



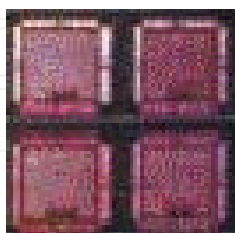
Das TDC-Kochbuch

16.1.1998

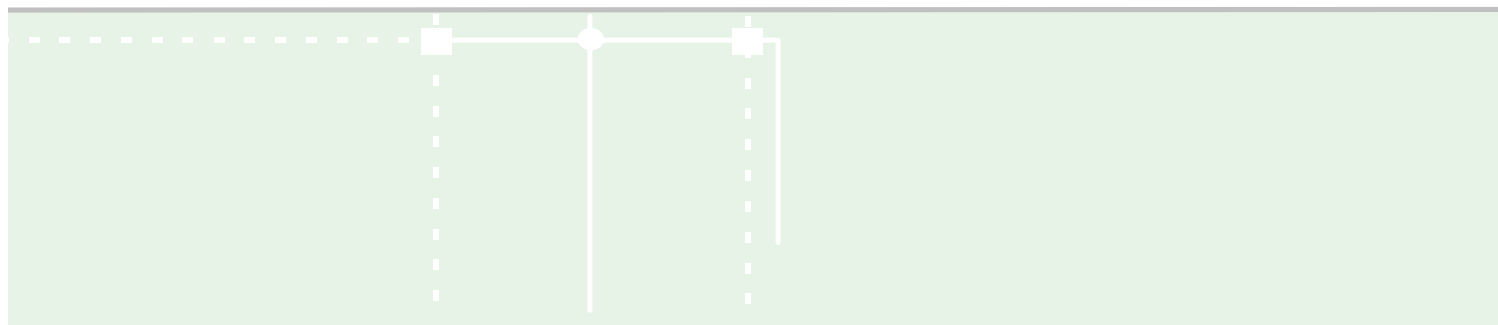
**Wissenswertes zum erfolgreichen
Einsatz dieser Bauelemente**

acam - solutions in time

Hochgenaue Zeitdifferenzmessung



acam
mess • electronic



Vorwort

Die Digitalisierung physikalischer Größen spielt durch die gewaltigen Fortschritte der Elektronik zunehmend eine größere Rolle. Zur Steuerung von Prozessen, der Überwachung und Regelung von Abläufen und für vielfältige weitere Meßaufgaben werden Wandlerysteme benötigt, welche die zu messenden physikalischen Größen in digitale Werte umwandeln.

Die acam-messelectronic gmbh hat integrierte Schaltungen zur Messung von Zeitdifferenzen mit Auflösungen im Picosekundenbereich entwickelt. Diese zur Familie der TDCs (Time to Digital Converter) gehörenden Bausteine wandeln, über die Zwischengröße einer Zeitdifferenz, eine Meßgröße in einen digitalen Wert um. Sie tun damit das gleiche, was ein ADC (Analog to Digital Converter) über die Zwischengröße elektrische Spannung ebenfalls bewerkstelligt.

Während ADCs in der Industrie seit Jahrzehnten eingesetzt werden, sind TDCs und deren Möglichkeiten noch weitgehend neu. Aus diesem Grunde haben wir uns entschlossen mit dem TDC-Kochbuch dem Nutzer oder interessierten Leser eine Lektüre an die Hand zu geben, die ihm viel Wissenswertes über diese Bausteine vermittelt, zeigt welche Möglichkeiten in diesen, für viele Anwender neuen Bausteine, stecken.

Wir werden uns dabei im wesentlichen auf die Möglichkeiten der von uns angebotenen digitalen Laufzeit TDCs konzentrieren. Diese Gruppe von TDCs hat mit Abstand das beste Preis / Leistungsverhältnis, bietet klare und sichere kundenspezifische Lösungen, und hat damit das größte Potential für die Zukunft.

Wir würden uns freuen, mit dieser Broschüre Ihr Interesse an TDCs zu wecken, und Ihnen ein erstes Hilfsmittel zum Kennlernen dieser Bausteine an die Hand zu geben.

Ihr Team der acam-messelectronic gmbh

acam-messelectronic gmbh
Am Hasenbiel 27
D - 76297 Stutensee-Blankenloch
Tel +49-7244-7419-0
Fax +49-7244-7419-29

email support@acam.de

The information provided herein is believed to be reliable; however, acam assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. Acam assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. acam does not authorize or warrant any acam product for use in life support devices and / or systems.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
1. Grundlegendes	4
1.1 Meßprinzipien.....	4
1.1.1 Analoge Verfahren	4
1.1.2 Absolutlaufzeit TDCs.....	4
1.1.3 Relativlaufzeit TDCs	5
1.2 Meßbereiche	6
1.2.1 Grundmeßbereich.....	6
1.2.2 Erweiterter Meßbereich	6
1.3 Kalibrations und Justierungsmethoden.....	7
1.3.1 Softwarekalibration.....	7
1.3.2 Hardwaremaßnahmen zur Einstellung der Auflösung	8
1.3.2.1 Resolution Lock	9
1.3.2.2 Resolution Adjust.....	9
1.3.2.3 Spezielle Delayelemente.....	9
1.4 Kundenspezifische Lösungen	10
1.5 Stromaufnahme.....	10
1.5.1 Wann benötigt ein TDC Strom?.....	10
1.3.2 Die Verbraucher	11
1.3.3 Beispiele.....	11
2. Wer mißt mißt Mist	12
2.1 Stochastische Fehler.....	13
2.1.1 Rauscheffekte	13
2.1.2 Quantisierungsfehler.....	13
2.2 Systematische Fehler	15
2.3 Offsetfehler	16
2.4 Mittelwertbildung.....	16
2.4.1 Statistische Voraussetzungen einer guten Mittelwertbildung.....	17
2.4.2 Genauigkeitserhöhung durch Mittelwertbildung.....	17
3. Anwendungen	19
3.1 Rückführen physikalischer Größen auf Zeitdifferenzen.....	19
3.2 Physikalische Grundlagenforschung	19
3.3 Ultraschall Durchflußmessung	21
3.4 Magnetostriktive Positionierung.....	22
3.5 Laser Entfernungsmessung.....	23
4. Kleines TDC Wörterbuch	24

1. Grundlegendes

In diesem Hauptabschnitt wollen wir etwas näher auf prinzipielle Möglichkeiten und Eigenschaften der Bausteine eingehen, eine Klassifizierung der Funktionsprinzipien vornehmen und auf die verschiedenen Möglichkeiten der Kalibrierung bzw. Auflösungseinstellung eingehen, sowie Grundsätzliches zu kundenspezifischen Lösungen darstellen.

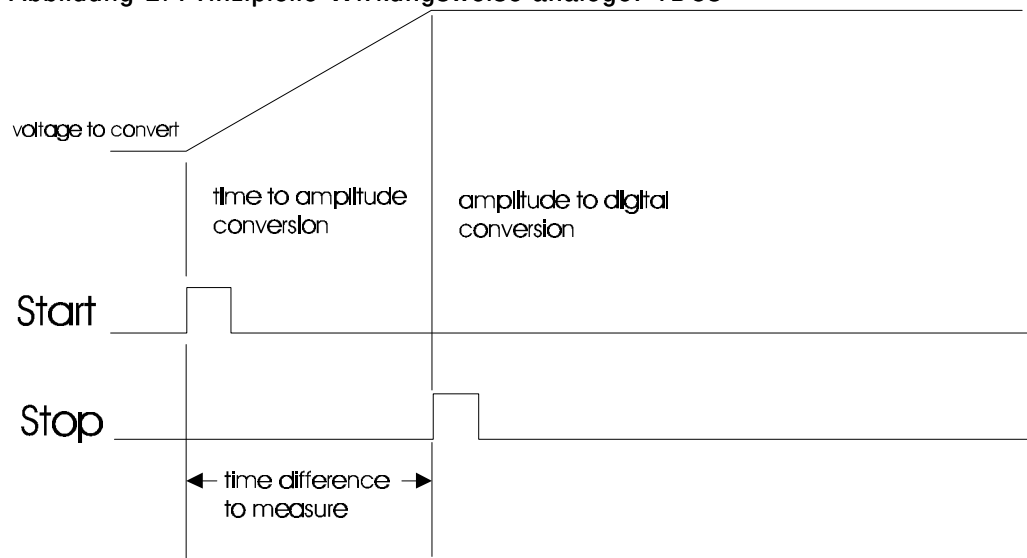
1.1 Meßprinzipien

1.1.1 Analoge Verfahren

Analoge Wandlungsverfahren arbeiten in 2 Phasen. In der 1. Phase wird die zu messende Zeitdifferenz in eine analoge Spannung umgewandelt (Time to Amplitude Conversion) und in einem 2. Schritt wird diese analoge Spannung mit den (bekannten) Methoden digitalisiert (Amplitude to Digital Conversion). Dies ist aufgrund der technischen Möglichkeiten die ältere Technik. Sie erlaubt bei entsprechendem Aufwand sehr hohe Auflösungen bis hinab in den Bereich weniger Picosekunden. Das hat allerdings seinen Preis. Es erfordert eine hohe Sorgfalt beim Schaltungsaufbau und bei der Auswahl der analogen Bauteile.

