. Meist ist das die Abfrage von Schaltern oder Ansteuerung von LED, bei denen es auf ein exaktes und schnelles Zeitverhalten nicht ankommt.

### 1.4 Port

Unter einen Port versteht man eine zusammengehörige Gruppe von GPIOs. Die Zusammengehörigkeit beruht meist darauf, dass man alle GPIO eines Ports mit einem Befehl abfragen oder verändern kann. Ein weiterer funktionaler Zusammenhang besteht nicht.

Der Praktikums-uC hat in dieser Sichtweise 8 Ports, die mit Port 0 bis Port 7 bezeichnet werden und jeweils 32 Stellen haben. (UM 19.1). Das ergäbe dann 256 einzelne GPIO. Welche dieser Anschlüsse dann aber tatsächlich vorhanden sind, ist eine Frage des Gehäuses.

### 1.5 H, L, H-aktiv, L-aktiv

In einem Programm werden für einzelne Bits die Symbole 0 und 1 benutzt. In einer physikalischen Schaltung der Digitalelektronik werden dagegen die Werte H und L benutzt, um einen zulässigen Spannungsbereich (Pegel) anzuzeigen. Mit H (High) wird dabei eine hohe Spannung, idealerweise meist  $V_{cc}$ , mit L (Low) eine niedrige Spannung, idealerweise GND, bezeichnet.

Die tatsächlichen Schwellwerte müssen dem jeweiligen Datenblatt entnommen werden. Die Spannung, die an einem Eingang mindestens erforderlich ist, um einen H-Pegel zu erkennen, wird meist als  $V_{IH}$  bezeichnet. Entsprechend wird die Spannung, die maximal anliegen darf, damit in jedem Fall noch ein L-Pegel erkannt wird, als  $V_{IL}$  bezeichnet.

Ähnlich wie man bei einem Kippschalter, neben dem eine Beschriftung steht, nicht weiß, welche Stellung An und welche Aus bedeutet, können auch bei uC-Signalen sowohl L als auch H den aktivierten Zustand anzeigen. Wird ein Signal bei einer Ausgabe von L aktiv, dann spricht man von einem L-aktiven Signal. Im Signalnamen wird dies sehr häufig durch einen Überstrich (sprich: quer) angezeigt.

Gerade bei Signalen des Steuerbusses sind aus historischen Gründen viele Signale L-aktiv.

## 1.6 Multifunktions-Anschluß

Da physikalische Anschlüsse sehr knapp sind (das Gehäuse macht oft den größten Teil der Kosten des ganzen uC aus), werden Anschlüsse gerne mit mehr als einer Funktion belegt. Das Programm muß dann festlegen, welche Funktion in der gegebenen Schaltung gewünscht wird. Meist wird diese Konfiguration nur einmal nach dem Start (als eine der ersten Funktionen in *main()*) durchgeführt und bleibt dann immer gleich.

Prinzipiell ist es aber möglich, die Funktion zeitweise zu wechseln. Bei dem Praktikums-uC haben sehr viele Anschlüsse theoretisch 8 unterschiedliche Funktionen, von denen zu einer bestimmten Zeit immer nur eine Funktion aktiv sein kann.

Im UM zeigt beispielsweise die Tabelle 185 für jeden Anschluss, welche Funktionen er bietet. Der Anschluss P2\_3 hat hier 7 Funktionen, da eine Möglichkeit reserviert ist.

Da nun immer nur eine Funktion zu einem Zeitpunkt möglich ist, besteht die Gefahr, dass sich viele Funktionen gegenseitig ausschließen. Dann könnte ein Modul des Chips nicht benutzt werden, weil es nach außen von anderen Modulen, die auch Anschlüsse benötigen, blockiert wird.

Oft können daher häufig gebrauchte Module (z.B. für die Kommunikation) mit verschiedenen Pins verbunden werden. Natürlich ist dann nur eine Möglichkeit zu einer Zeit sinnvoll, aber man kann viel eher eine Aufteilung der vorhandenen Anschlüsse auf die internen Module finden.