Folgendes Diagramm zeigt den Zusammenhang und die Abfolge der Messung.

Abbildung 1: Prinzipielle Wirkungsweise analoger TDCs



Digitale Laufzeit TDCs dagegen kommen ohne jede analoge Komponente aus, sie sind eine jener Innovationen, die durch den gewaltigen technischen Fortschritt in der Halbleitertechnologie der letzten Jahre erst sinnvoll möglich wurde. Sie benutzen die chipinternen Laufzeiten einfacher logischer Gatter (z.B. Inverter) zur Feinquantisierung der Zeitdifferenz. Durch die hohen Geschwindigkeitssteigerungen vor allem im CMOS Bereich, ist es heute möglich, solche TDCs auf CMOS Prozessen zu implementieren, und damit Auflösungen im unteren Picosekundenbereich zu realisieren. Es entstehen leistungsfähige, stromsparende und gleichzeitig preisgünstige Komplettsysteme auf einem Chip.

Digitale Laufzeit TDCs lassen sich wiederum in 2 Gruppen unterteilen

- Absolutlaufzeit TDCs
- Relativlaufzeit TDCs

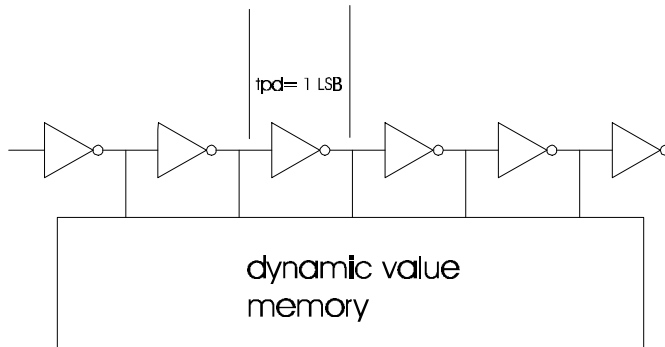
Alle Varianten bekannter Realisierungsprinzipien lassen sich auf eine dieser beiden Gruppen zurückführen.

1.1.2 Absolutlaufzeit TDCs

Diese Art von TDCs verwendet die absolute Laufzeit einfacher interner logischer Elemente zur Feinquantisierung der Zeitdifferenz. Einfach gesagt stellt man fest, wie viele Grundlaufzeiten z.B. von Invertern die zu messende Zeitdifferenz lang war. Bild 2 verdeutlicht den prinzipiellen Aufbau.

Entsprechend geschickte Schaltungsstrukturen, redundante Schaltungsteile und spezielle Layout Methoden auf dem Chip ermöglichen die genaue Rekonstruktion der Anzahl der durchlaufenen Grundlaufzeiten. Die erreichbare Auflösung ist bei diesem Verfahren streng von der möglichen Durchlaufzeit auf dem Chip abhängig. Es lassen sich, bei einfacher Auslegung des Meßkerns, mit diesem Verfahren und der Verwendung modernster CMOS Prozesse Auflösungen bis hinab zu etwa 80-100 ps realisieren.

Abbildung 2: Prinzipielle Wirkungsweise analoger TDCs



Absolutlaufzeit TDCs haben noch folgende weitere Vorteile:

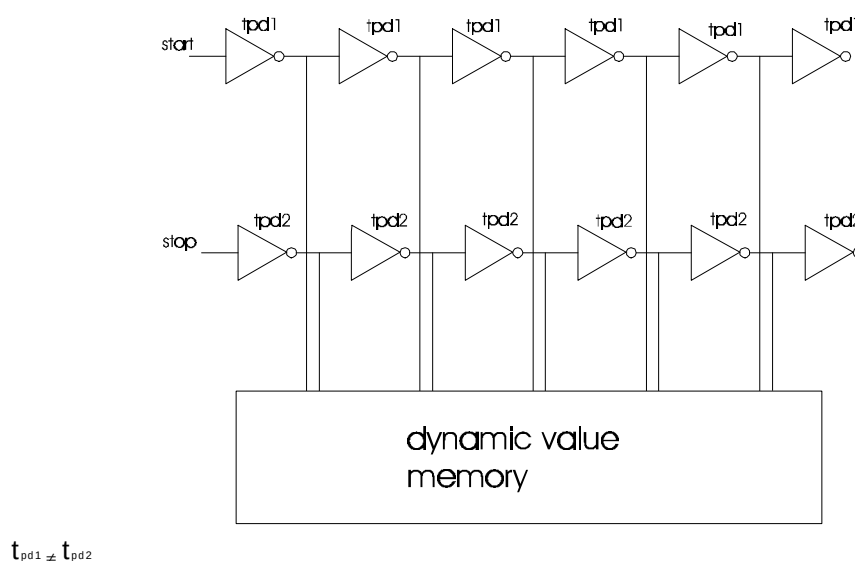
- Die Durchlaufzeit der Inverter lassen sich durch entsprechende Auswertung mit Phasenregelkreisen (PLLs) innerhalb gewisser Grenzen exakt einstellen und temperaturstabil halten. Dadurch ist es möglich die Auflösung von TDCs quarzgenau per Register einzustellen.
- Durch geschickte Mehrfachauslegung des Meßkreises läßt sich die Auflösung noch erheblich steigern. Als sinnvolle Faktoren ergeben sich hier 2-4, so daß man Auflösungen bis ca. 20-30 ps mit Absolutlaufzeit TDCs realisieren kann.

Damit kann man diese Art wohl zu den universellsten TDCs zählen, die auf (fast) jede Aufgabe hin adaptierbar sind.

1.1.3 Relativlaufzeit TDCs

Während bei absoluten Verfahren die erreichbare Auflösung an die Geschwindigkeit des Halbleiterprozesses gebunden ist, hat man diese Bindung bei Relativverfahren nicht unmittelbar in der gleichen Strenge. Wie der Name schon sagt, werden die relativen Laufzeitunterschiede zwischen zwei logischen Elementen zur Feinquantisierung benutzt. Bild 3 verdeutlicht auch hier den prinzipiellen Zusammenhang.

Abbildung 3: Prinzipielle Wirkungsweise eines Relativlaufzeit-TDCs



Mit entsprechender Schaltungsauslegung ist die Auflösung gleich der Differenz der beiden Laufzeiten t_{pd1} und t_{pd2} .

Mit diesen Verfahren kommt man in Bereiche deutlich unterhalb der minimal erreichbaren Laufzeit auf einem Chip. Prinzipiell sind beliebig hohe Auflösungen realisierbar, aber auch hier gibt es praktische Grenzen der Genauigkeit, ab der man nur noch von den Quantisierungsfehlern auf andere Fehlerquellen umschwenkt. Aus der Erfahrung heraus läßt sich sagen, daß sich mit diesen Verfahren sinnvoll etwa 1/5 der Durchlaufzeit als Auflösung erreichen läßt. Damit lassen sich, wiederum bei modernsten CMOS Prozessen, ca. 10-15 ps Sekunden Auflösung erreichen.

Auch andere Eigenschaften, wie eine geringe Differentielle Nichtlinearität, prädestinieren dieses Verfahren für einige Meßaufgaben. Wo solche speziellen Parameter eine entscheidende Rolle spielen, ist diese Art von TDC die erste Wahl.

Einige Möglichkeiten der Absolutlaufzeit TDCs sind jedoch nicht oder nur eingeschränkt möglich. Es ist nicht möglich mit einfachen chipgerechten Mitteln eine quarzgenaue Einstellung der Auflösung zu realisieren. Nur sehr eingeschränkt sind damit multihit TDCs herzustellen, da dieses Meßverfahren eine Wandlungszeit besitzt und damit auch eine relativ lange Totzeit. Insgesamt kann man Relativlaufzeit TDCs zu den spezielleren Lösungen zählen, die dort eingesetzt werden, wo ihre Vorteile klar genutzt werden können.

1.2 Meßbereiche

Die für die Realisierung der verschiedenen Anwendungen notwendigen Meßbereiche sind sehr weit gestreut. Das reicht von wenigen Nanosekunden für einige Anwendungen in der Forschung (z.B. Hochenergiephysik) bis hin in den oberen Millisekundenbereich bei einer Reihe von Industrieapplikationen (z.B. Positioniersteuerungen). Auch bei solch großen Zeitdifferenzen ist es dabei wichtig, eine Auflösung im Picosekundenbereich zu haben. Die geforderte Dynamik liegt teilweise in einem Bereich von fast 30 Bit !!!