## 1.7 Z, Tristate

Mit Tristate (Z) wird ein Anschluss bezeichnet, der einen so hohen Innenwiderstand (im Mega- bzw. Gigaohm-Bereich) aufweist, dass der Anschluss praktisch elektrisch neutral ist. Dieser Zustand ist bei Signalen notwendig, die zeitweise als Eingang und zeitweise als Ausgang arbeiten können. Wird der Anschluss als Eingang geschaltet, dann soll er ja die äußere Beschaltung nicht beeinflussen. Damit die immer noch im Schaltkreis vorhandene Ausgangsstufe nicht stört, wird sie in diesem Fall in den Tristatezustand gebracht.

## 1.8 Pullup

Mit dieser Bezeichnung ist genauer ein „Pullup-Widerstand“ gemeint. Wenn ein Anschluss als Eingang geschaltet ist, dann ist zunächst der Zustand Z (s.o.) wünschenswert. Allerdings gibt es häufig den Fall, dass ein Taster oder ein Schalter abgefragt werden soll. Da der Anschluss im Zustand Z elektrisch neutral ist, muss der Schalter sowohl einen definierten H- wie auch einen definierten L-Pegel erzeugen können. Dazu wäre eigentlich ein Umschalter geeignet (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** links). Allerdings sind Umschalter wesentlich teurer als einfache Schließer.

Damit auch mit einem Schließer beide Pegel zuverlässig erzeugt werden können, wird gerne die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** rechts gezeigte Schaltung verwendet. Der Widerstand R „zieht“ das Potential am Anschluss P2\_3 „nach oben“ auf Vcc, solange der Schalter offen ist – daher der Name „Pullup“. Der tatsächliche Widerstandswert ist weitgehend unkritisch. Nach unten ist er durch den Strom im geschlossenen Zustand begrenzt, nach oben durch die Störsicherheit im offenen Zustand.

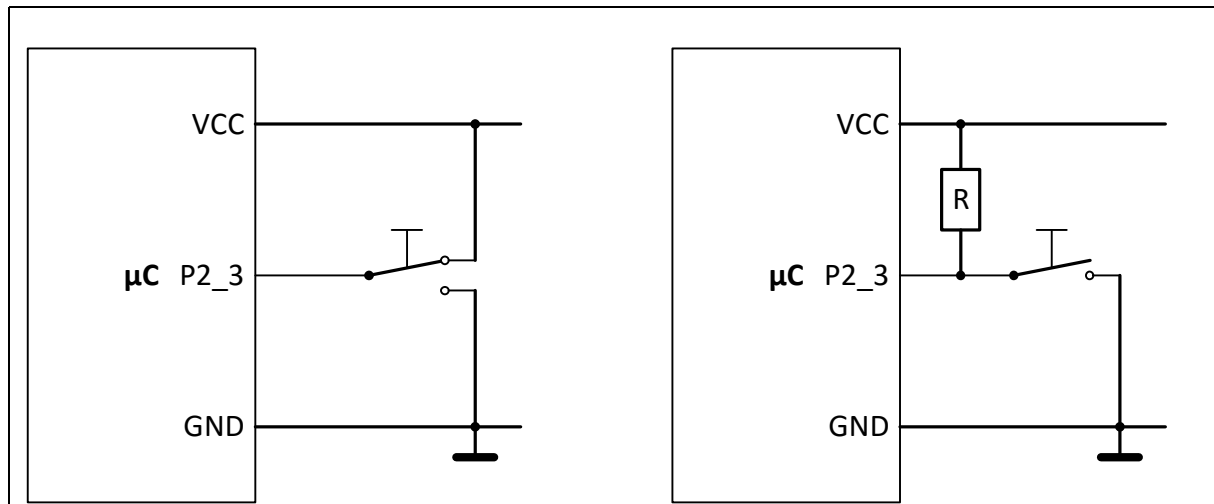


Abbildung 1: Pullup-Widerstand

## 1.9 Register

Bei einem werden Speicherstellen, die in irgendeiner Form die eingebaute Peripherie beeinflussen, als Register bezeichnet. Bei manchen uC sind diese Register Teil des normalen Datenspeichers, bei anderen sind sie davon getrennt. Wenn die Register Teil des Datenspeichers sind, dann haben sie dort eine feste Adresse. Sie können also in einem C-Programm einfach dadurch angesprochen werden, dass man einen Zeiger auf diese Adresse zeigen läßt und dann Werte über den Zeiger liest oder schreibt. Dies ist auch bei dem Praktikums-uC der Fall.

Bei Registern kommt es oft vor, dass nicht alle Bits eine Funktion haben. An diesen Stellen ist dann meist auch kein Speicher vorgesehen, so dass die an solche Stellen geschriebenen Bits verlorengehen. Außerdem sind auch die anderen Stellen nicht immer sowohl les- als auch beschreibbar. Im Datenblatt ist in der Regel bei der Detailbeschreibung der Register für jede Stelle angegeben, welche Eigenschaften für diese Stelle gelten (Tabelle 1).

Symbol	Erklärung
-	Kein Speicher an dieser Stelle (geschriebene Werte gehen verloren)
R	Nur Lesen möglich, Schreiben wirkungslos
W	Nur Schreiben möglich, Lesen sinnlos
R/W	Werte können geschrieben und gelesen werden

Tabelle 1: Registerbeschreibung

Der Hersteller liefert üblicherweise zu jedem seiner uC auch einen passenden C-Header, in dem jedem Register (genauer: dessen Adresse) bereits der Name des Registers in der Dokumentation (hier: im UM) zugeordnet ist. So kann man den Namen aus der Dokumentation in einem C-Programm wie eine Variable verwenden.

Man muss sich aber darüber im Klaren sein, dass jeder Zugriff auf eine solche Variable Nebenwirkungen haben kann.

Selbst das reine Lesen eines Registers kann zu Nebenwirkungen führen. Das muss der Dokumentation entnommen werden. Beim Praktikums-uC führt beispielsweise das Lesen des Registers RBR in einem Kommunikationsmodul (Table 952) dazu, dass nach dem Lesen der Wert in RBR durch das nächste schon empfangene Datum ersetzt wird. Mehrfaches Lesen derselben Variable RBR liefert also ja nach Zustand des Empfängers unterschiedliche Werte.

## 1.10 Typische Pinbeschriftung

Die meisten modernen uC haben pro Pin eine ziemlich ähnliche Innenbeschaltung, aus der sich einige allgemeingültige Eigenschaften erklären lassen. Für den Praktikums-uC findet sich in Fig 43 (Block diagram of the I/O pad) ein Ersatzschaltbild. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist die Funktion der Schaltung für eine sehr typische Anwendung als GPIO vereinfacht dargestellt:

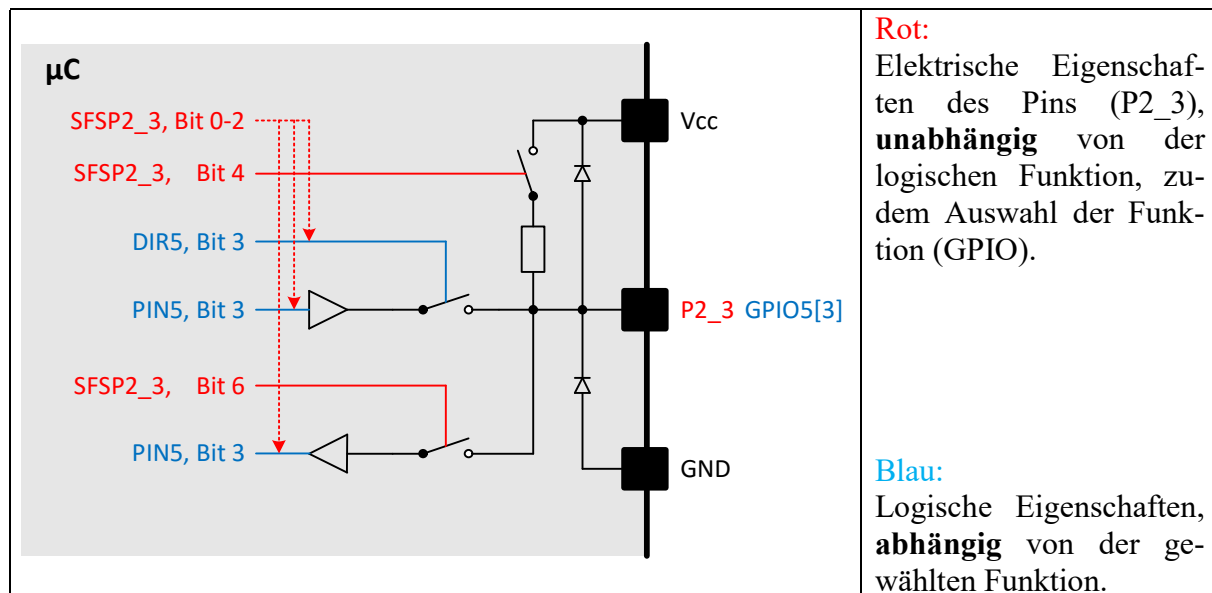


Abbildung 2: Vereinfachte Innenschaltung eines Pins

Der grau unterlegte Teil befindet sich dabei im uC, die Signale rechts sind außerhalb an den entsprechenden Pins zu finden.

Die Signale im uC sind mit den zugehörigen Registern beschriftet, das Signal *SFSP2\_3, Bit 4* stellt also das Bit 4 mit der Wertigkeit 3 im Register *SFSP2\_3* dar.

Die Adresse dieses Registers findet sich im UM in Table 191, die Beschreibung der einzelnen Bits oder Bitfelder in Table 193.

Für das Beispiel wurde die Funktion 4 mit Hilfe des Bitfeldes *SFSP2\_3, Bit 0-2* ausgewählt. Das ist dann der GPIO5[3]. Es fällt auf, dass zwischen der Bezeichnung des Pins und der logischen Funktion kein Zusammenhang bestehen muss. Das Signal ist direkt am Anschluss über zwei eingebaute Dioden mit VCC und Masse verbunden ist. Dieser Schaltungsteil ist unveränderlich. Er dient als Schutzschaltung: Die Eingangssignale werden auf einen Spannungsbereich [GND-0,3V; VCC+0,3V] begrenzt. Die 0,3V sind die Durchlassspannung der verwendeten Schottkydioden. Diese Schutzbeschaltung führt u.a. auch dazu, dass man an solche Pins keine Eingangsspannungen geben sollte, die Vcc um mehr als 0,3V überschreiten. Das ist zu beachten, wenn man Schaltkreise mit unterschiedlichen Spannungsversorgungen zusammenschaltet.

Mit dem Signal *SFSP2\_3, Bit 4* kann ein Pullup-Widerstand zu- bzw. abgeschaltet. Ist der Pin als Ausgang geschaltet, so hat das weiter keine Auswirkung, denn der Spannungswert wird ja ohnehin vom Ausgangstreiber bestimmt. Ist aber der Pin als Eingang geschaltet, dann kann man einen Pullup zuschalten, wenn man das benötigt.

Mit dem Signal *SFSP2\_3, Bit 6* kann der Eingangsverstärker abgeschaltet werden. Damit kann Strom gespart werden, wenn der Anschluss ohnehin immer als Ausgang betrieben wird.

Für die logische Ansteuerung des Anschlusses sind in diesem Beispiel die Register PIN5 und DIR5 zuständig.

Mit Hilfe des Signals *DIR5\_3, Bit 3* kann man den Ausgangstreiber zu- oder abschalten. Ist der Ausgangstreiber abgeschaltet, dann entspricht das der Richtung „Eingang“.

Ist der Ausgangstreiber zugeschaltet, dann bestimmt das Signal *PIN5\_3, Bit 3*, welcher Wert ausgegeben werden soll.

Liest man aber dasselbe Signal ein, dann bekommt man den aktuellen Wert am Anschluss zurückgeliefert.

Die Beschreibung zu diesen beiden Registern finden sich im UM Table 262 und Table 264.