All diese Anforderungen lassen sich mit heutigen TDCs 'bequem' realisieren. Man arbeitet dabei mit 2 grundsätzlich verschiedenen Meßbereichen.

1.2.1 Grundmeßbereich

Im Grundmeßbereich wird die gesamte Zeitdifferenz mit dem Hochgeschwindigkeitsmeßteil des TDCs gemessen. Mit dem Startsignal wird die Einheit gestartet und beginnt mit der Quantisierung und mit den Stoppsignal wird der momentane interne Zustand, aus dem dann die gemessene Zeitdifferenz rekonstruiert wird, abgespeichert.

In diesem Meßbereich lassen sich Zeitdifferenzen bis ca. 10-15 μ s vermessen. Darüber hinaus machen sich Rauschen und andere analoge Effekte bemerkbar, so daß dann die Standardabweichung des Ergebnisses merklich zunimmt. Bei Einhalten obiger Regel kann man die Standardabweichung unter 1 LSB halten, sie liegt bei Zeitdifferenzen von < 5 μ s im Bereich von 0.5 - 0.7 LSBs.

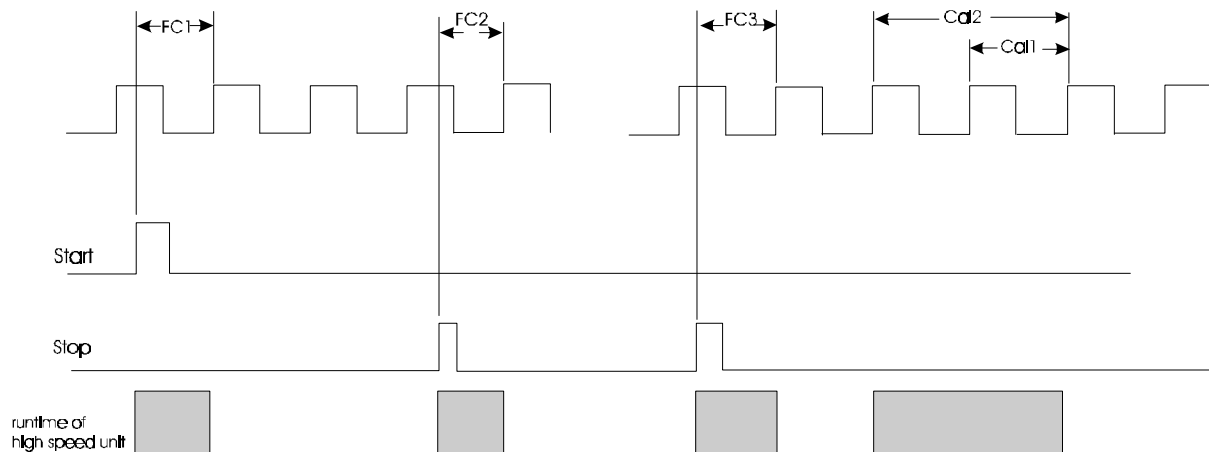
Je nach verwendetem Baustein und Meßmodus gibt es mitunter auch eine minimale Zeitdifferenz unter der eine Messung nicht möglich ist. Der TDC-GP1 der acam-messelectronic verfügt über Meßmodi wo exakt bis 0 s gemessen werden kann bzw. wo es nicht notwendig ist, Start und Stop klar als solche zu definieren, wo also auch 'Stop' vor 'Start' kommen kann und richtig vermessen wird (vgl. TDC-GP1 Manual).

1.2.2 Erweiterter Meßbereich

Da es etliche Anwendungen für TDCs gibt, die in einem Meßbereich liegen, der unmöglich mit dem Grundverfahren sinnvoll abgedeckt werden kann, wurden Vorteilverfahren eingeführt. Diese ermöglichen es ohne Verschlechterung der Standardabweichung den Meßbereich praktisch beliebig zu erweitern.

Bild 4 zeigt die Vorgehensweise in diesem Meßmodus

Abbildung 4:



$$\text{time} = \text{period} * \left(\text{CC} + \frac{\text{FC1} - \text{FC2}}{\text{Cal2} - \text{Cal1}} \right)$$

CC = value of the precounter

Wie man im obigen Bild erkennt wird bei diesem Prinzip vom Start einer zu messenden Zeitdifferenz bis zur nächsten steigenden Flanke des Kalibriertaktes mit der Meßeinheit gemessen (FC1). Danach startet ein Zähler, der die ganzen Perioden des Vorteilers zählt. Mit der Stopflanke der Zeitdifferenz wird die Meßeinheit wieder gestartet und mit der nächsten Flanke des Kalibriertaktes gestoppt (FC2). Zur Kalibration können im weiteren Verlauf eine und zwei Perioden des Kalibriertaktes ausgemessen werden. Nach der angegebenen Formel kann dann die gemessene Zeitdifferenz berechnet werden.

Die maximal meßbare Zeitdifferenz ist jetzt nur noch von der Tiefe des Vorteilers abhängig, und kann damit praktisch jeden beliebigen Wert annehmen. Man erkennt auch, daß die eigentliche Meßeinheit nur noch zeitweise in Betrieb ist. Die Zeit in der die Meßeinheit aktiv ist, ist hier praktisch unabhängig von der gemessenen Zeitdifferenz. Das hat sehr große Vorteile bei der Stromaufnahme, die in diesem Meßmodi bei größer werdender Meßzeit praktisch nicht mehr ansteigt.

Kleines (nicht ganz ernst gemeintes) Beispiel zur Verdeutlichung:

Um eine Zeitdifferenz von 1000 Jahren !!!! mit der vollen Auflösung von TDCs messen zu können braucht man bei einer Vorteilerfrequenz von 1 MHz eine Vorteilertiefe von 55 Bit. Ein problemlos ohne großen Aufwand realisierbarer Zähler, der bequem in einen Chip zu integrieren wäre. Das Ergebnis mit 100 ps Auflösung wäre 70 Bit breit.

1.3 Kalibrations und Justierungsmethoden

Die Durchlaufzeit logischer Gatter auf Chips ist eine recht ungenaue Angelegenheit. Der Wert ist großen Schwankungsbreiten unterworfen. Die resultierende Durchlaufzeit ist von Prozeßschwankungen, Temperatur- und Spannungsschwankungen abhängig. Allein Temperatur- und Spannungsschwankungen, können Änderungen der Durchlaufzeit von > 50 % bewirken. Zum Ausgleich dieser Schwankungen haben sich 2 Methoden etabliert.

- Softwarekalibration
- direkte Einstellung der Durchlaufzeit durch Hardwaremaßnahmen

Bei den Hardwaremaßnahmen unterscheidet man noch 2 Methoden

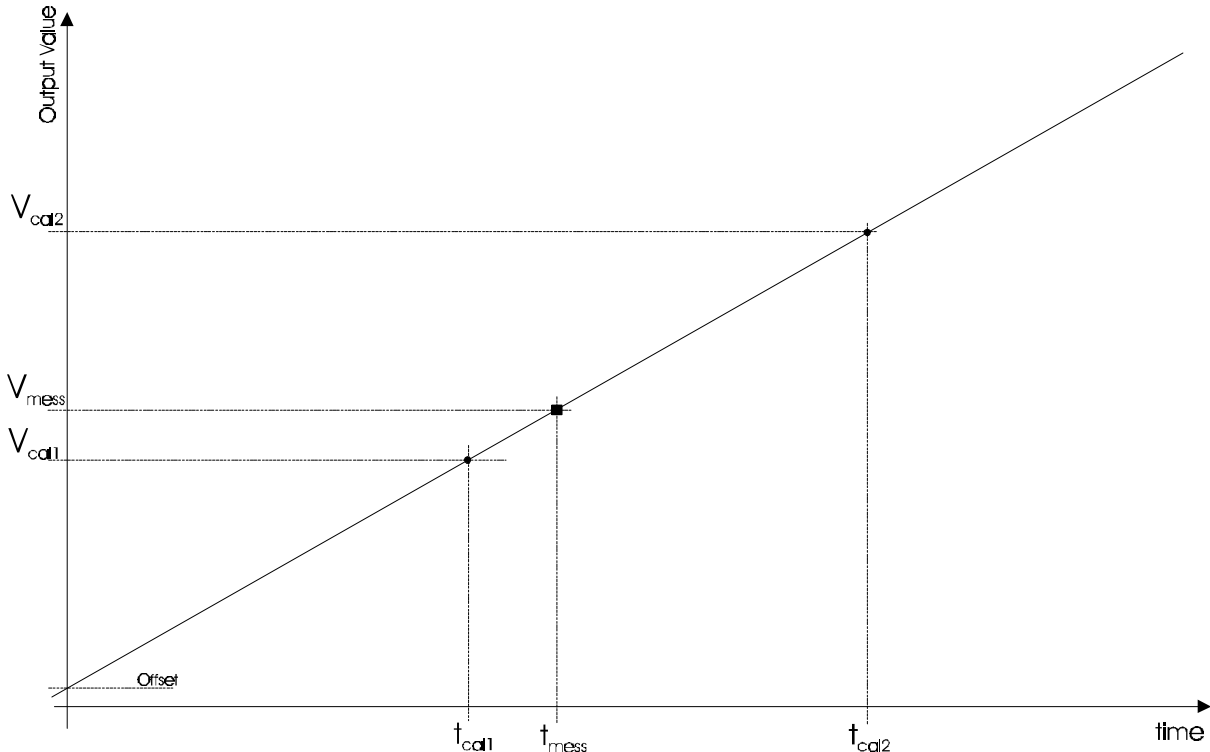
- Resolution Lock
- Resolution Adjust

1.3.1 Softwarekalibration

Hier wird die Zeitdifferenz mit (erst einmal) unbekannter Auflösung gemessen. Es werden dann zeitnah zum Meßereignis (am besten unmittelbar nach einer Messung) Kalibrierwerte erzeugt, mit

denen dann der Meßwert normiert wird. Die Kalibrierwerte werden dadurch erzeugt, daß Zeitdifferenzen bekannter Größe mit der unbekannten Auflösung vermessen werden. Diese bekannten Zeitdifferenzen sind z.B. sehr einfach aus einem Quarztakt abzuleiten. Ein Quarztakt ist sowohl was die absolute Genauigkeit als auch den Jitter betrifft eine sehr gute geeignete und bewährte Quelle. Bild 5 zeigt den Zusammenhang grafisch.

Abbildung 5:



Der unbekannte Meßwert V_{mess} liegt auf der Meßgeraden des TDCs genauso die beiden Kalibrierwerte V_{cal1} und V_{cal2} . Diese Gerade ist charakterisiert durch eine Steigung, die der Auflösung entspricht und einem Offset beim Zeitnullpunkt. Mit Hilfe von 2 Referenzmessungen t_{cal1} und t_{cal2} kann man über die 2 Punkt Form der Geraden die Steigung und den Offset berechnen und damit die unbekannte Zeitdifferenz t_{mess} bestimmen.

Aus der 2 Punkt Form der Geraden ergibt sich.

$$t_{mess} = \frac{(t_{cal2} - t_{cal1}) * (V_{mess} - (2 * V_{cal1} - V_{cal2}))}{(V_{cal2} - V_{cal1})}$$

Dabei ist die Steigung:

$$\frac{(t_{cal2} - t_{cal1})}{(V_{cal2} - V_{cal1})}$$

und der Offset:

$$(2 * V_{cal1} - V_{cal2})$$

Digitale Laufzeit TDCs haben durch die Bank die sehr angenehme Eigenschaft, daß die Meßgerade tatsächlich eine Gerade ist. Genauigkeitsprobleme durch Integrale Nichtlinearität, eines der Standardprobleme bei analogen TDCs, sind nicht bekannt. Die integrale Nichtlinearität liegt weit unterhalb von 1 LSB. Dies vereinfacht die notwendige Mathematik einer Kalibrationsrechnung erheblich.

1.3.2 Hardwaremaßnahmen zur Einstellung der Auflösung

Die hier dargestellten Maßnahmen beruhen auf dem Prinzip, daß Temperaturschwankungen durch entsprechende Spannungsregelung wieder ausgeglichen werden können. Es findet also eine Regelung der Betriebsspannung des Meßkerns statt. Die Regelung geschieht über Phasenregelkreise (PLL). Der Oszillator (VCO) der PLL befindet sich auf dem Chip und hat die gleiche oder möglichst ähnliche Temperaturabhängigkeit des Meßkreises. Ein Konstanthalten der Frequenz des VCOs wirkt sich somit in einem Konstanthalten der Auflösung des Meßkreises aus.

1.3.2.1 Resolution Lock

Bei dieser Methode befinden sich zwar PLL und Meßkreis auf den gleichen Chip sind aber schaltungstechnisch getrennt. Durch ähnliche Auslegung der Delayelemente erreicht man durch 'Matching Effekte' auf dem gleichen Stückchen Silizium sehr ähnliches Verhalten bzgl. Spannungs- und Temperaturabhängigkeit.

Letztendlich wird man aber keine vollständige Unterdrückung von Temperaturschwankungen erreichen. Bei guter Schaltungsauslegung und gutem Layout erreicht man einen Unterdrückungsfaktor von etwa 100. Da bei CMOS die unregelmäßige Temperaturabhängigkeit bei ca. 3000 ppm / K liegt kann man mit dieser Methode die Auflösung auf ca. 30 ppm / K stabilisieren.

Bei Betrieb im Resolution Lock Modus ist es nicht möglich, auf Kalibriermessungen zu verzichten. Die Auflösung ist eben doch nicht ganz temperaturunabhängig, und dies kann bei größeren Temperaturschwankungen und längeren Meßzeiten durchaus zu merklichen Fehlern führen. Es kommt auch von Chip zu Chip zu Unterschieden im Matching von PLL und Meßeinheit. So daß eine einzige Einstellung bei verschiedenen Chips zu verschiedenen Auflösungen des Meßkreises führt.

Dies Methode ist jedoch dazu geeignet, die Auflösungsschwankungen deutlich temperaturunabhängiger zu machen und damit Kalibrationsläufe drastisch auf z.B. 1 mal pro 5 Minuten zu reduzieren. Für einige Anwendungen, wo es auf höchste Meßraten ankommt, ist das eine große Hilfe.

1.3.2.2 Resolution Adjust

Der Resolution Adjust Modus ist letztendlich die konsequente Umsetzung zu einer mit PLL geregelten Auflösung. Meßkreis und PLL sind schaltungstechnisch und durch das Layout sehr eng miteinander verbunden. Man hat hier, wie der Name schon sagt, die Möglichkeit die Auflösung tatsächlich exakt per Software und unabhängig vom Exemplar einzustellen. Die eingestellte Auflösung von vollkommen temperaturunabhängig.

Es ist keine Kalibration des Meßkreises notwendig. Wenn die PLL gefangen hat, ist auch die Auflösung genau bekannt. Die absolute Genauigkeit der Auflösung ist nur noch von der Genauigkeit des verwendeten Referenzoszillators Abhängig.

Zu beachten ist allerdings, daß natürlich nicht jede Auflösung eingestellt werden kann. Der Einstellbereich ergibt sich aus der Grundgeschwindigkeit des Chips bei Standardbedingungen (5V, 25 C) und aus der Spannungsabhängigkeit der Auflösung (ca. 20 % / V bei 5V).

Bei der Einstellung der Auflösung sind die möglichen Temperaturschwankungen zu berücksichtigen, die es auszugleichen gilt. Geht man hier zu lässig vor, besteht die Gefahr, daß die Auflösung bei ungünstigen Temperaturen nicht mehr gehalten werden kann, weil die PLL ihren Fangbereich verläßt. Bei CMOS hat man etwa eine Temperaturabhängigkeit 0.25 % / K.

Beispiel: Will man eine Auflösung einstellen, die über den gesamten spezifizierten Temperaturbereich des TDC von z.B. - 40 °C - +85 °C sicher gehalten werden kann, hat man folgende Parameter zu berücksichtigen.

- die Auflösung würde sich ohne Regelung um ca. 31 % ändern; ca. 10 % nach oben bei +85 °C und ca. 20 % nach unten bei -40 °C
- man braucht also einen Regelbereich von ca. 0.5 V nach oben und ca. 1 V nach unten, gibt man überall noch 0.5 V Reserve braucht man 1 V nach oben und 1.5 V nach unten.

Man sieht deutlich, daß man bei der Auflösung gewissen Beschränkungen unterliegt, da man ansonsten Gefahr läuft, daß an den Temperaturgrenzen der Baustein außerhalb der Spannungsspezifikation betrieben wird, oder die PLL nicht mehr die Auflösung halten kann. Es lassen sich aber auf jeden Fall immer (bequem) Auflösungen finden, die diese Bedingung erfüllen.

1.3.2.3 Spezielle Delayelemente

In einer dritten Art der Einstellung der Auflösung werden nicht einfache Grundgatter zur Feinquantisierung benutzt, sondern man modifiziert diese Gatter durch zusätzliche Transistoren, welche die Durchlaufzeit des Elementes steuerbar machen. Die Steuerung geschieht über eine analoge Spannung am Steuereingang der Delayelemente. Diese Steuerspannung wird wiederum aus einem Phasendiskriminator gewonnen, der die Phase eines Referenztaktes zum Takt der Delayelemente vergleicht.