Bei genauem Lesen des UM (Kap. 19.5.3) würde man feststellen, dass es noch weitere Möglichkeiten gibt, den Ausgang zu beeinflussen. Man kann damit manche Aufgabenstellungen etwas bequemer oder schneller lösen.

## 2 Einbauformen

Der Schaltkreis selbst ist meist zwar nur wenige Quadratmillimeter groß (er wird als *Die* bezeichnet), muß aber dann in irgendeiner Form in eine Schaltung eingebaut werden.

### 2.1 Ohne Gehäuse (Die)

Bei sehr großen Stückzahlen und sehr geringer Leistungsaufnahme verzichtet man ganz auf ein Gehäuse. In dem Fall wird der *Die* auf die Platine geklebt und mit einer Spezialmaschine, dem *Bonder*, werden dann die auf dem *Die* genau festgelegten Anschlüsse, die *Pads*, mit feinem Draht (den Bonddrähten) an die Leiterbahnen der Platine angeschlossen. Zuletzt wird zum mechanischen und chemischen Schutz der *Die* samt den Bonddrähten mit einer Kunststoffmasse überzogen. Diese Anschlußart findet sich beispielsweise in vielen Taschenrechnern. Sie ist die günstigste Variante, weil der Hersteller des uC kein extra Gehäuse liefern muß, erfordert aber Spezialwerkzeug. Da kaum Wärme an die Umgebung abgeführt werden kann, muss die Leistungsaufnahme auch gering sein (Milliwatt-Bereich).

### 2.2 Mit Gehäuse (Package)

Die weitaus meisten uC werden vom Hersteller in einem Gehäuse (package, heute mit wenigen Ausnahmen Kunststoff) geliefert. Viele uC können dabei auf Wunsch in mehreren Gehäusevarianten geliefert werden. Früher waren sog. DIL-Gehäuse üblich. Dabei sind die Anschlüsse in zwei parallelen Reihen (DIL: Dual In Line) angeordnet. Diese Bauform verbraucht aber viel Platz auf der Platine. Die meisten uC werden heute in quadratischen oder rechteckigen Gehäusen geliefert, bei denen an allen vier Rändern Anschlüsse vorhanden sind. Diese Bauformen sind für einseitige Montage (SMD, Surface Mounted Device), d.h. ohne Bohrungen auf der Platine ausgelegt. Die Anzahl der Pins reicht dabei typischerweise von 32 bis 208, die Bauformen heißen (T)QFP ((Thin) Quad Flat Package).

Wenn der uC noch mehr Pins hat oder kleinere Maße nötig sind, dann werden die Pins in einem regelmäßigen Raster über die gesamte Unterseite des Gehäuses verteilt. Gebräuchlich sind hier heute nur noch SMD-Bauformen des Typs BGA (Ball Grid Array). Damit können uC mit mehr als 1000 Pins hergestellt werden.

Bei Gehäusen ist eine weitere wesentliche Eigenschaft der Abstand (pitch) zwischen zwei Anschlüssen. Bei DIL-Gehäusen liegt er noch bei 2.54 mm, bei QFP-Gehäusen sind heute 0.3 mm-0.8 mm üblich und bei BGA-Gehäusen ab 0.4 mm.

### 3 Elektrische Eigenschaften

Obwohl es Tausende verschiedener uC gibt, sind viele elektrische Eigenschaften nahezu identisch. Das liegt zum einen daran, dass alle Hersteller heute dieselbe Technologie (CMOS) verwenden und damit dieselben physikalischen Gesetzmäßigkeiten gelten. Zum anderen müssen uC auch mit anderen Bausteinen anderer Hersteller in derselben Schaltung arbeiten, so dass sich Standards herausgebildet haben. In den Datenblättern finden sich diese Eigenschaften generell unter „Electrical Characteristics“ (DB Kapitel 8-12).

#### 3.1 Grenzwerte (Absolute Maximums Ratings)

Die hier angegebenen Werte sind Grenzwerte, deren Überschreitung zur Bausteinbeschädigung führen kann. Das schließt die Lagerung mit ein, die Grenzen für den sicheren und dauerhaften Betrieb sind meist enger und separat aufgeführt.

#### 3.2 Statische Eigenschaften (DC)

Diese Eigenschaften betreffen Spannungs- und Stromwerte. Sie sind nicht vom Takt abhängig. Zunächst wichtig ist der Betriebsbereich für  $V_{CC}$ . Bei dem Praktikums-uC kann  $V_{CC}$  zwischen 2.2V und 3.6 V liegen (DB Table 10).

Weiterhin wird angegeben, welche Spannung ein Eingang gerade noch als L-Pegel bzw. H-Pegel akzeptiert. Im Datenblatt werden diese Spannungen als  $V_{IL}$  und  $V_{IH}$  bezeichnet. Sehr häufig haben einige wenige Anschlüsse abweichende Eigenschaften, so dass mehrere Spezifikationen nötig sind.

Bei heutigen Schaltkreisen der Digitalelektronik verändern sich die Schaltschwellen meist proportional mit der Versorgungsspannung  $V_{CC}$ . Das ist zu beachten, wenn mehrere Schaltkreise mit unterschiedlicher  $V_{CC}$  zusammengeschaltet werden. Die vom uC gelieferten Spannungen  $V_{OH}$  und  $V_{OL}$  sind von der Last (dem Stromfluss) abhängig. Sie können in den meisten Fällen (bis zu Strömen von einigen mA) aber in guter Näherung durch GND und  $V_{CC}$  ersetzt werden.

#### 3.3 Leistungsaufnahme (Power)

Alle heutigen uC werden in einer Technologie namens CMOS hergestellt. Diese Technologie hat die Eigenschaft, dass sich ein Transistor bezüglich der Stromaufnahme wie ein Kondensator verhält.

Dabei fließt nur Strom, wenn sich Spannungen ändern. Damit ergibt sich für die Leistungsaufnahme die Gleichung 1:

$$P = c \cdot f \cdot U^2$$

##### Gleichung 1: Leistungsaufnahme CMOS

Für  $U$  kann in CMOS-Schaltungen  $V_{CC}$  eingesetzt werden. Für die Frequenz  $f$  kann die Taktfrequenz eingesetzt werden, mit der der größte Teil des uC betrieben wird. Dies kann sich im Betrieb ändern, wenn beispielsweise in Zeiten geringer Anforderungen an die Rechenleistung die Taktfrequenz reduziert wird. Auch der Praktikums-uC bietet diese Möglichkeit.

Der Proportionalitätsfaktor  $c$  ist abhängig von der Anzahl der schaltenden Transistoren. Zur Leistungseinsparung können auch hier zeitweise nicht benötigte Schaltungsteile stillgelegt oder mit reduzierter Frequenz betrieben werden. Sie behalten dann ihren aktuellen Zustand weiter bei. Der Praktikums-uC bietet diese Möglichkeit ebenfalls. Im Datenblatt ist in Table 11 der Strombedarf für jedes Modul aufgeführt, bei dem der Arbeitstakt vom Programm geändert

werden kann. Aus den beiden Angaben für 48 MHz und 96 MHz ist der jeweilige Faktor  $c$  ableitbar und damit kann auch der Strombedarf für nicht angegebene Frequenzen bestimmt werden.

Aus Gleichung 1 ergibt sich, dass ein uC in Ruhe keinen Strom verbraucht. Tatsächlich ist dies in guter Näherung der Fall (dabei bleiben natürlich Ströme aus/in Pins unberücksichtigt).

Der Praktikums-uC hat jedoch einen eingebauten Spannungsregler, der den Kern versorgt. Die Spannung  $U$  in Gleichung 1 ist die Kernspannung. Die vom Kern verbrauchte Leistung lässt sich hier also von außen nicht beeinflussen. Eine im zulässigen Bereich (hier: 2.2V – 3.6 V) veränderte Versorgungsspannung ändert nur die im Spannungsregler in Wärme umgesetzte Leistung.