Bei TDCs die nach dieser Methode arbeiten, kennt man auch die Variante, daß der externe Referenztakt nicht mit einem intern erzeugten Takt in der Phase verglichen wird, sondern daß eine Delayline ohne Rückkopplung in den Delays der Einzelemente so gesteuert wird, daß n Delayelemente (z.B. 32) im Gesamtdelay genau eine Periode des Referenztaktes ergeben. Auch hier

wird durch einen Phasendiskriminator ein Vergleich durchgeführt und die Verzögerungszeiten der Delayelemente werden entsprechend gesteuert.

Die in diesem Unterpunkt aufgeführte Regelart hat generell den Nachteil, daß sie nicht auf standard ASICs zu realisieren ist, da analoge Filter, Sondermakros u.ä. benötigt werden, so daß TDCs dieser Ausführungsart häufig Full Custom Schaltungen sind, was sich vor allem in den Entwicklungskosten negativ niederschlägt und auch von vielen Halbleiterherstellern nicht für kleinere bis mittlere Stückzahlen unterstützt wird.

1.4 Kundenspezifische Lösungen

Digitale Laufzeit TDCs haben zwei weitere (große) Vorteile.

- sie benötigen nur digitale Elemente zur kompletten Realisierung und sind damit auf rein digitalen Prozessen realisierbar
- dadurch daß sie auf rein digitalen Prozessen realisierbar sind, bieten sie die Möglichkeit, weitere komplexe digitale Elektronik mit auf dem Chip zu implementieren.
- Diese Vorteile führen zu 2 Konsequenzen
- Standard TDCs mit hoher digitaler Eigenintelligenz die mehr sind als reine Meßwertumwandler (z.B. interne leistungsfähige Recheneinheiten, viele verschiedene Meßmodi etc.)
- es können relativ kostengünstig, schnell und ohne großes Risiko kundenspezifische Lösungen entwickelt werden
- zur Realisierung kann man bei richtiger Wahl des Meßkreises auf ASICs (Application Specific Integrated Circuit) zurückgreifen. Das ergibt große Kosten- und Zeitvorteile und erhöht wesentlich die Wahrscheinlichkeit zur Funktion auf Anhieb (d.h. ohne Redesign).

Vor allem die Möglichkeit einer exakt auf spezielle Bedürfnisse hin abgestimmten kundenspezifischen Lösung darf in den sich daraus ergebenden Chancen für die Produktentwicklung nicht unterschätzt werden. Man befindet sich in der digitalen Welt und kann den digitalen TDC mit praktisch jeder anderen digitalen Funktion auf den gleichen Chip integrieren. Speziell auf bestimmte Geräte oder Gerätegruppen hin entwickelte TDCs sind machbar, die dann die exakt benötigte Funktionalität haben.

Heutige digitale ASIC Prozesse stellen eine hervorragende Plattform dar, die fast keine Wünsche mehr offen läßt.

Viele erfolgreiche Entwicklungsprojekte (d.h. auf Anhieb funktionierende Bausteine) wurden hier schon realisiert. Allerdings sollten gewisse Stückzahlen des so entwickelten Bausteines nicht unterschritten werden, da ansonsten Entwicklungs- und Einmalkosten sehr zu Buche schlagen. Als grober Richtwert hat sich hier ein Stückzahl von 5.000 Bausteinen herauskristallisiert unter der sich eine solche Entwicklung kaum lohnt.

1.5 Stromaufnahme

Ein sehr wichtiges Kapitel bei TDCs umfasst das Thema Stromaufnahme solcher Bausteine. Digitale Laufzeit TDCs in CMOS lassen sich mit einer Stromaufnahme bis tief in den Microamperebereich betreiben. Diese Bausteine sind voll batterietauglich, was für etliche Applikationen eine äußerst interessante Sache ist.

Da es sehr wichtig ist, die Randbedingungen der Stromaufnahme zu kennen, um selbst erste Abschätzungen über erreichbare Stromaufnahmen zu machen, haben wir dieses Kapitel mit aufgenommen. In den folgenden Ausführungen wird immer von digitalen CMOS TDCs ausgegangen.

1.5.1 Wann benötigt ein TDC Strom?

Diese Frage läßt sich sehr einfach beantworten - während der Messung oder genauer gesagt - wenn die Hochgeschwindigkeitsmeßeinheit oder andere Teile des Chips Aktionen durchführen. In den Zeiten dazwischen, und die sind in aller Regel wesentlich größer, ist der Baustein vollkommen in Ruhe. Das heißt bei CMOS fließt nur der Leckstrom und der liegt meist im Nanoampere Bereich. Die Stromaufnahme von TDCs läßt sich auf keinen Fall pauschalisieren. Sie ist extrem vom Betriebsmodus und der Meßrate abhängig in dem der Baustein betrieben wird.

Beim gleichen Baustein kann man durch verschiedene Betriebsmodi die Stromaufnahme um bis zu vier Zehnerpotenzen variieren !!! Bei der Betrachtung der Stromaufnahme ist daher größtes Augenmerk darauf zu legen, wie der Baustein betrieben wird. Pauschalierungen über einen Baustein sind absolut unzulässig.

1.3.2 Die Verbraucher

Ein kompletter TDC Baustein hat natürlich noch andere 'Verbraucher' die es zu beachten gilt. Bei der Kalkulation sind folgende Verbraucher zu berücksichtigen.

- TDC-Meßkreis
- Vorteiler, wenn im erweiterten Meßbereich gemessen wird
- ALU bei der Berechnung der Meßergebnisse
- I/O Struktur des Bausteines, hier vor allem Kalibriertakteingang und Datenbus

Bei einem 0.8 μ CMOS Prozeß und 5 V Spannungsversorgung kann mit etwa folgenden Strömen gerechnet werden.

TDC-Meßkreis: 20 mA (während der aktiven Meßzeit)
 Vorteiler: 50 μ A / MHz
 ALU: 10 mA (Während der Berechnung)
 Kalibriertakteingang: 40 μ A / MHz
 Datenbus (8 Bit): 2 mA / Megazugriffe / sec.

Achtung bitte unbedingt die Beispiele beachten !!!

Um Licht in das Dunkel zu bringen sind Beispiele am besten geeignet.

Die Beispiele halten sich generell an die Möglichkeiten und Bedingungen des TDC-GP1 der acam-messelectronic.

1.3.3 Beispiele

■ Beispiel 1

Meßzyklus:

Es wird 10.000 mal pro Sekunde eine Zeitdifferenz von im 1 μ s (Mittelwert) im Grundmeßbereich gemessen.

Sonstige Bedingungen:

Die Zeitdifferenz wird On Chip mit einer ALU kalibriert die dafür 2 μ s benötigt. Der Kalibriertakt beträgt 1 MHz. Die 16-Bit Ergebnisse werden über einen 8-Bit Bus ausgelesen.

Es ergeben sich folgende Stromaufnahmen der Einzelkomponenten:

Meßkreis: Der Meßkreis ist 10 ms / s also 1 % der Gesamtzeit aktiv $\rightarrow 20 \text{ mA} * 0.01 = \underline{200 \mu\text{A}}$

Es ist kein Vorteiler mit beteiligt, da im Grundmeßbereich gemessen wird.

ALU: Die ALU ist 20 ms / s also 2% der Gesamtzeit aktiv $\rightarrow 10 \text{ mA} * 0.02 = \underline{200 \mu\text{A}}$

Kalibriertakteingang: 1 MHz Kalibriertakt = 40 μ A

Datenbus: Es sind 20.000 Zugriffe / sec notwendig = 40 μ A

Es sind noch einige sonstige Aktionen wie z.B. gelegentliches Kalibrieren zu berücksichtigen. Das dürfte noch einmal mit 20 μ A zu Buche schlagen.

Die Gesamte Stromaufnahme in diesem Beispiel beträgt ca. 500 μ A.

■ Beispiel 2

Im 2. Beispiel wollen wir nun an die untere Grenze der Stromaufnahme gehen, um zu zeigen, was in etwa machbar ist. Das hier vorgerechnete Beispiel wurde genauso in einem batteriebetriebenen Massenprodukt verwirklicht.

Meßzyklus: Es wird 1 mal pro 2 Sekunden eine Meßung mit einer durchschnittlichen Meßdauer von 600 μ s durchgeführt. Pro Messung wird eine Kalibration durchgeführt. Es wird im erweiterten Meßbereich gemessen.

Sonstige Bedingungen: Das Ergebnis wird On Chip mit einer ALU kalibriert. Das 32-Bit Ergebnis wird ausgelesen. Der Kalibriertakt beträgt 2 MHz. Er wird jedoch nur zur Messung für ca. 50 ms aktiv. Die Zeit mußte deshalb so lange gewählt werden, weil dieser Takt noch für andere Schaltungsteile als Quelle diente.