### 3.4 Dynamische Eigenschaften (AC)

Die AC-Eigenschaften betreffen größtenteils Zeitangaben zu Signalwechseln. Bei einem uC werden alle Signal mit dem Takt synchronisiert, das betrifft sowohl Eingangs- wie Ausgangssignale. Bei Ausgangssignalen wird hier angegeben, mit welcher minimalen und maximalen Verzögerung eines Signals von einer Taktflanke an gerechnet werden muss. Bei Eingangssignalen wird angegeben, wie lange vor einer Taktflanke ein Signal stabil anliegen muss, um sicher erkannt zu werden.

Die Dauer, während der ein Ausgangssignal einen bestimmten Pegel beibehält, ist dann nur von der Taktfrequenz abhängig (Signale bleiben fast immer ein Vielfaches einer Taktperiode auf dem gleichen Pegel).

Eine Ausnahme stellt der Takt selbst dar. Hier wird angegeben, mit welcher maximalen Taktfrequenz ein uC bei einer bestimmten Versorgungsspannung betrieben werden kann. Die Untergrenze ist bei heutigen uC in der Regel 0Hz, d.h. ein uC kann beliebig lange ohne Takt betrieben werden – dann kann er natürlich auch nicht rechnen. In der Ruhezeit bleibt jedoch der letzte Betriebszustand erhalten.



## 4 Takterzeugung

Heutige uC kennen prinzipiell drei Arten der Taktversorgung: externer Takt, stabilisierte Oszillatoren, RC-Oszillatoren. Meist sind sogar alle drei Arten mit einem bestimmten uC möglich, welche Form zum Einsatz kommt wird bei der Programmierung festgelegt. Auch bei dem Praktikums-uC ist dies so.

### 4.1 Externer Takt

Falls in einem System bereits ein geeigneter Takt zur Verfügung steht, dann kann dieser Takt auch für den uC verwendet werden. Diese Methode ist zwar ökonomisch, dabei können jedoch folgende Probleme auftreten:

- Der Takt hält nicht die Pegel für VIH und VIL ein (diese sind oft schärfer spezifiziert als die Pegel für GPIOs)
- Wenn der Takt über eine weite Strecke auf der Platine geführt, dann entsteht ein Störsender. Grund: Er hat Rechteckform und damit Oberwellen, deren Amplitude nur langsam abfällt.
- Wenn der externe Takt ausfallen oder abgeschaltet werden kann, dann ist die Gefahr groß, dass das System nicht mehr startfähig ist.

### 4.2 Stabilisierte Oszillatoren

Dies sind Oszillatorschaltungen, die mit einem externen Bauelement (Quarz oder keramischer Resonator) frequenzstabilisiert werden. Da die Schwingungsamplitude ist sehr klein ist und das Bauelement sehr nahe an die entsprechenden Anschlüsse des uC gesetzt wird, treten kaum Störungen auf. Quarze und Resonatoren werden für einen weiten Frequenzbereich angeboten (32768 kHz für Uhrenquarze, 1 MHz ... 100 MHz sonst).

	<b>Quarz</b>	<b>Resonator</b>
Frequenzgenauigkeit	50-100 ppm (nicht abgeglichen) 20 ppm (abgeglichen) 5 ppm (Messquarz)	5000 ppm (0,5%)
Temperaturdrift	30 ppm/K	30 ppm/K
Alterung	5 ppm/Jahr	500ppm/Jahr
Einschwingzeit	10 ms typ.	500 $\mu$ s (typ.)

**Tabelle 2: Vergleich Quarz - Keramischer Resonator**

Resonatoren sind billiger und werden in kleineren Bauformen als Quarze geliefert. Einen Vergleich wichtiger technischer Eigenschaften zeigt Tabelle 2. Da die Oszillatorschaltung bereits im uC enthalten ist, werden extern nur der Quarz/Resonator sowie manchmal zwei Kapazitäten benötigt. Die Werte können den jeweiligen Datenblättern entnommen werden. Eine Sonderstellung nimmt der Uhrenquarz mit 32768 kHz ein. Er wird gerne für Uhren verwendet, da hier eine Auflösung von 1 Hz genügt (dazu muss die Frequenz nur durch  $2^{15}$  geteilt werden). Hier sind Oszillatoren möglich, die mit Strömen von unter 200nA auskommen, so dass eine Batterie oder ein Akku für die gesamte projektierte Lebensdauer des Geräts genügt. Damit ist nach dem Wiedereinschalten eines Geräts immer die aktuelle Uhrzeit sowie das Datum verfügbar. Bausteine, die für diese Funktion optimiert wurden, heißen RTC (Real Time Clock). Manche uC haben eine RTC-Funktion bereits integriert (auch der Praktikums-uC).

### 4.3 RC-Oszillatoren

Dies sind nicht stabilisierte Oszillatoren, die zwar auf eine Nominalfrequenz kalibriert werden können, aber eine starke Drift in Abhängigkeit von Temperatur und Spannung aufweisen. Sie sind daher nur für Aufgaben einsetzbar, bei denen es auf eine Abweichung von 5% oder mehr nicht ankommt. Da RC-Oszillatoren inzwischen schon vollständig in einem uC enthalten sein können (so auch beim Praktikums-uC) sind keine externen Bauelemente mehr erforderlich.

### 4.4 PLL

Eine PLL (Phase Locked Loop) ist eine Schaltung, mit der ein vorhandener Takt ( $f_{in}$ ) mit einem einstellbaren Faktor multipliziert werden kann:

$$f_{out} = \frac{m}{n} f_{in}$$

Die Zahlen  $m$  und  $n$  sind dabei Integer und üblicherweise wird  $m > n$  gewählt, d.h. eine PLL erhöht eine vorhandene Taktfrequenz. Eine PLL beruht auf einer Regelung. Es dauert nach einer Änderung des Multiplikators daher eine gewisse Zeit, bis die unvermeidlichen Regelabweichungen gering genug sind, damit der Ausgangstakt verwendet werden kann. Der eingeschwungene Zustand wird *locked* genannt. Die Schaltung kann diesen Zustand selbst erkennen.

Für den Praktikums- $\mu$ C zeigt Fig. 40 im UM ein Blockschaltbild einer PLL. Der Zähler  $m$  des Multiplikationsfaktors wird hier über die Signale MSEL (Mitte unten) eingestellt, der Nenner  $n$  setzt sich aus den Signalen NSEL (rechts oben) und PSEL (links oben) zusammen. Das Signal LOCK (Mitte oben) zeigt an, ob die PLL eingeschwungen ist. Alle Signale können in Registern eingestellt (UM, 13.6.5.2) bzw. abgefragt (UM, 13.6.5.1) werden

Der Praktikums- $\mu$ C verfügt über drei PLL-Blöcke (PLL0USB, PLL0AUDIO und PLL1). Damit können unterschiedliche Anforderungen an bestimmte Peripherieeinheiten abgedeckt werden. Die PLL0USB kann beispielsweise den für USB 2.0 HighSpeed benötigten Takt von 480 MHz erzeugen. Dieser Takt ist für den Rest des  $\mu$ C aber viel zu hoch. Daher kann die PLL1 einen unabhängigen zweiten Takt erzeugen, der im Betrieb zur Anpassung an die jeweils benötigte Rechenleistung auch geändert werden kann. Dafür genügen allerdings grobe Schritte. Eine weitere PLL (PLL0 AUDIO) bietet eine deutlich feinere Einstellung des Multiplikators. Damit kann die Ausgangsfrequenz sehr gut für vorgegebene Standards, z.B. für eine Audioausgabe an externe Komponenten, eingestellt werden.

Die Umstellung einer PLL auf eine andere Ausgangsfrequenz erfordert manchmal die Beachtung einer genauen (herstellerspezifischen) Prozedur, da sich mit der Umstellung auch sehr plötzlich die Leistungsaufnahme des gesamten  $\mu$ C ändern kann. Das kann insbesondere bei einer sprunghaften Anhebung des Takts kritisch sein. Bei dem Praktikums- $\mu$ C muss beispielsweise eine Umstellung des Arbeitstaktes von 12 MHz auf 200 MHz in zwei Schritten erfolgen (UM, Fig. 35), um dem eingebauten Spannungsregler Zeit zum Nachregeln zu geben.