Es ergeben sich folgende Stromaufnahmen der Einzelkomponenten:

Meßkreis: Der Meßkreis ist natürlich pro Messung nicht 600 µs aktiv sondern incl. Kalibrierung im Mittel 3 Kalibriertaktperioden also ca. 1.5 µs. (Siehe Bild 4, Seite 7) Die aktive Zeit ist im erweiterten Meßbereich unabhängig von der Meßzeit und wäre auch bei 100 ms Meßzeit nicht größer.

Meßkreis: Aus diesen Gegebenheiten ergibt sich eine Stromaufnahme des Meßkreises von:
 $20 \text{ mA} * 1.5 \text{ e-}6 * 0.5 = \underline{15 \text{ nA}}$

Vorteiler: Der Vorteiler ist pro Messung ca. 600 µs aktiv → $50 \text{ µA} * 0.0006 * 0.5 \rightarrow \underline{15 \text{ nA}}$

ALU: Die ALU ist ca. 2 µs pro Messung aktiv → $10 \text{ mA} * 2 \text{ e-}6 * 0.5 = \underline{10 \text{ nA}}$

Kalibriertakteingang:

Der Eingang ist ca. 50 ms / Messung aktiv → $2 * 50 \text{ µA} * 50 \text{ e-}3 * 0.5 = \underline{2.500 \text{ nA}}$

Datenbus: 10 nA

Ruhestromaufnahme: 150 nA typ.

Es ergibt sich eine Gesamtstromaufnahme in diesem Beispiel von ca. 2.7 µA bei 5 V Versorgungsspannung. Da dies eine 3.6 V Applikation war reduzierte sich die Stromaufnahme auf ca. 1.9 µA.

Anmerkungen:

Bemerkenswert ist die Tatsache, daß praktisch die gesamte Stromaufnahme vom Kalibriertakteingang herkommt. Der Meßkreis und sonstige Verbraucher spielen keine nennenswerte Rolle. Wäre es bei diesem Beispiel möglich gewesen, die Laufzeit des Kalibriertaktes den Notwendigkeiten des TDCs anzupassen, wären incl. Anschwingzeit des Oszillators 5 ms bequem realisierbar gewesen und die gesamte Stromaufnahme des Bausteines wäre im Nanoampere Bereich gelandet.

Auch dem zweithöchsten Verbraucher, der Ruhestromaufnahme, sollte Beachtung geschenkt werden. Dieser Wert ist relativ unsicher und kann um mehrere hundert Prozent nach oben und unten abweichen, einzelne Ausreißer bis in den Micoampere Bereich sind nicht auszuschließen, diese Ausreißer beschränken sich jedoch aus Erfahrung auf kleiner 0.1 Promille d.h. weniger als 1 Baustein von 10.000 wird in der Ruhestromaufnahme mehr als 1 µA haben.

Bitte beachten: Diese geringe Stromaufnahme ist natürlich nicht im Resolution Adjust oder Resolution Lock Modus realisierbar. Hier benötigt die PLL einen Dauerstrom von 15-25 mA, so daß dieser Modus nur beschränkt batterietauglich ist.

Es wird deutlich, daß wenn man alle Gegebenheiten beachtet, und die entsprechenden Parameter optimieren kann, digitale Laufzeit TDCs mit minimaler Stromaufnahme zu betreiben sind. **Damit wird manche kritische Batterieapplikation wesentlich entspannt, oder gar erst ermöglicht.**

2. Wer mißt mißt Mist

Den Wahrheitsgehalt dieser Hauptüberschrift hat wahrscheinlich schon jeder Entwickler am eigenen Leibe erfahren müssen, und geglaubt Dinge gemessen zu haben, die sich im Nachhinein als phantastisch gut oder schlecht erwiesen haben. Egal ob viel zu gut oder viel zu schlecht, daneben ist eben daneben und hat immer negative Konsequenzen. Entweder man wird später gnadenlos von der Realität eingeholt (viel zu gut), oder man verwirft den Einsatz eines eigentlich brauchbaren Schaltungsaufbaus (viel zu schlecht) und sucht unnötiger Weise andere Lösungen, die dann vielleicht auch noch deutlich teurer sind, aber auf jeden Fall zusätzliche Zeit kosten, die man oft nicht hat.

Bei TDCs hat man darüber hinaus noch mit dem Umstand zu kämpfen, daß diese Bausteine (noch) weitgehend unbekannt sind, und man somit keine allgemein bekannten Vergleichswerte hat, die man zur Überprüfung des selbst (scheinbar) Gemessenen heranziehen kann.

Die Autoren erinnern sich noch lebhaft an einen Fall wo ein Kunde einen TDC Baustein getestet hat, mit der von ihm gemessenen Standardabweichung von über 7 LSB nicht sehr zufrieden war und den Einsatz des Bausteins schon wieder verwerfen wollte. Bei einem Telefonat stellte sich die Fehlinterpretation von Angaben im Manual heraus. Mit einigen Anregungen und Tips konnte innerhalb kürzester Zeit aus den mageren 7 LSB durchaus beeindruckende 0,8 LSB gemacht werden. Dem Einsatz des Bausteines stand nichts mehr im Wege.

Dieser Hauptabschnitt dient also dazu, nach einer kurzen Einführung in die möglichen Meßfehler, einen Überblick über die zu erwartenden Ungenauigkeiten bei TDCs zu geben, 'beliebte' Fehler-quellen zu nennen, und dem Benutzer verlässliche Anhaltspunkte zu geben, was er mit solchen Bausteinen erreichen kann. Die hier als erreichbar definierten Werte sind alle vielfach gemessen und entsprechen dem, was mit normalem Schaltungsaufwand machbar ist.

2.1 Stochastische Fehler

Unter stochastischen Fehlern verstehen wir alle Fehlerquellen, die auf Quantisierungsrauschen und anderen Rauschquellen zurück zu führen sind, also Fehler die sich mit statistischen Parametern wie z.B. der Standardabweichung quantitativ erfassen lassen.

Tatsächlich hat sich die Standardabweichung allgemein als gutes Maß für die Qualifizierung stochastischer Fehler herausgestellt.

Kurze Definition: Die Standardabweichung ist der mittlere quadratische Fehler über eine Reihe von Meßergebnissen zum arithmetischen Mittelwert dieser Meßergebnisse. Die notwendigen Formeln zur Berechnung finden sich in jeder mathematischen Formelsammlung.

Die stochastischen Fehler setzen sich aus 2 Fehlergruppen zusammen

- Quantisierungsfehler
- Rauscheffekte (thermisches Rauschen)

2.1.1 Rauscheffekte

Die Laufzeiten auf einem Chip, die bei digitalen Laufzeit TDCs zur Messung benutzt werden unterliegen natürlich auch einem Rauschen. Dieses Rauschen ist praktisch nicht beeinflussbar und vom verwendeten Prozeß und der Temperatur abhängig. Quantitativ spielt das Rauschen die deutlich kleinere Rolle bei den stochastischen Fehlern. Wie stark es zum tragen kommt liegt an der absoluten Laufzeit der eigentlichen Meßeinheit. Bei kleineren Meßzeiten ist es praktisch nicht feststellbar.

An folgende Richtwerte kann man sich halten.

- | | |
|----------------------|--|
| Meßzeit < 5 µs: | praktisch kein Rauschen feststellbar. Die Standardabweichung ist unabhängig von der Zeitdifferenz konstant bei ca. 0.5-0.7 LSBs |
| Meßzeit 5µs - 15 µs: | Standardabweichung steigt langsam mit ca. 0.05 LSBs/µs an. Wegen der quadratischen Addition beim Rauschen geschieht die Zunahme in einer Wurzelfunktion. |

Meßzeiten über 15 µs sollten nur im Ausnahmefall im Grundmeßbereich gemessen werden. Vor allem bei Zeiten über 50 µs kommt es zu weiteren qualitätsmindernden Effekten.

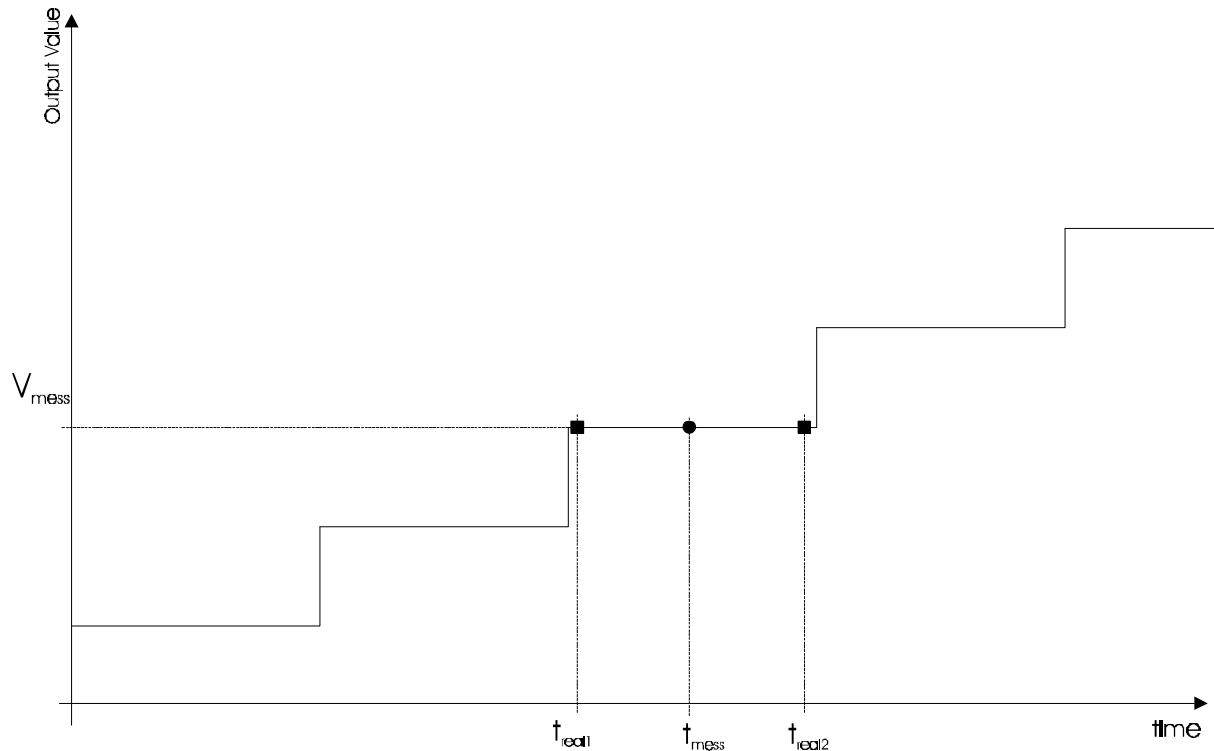
Bitte beachten: Relevant ist nur die aktive Zeit des eigentlichen Meßkerns. Bei größeren Meßzeiten sollte man den erweiterten Meßbereich mit Vorteiler wählen, da hier die aktive Zeit des Meßkerns von der Periodendauer des Volteileraktaktes abhängt, und nicht von der Meßdauer. Beim erweiterten Meßbereich ist der Meßkern am Stück höchstens zwei Taktperioden lang aktiv. Bei 5MHz sind das also maximal 400ns und damit also weit unter 5µs.

Desweiteren haben Rauscheffekte immer sehr guten statistischen Charakter, sie sind eben rein zufällig, verteilen sich gleichmäßig und sind damit mathematisch gut handhabbar.

2.1.2 Quantisierungsfehler

Quantisierungsfehler zählen ebenfalls zu den stochastischen Fehlerquellen, wobei man hier schon deutlich Vorsichtiger bei der Betrachtungsweise vorgehen muß, da sie durchaus zu sehr systematischen Effekten führen können.

Abbildung 6: Systematische Auswirkung von Quantisierungsfehlern



Quantisierungsfehler können unter bestimmten Meßbedingungen durchaus systematischen Charakter haben, und damit durch statistische Methoden wie z.B. Mittelung nicht mehr reduzierbar sein.

Mit Bild 6 soll ein solcher Fall aufgezeigt werden

Wir gehen von einer absolut idealen quantisierten Meßgeraden aus, von der in Bild 6 ein Teil dargestellt ist. Sowohl t_{real1} als auch t_{real2} führen zum gleichen Meßwert V_{mess} der nach der Berechnungsvorschrift auf t_{mess} zurückgerechnet wird. Obwohl die beiden Zeiten fast 1 LSB auseinander liegen führen sie zum gleichen Meßwert. Die Abweichung vom gemessenen zum wirklichen Wert kann in bis zu $\frac{1}{2}$ LSB betragen. Dies ist ein systematischer Effekt d.h. hat man immer die Zeit t_{real1} wird man immer $\frac{1}{2}$ LSB zu hoch messen bzw. bei t_{real2} immer $\frac{1}{2}$ LSB zu tief.

Anmerkung: Der gerade beschriebene Effekt wird leider öfters als Offsetfehler des Bausteines angesehen, was er natürlich nicht ist.

Beispiel: Es wird eine konstante Zeitdifferenz mit Softwarekalibration vermessen. Bei Temperaturänderungen wandern die LSBs, deren Breite sich mit der Temperatur verändert, langsam über die konstante Zeitdifferenz hinweg. Das gleiche passiert mit den Kalibrierwerten. Durch Addition aller Quantisierungsfehler kann die dadurch verursachte Ergebnisschwankung bis zu 4 LSBs betragen und erscheint bei erstem Hinsehen als riesige Offsetschwankung über der Temperatur.

Kann dieser Fehler nicht akzeptiert werden, gibt es mehrere Möglichkeiten des Gegensteuerns. Es kann im Resolution Adjust Modus gearbeitet werden. Auch der erweiterte Meßbereich mit Vorteiler reduziert diesen Effekt drastisch, wenn der Vorteilertakt asynchron zum Start und Stop ist.

Wie wir in einem späteren Unterabschnitt sehen werden, ist es durch Mittelung von Meßergebnissen durchaus möglich, Messungen mit einer Genauigkeit deutlich unter 1 LSB durchzuführen. Systematische Effekte lassen sich jedoch durch Mittelung nicht beseitigen. Dieser hier beschriebene Effekt ist systematisch und kann ohne schaltungs- und systemtechnisches Gegensteuern eine Genauigkeitssteigerung durch Mittelwertbildung vereiteln.

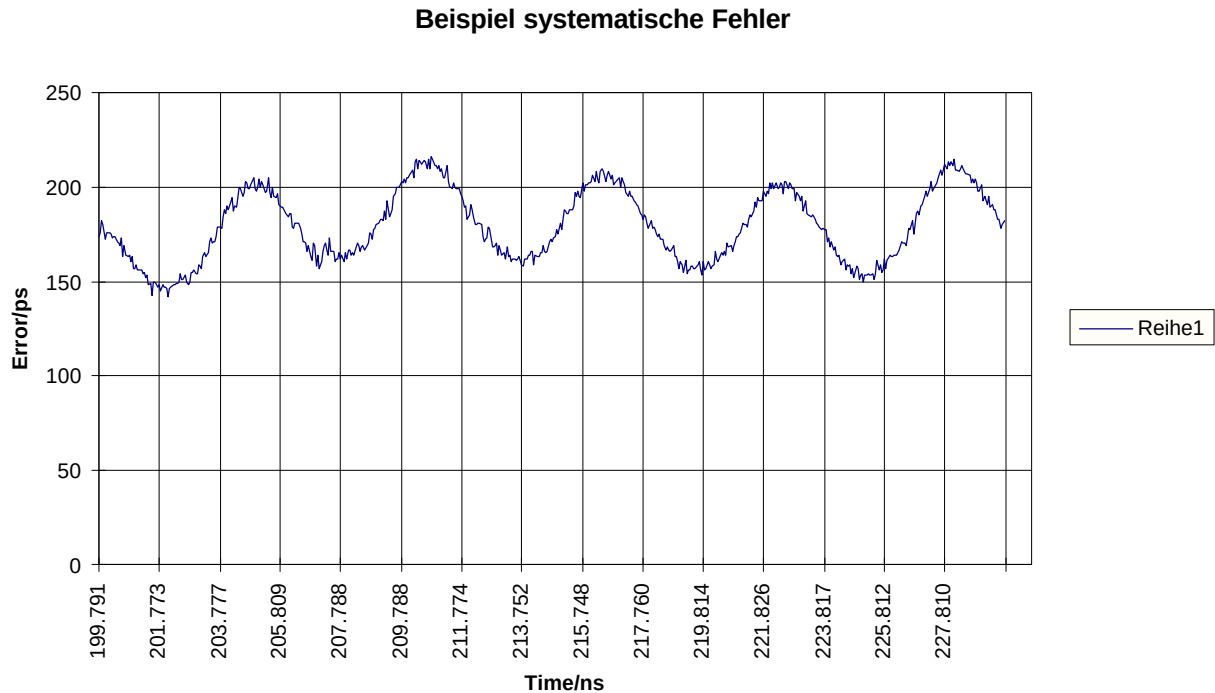
Betrachtet man die Quantisierungsfehler über die gesamte Kennlinie also alle meßbaren Zeitdifferenzen gleich verteilt ergibt sich bei einer idealen Quantisierungskennlinie eine durch Quantisierungsfehler verursachte **Standardabweichung von $1/\sqrt{12} = 0,29$ LSBs**.

2.2 Systematische Fehler

Unter systematischen Fehlern versteht man Fehler des Meßkreises, die bei gleicher Zeitdifferenz immer gleichen Betrag und gleiche Richtung haben. Die Ursache solcher Fehler sind vielfältig und reichen von schlechter Versorgungsspannung, die bei gleicher Zeitdifferenz eben auch immer auf den gleichen Wert absinkt, bis hin zu komplexen Zusammenhängen gegenseitiger Wechselwirkungen bei der Messung, die sich in der Summe zu einem systematisch falschem Meßwert addieren.

Bild 7 zeigt ein solches Bild des systematischen Meßfehlers eines TDCs.

Abbildung 7



Der speziell hier dargestellte TDC hat eine Auflösung von ca. 70 ps. Durch Mittelung über jeweils 1000 Meßwerte wurde das Rauschen der Kennlinie stark unterdrückt, so daß der systematische Meßfehler in der Größenordnung von etwa 1 LSB klar hervortritt. Eine weitere Steigerung der Mittelungsrate würden diesen Fehler nur noch rauschfreier herausheben, nicht verringern.

Man beachte bitte: Würde man die Standardabweichung einer einzelnen Zeitdifferenz über obige Meßkurve der gemittelten Werte bilden, hätte man einen Wert von ca. 3-4 ps was ja nicht anderes heißt, als daß die mittlere Abweichung der Meßwerte untereinander diesem Wert entspricht. Man hüte sich jedoch strikt davor, die Annahme zu machen, daß dies auch gleichzeitig die Genauigkeit sei. Frei nach dem Motto 'Immer daneben ist auch daneben' sollte man hier eine gewisse Vorsicht bei der Interpretation von Ergebnissen walten lassen.

Da es meßtechnisch sehr einfach ist, die Standardabweichung eines Ergebnisses zu bilden, es aber im Gegensatz dazu sehr viel mehr Aufwand erfordert, die wirkliche Genauigkeit zu ermitteln, ist man leicht versucht sich selbst zu belügen.

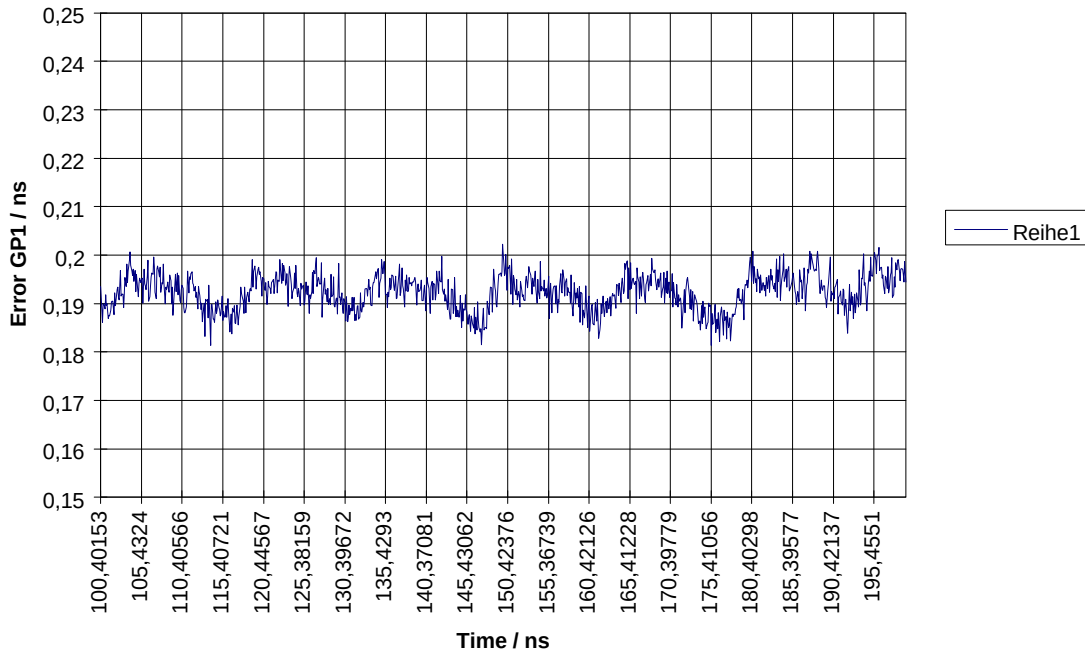
Kennt man halbwegs genau den Betrag und Richtung eines systematischen Fehlers, ist es möglich, ihn zumindest teilweise durch eine nachfolgende rechnerische Korrektur des Meßwertes, zu verbessern. In obigem Fall war der Fehler streng an die Nachkommastelle des Ergebnisses gebunden, so daß z.B eine Tabellenkorrektur sicher Erfolg gebracht hätte.

Bei der Darstellung systematischer Fehler ist der Hersteller solcher Bausteine gefordert, dem Anwender seriöse und aussagekräftige Werte und Diagramme zur Beurteilung an die Hand zu geben. Die Erstellung solcher Fehlerkurven ist zeitaufwendig und die notwendige Ausrüstung nicht ganz billig.

Gute TDCs erreichen heute einen systematischen Fehler von deutlich unter 10 ps.

Abbildung 8: Systematischer Fehler des TDC-GP1

Genauigkeit TDC-GP1, AV 10.000 Dat.: 10.5.97



Zum Beweis zeigt Bild 8 den systematischen Fehler des TDC-GP1 man erkennt, daß systematische Effekte deutlich unter 10 ps liegen. Dazu ist noch zu sagen, daß diese noch erkennbaren systematischen Fehler zum allergrößten Teil auf das verwendete Referenzgerät zurückzuführen sind.

2.3 Offsetfehler

Die Offsetfehler sind eine Untergruppe der systematischen Fehler. Während die oben diskutierten systematischen Fehler eine Funktion der gemessenen Zeitdifferenz darstellen, ist ein Offsetfehler ein konstanter Fehlerwert, der zum Meßwert addiert/subtrahiert wird. Der Wert entspricht dem ausgegeben Meßwert bei einer Zeitdifferenz von exakt 0 sec (Bild 5, Seite 9). Offsetfehler entstehen durch unvermeidbaren Fehlableich verschiedener Pfade im Chip und durch Systematiken des Meßablaufes.

Letztendlich sind konstante Offsetfehler in aller Regel nicht besonders schädlich für das Ergebnis, es ist in den meisten Fällen sowieso ein Offsetabgleich des gesamten Meßpfades durchzuführen, da die Offsetfehler der restlichen Schaltung oft deutlich größer sind als die Offsetfehler des TDCs. Bei diesem Offsetabgleich über den gesamten Meßpfad werden dann die restlichen Offsetfehler des TDCs mit herauskalibriert.

Dennoch ist es natürlich sinnvoll diesen Fehler und vor allem auch seine Temperaturabhängigkeit zu minimieren.

Der Offsetfehler der TDCs und vor allem dessen Temperaturabhängigkeit sollten deutlich unter dem der restlichen Meßschaltung liegen um nicht zusätzlichen Abgleichaufwand zu erzeugen. Gute TDCs erreichen absolute Offsetfehler kleiner 1 LSB und die Temperaturabhängigkeit dieses Fehlers liegt bei 0.05 LSB -0.5 LSBs je nach Meßbereich und Verfahren über den gesamten Temperaturbereich (vgl. Manual TDC-GP1).

2.4 Mittelwertbildung

Reicht die Auflösung eines TDCs nicht aus, kann durch das Zusammenfassen mehrerer Messungen und Bildung des Mittelwertes das Meßergebnis deutlich verbessert werden. Dies setzt natürlich voraus, daß die Meßaufgabe ein Zusammenfassen mehrerer Einzelmessungen erlaubt, was jedoch

häufig der Fall ist. Mittelwertbildung wird gemeinhin in der Meßtechnik wesentlich häufiger praktiziert, als man sich dessen auf Anhieb bewußt ist.

Ein schönes Beispiel sind Frequenzzähler. Hier wird durch Mittelung über viele (oft Millionen) zu messende Perioden (=konstante Zeitdifferenzen) die Periodendauer (mittlere Dauer einer Zeitdifferenz) auf wenige Picosekunden genau bestimmt, ohne daß das Meßgerät in der Lage wäre, dies bei einer einzelnen Periode auch nur näherungsweise so genau zu tun.

Da TDCs letztendlich auch nichts anderes als Zähler sind, die quasi mit etlichen Gigaherz arbeiten, kann man diese Methode hier natürlich auch Anwenden.

Bitte beachten: Durch Mittelwertbildung kann man nur Rauscheffekte (Quantisierungsrauschen, thermisches Rauschen) reduzieren. Systematische Fehler können nicht reduziert werden, diese Fehler werden durch Mittelwertbildung nur von den Rauscheffekten befreit und klar sichtbar. Ein schönes Beispiel findet man in 2.2 Bild 7 (Seite 17). Wo durch hohe Mittelungsraten das Quantisierungsrauschen auf ca. 2-3 ps reduziert sind, um die systematischen Effekte klar erkennen zu können.

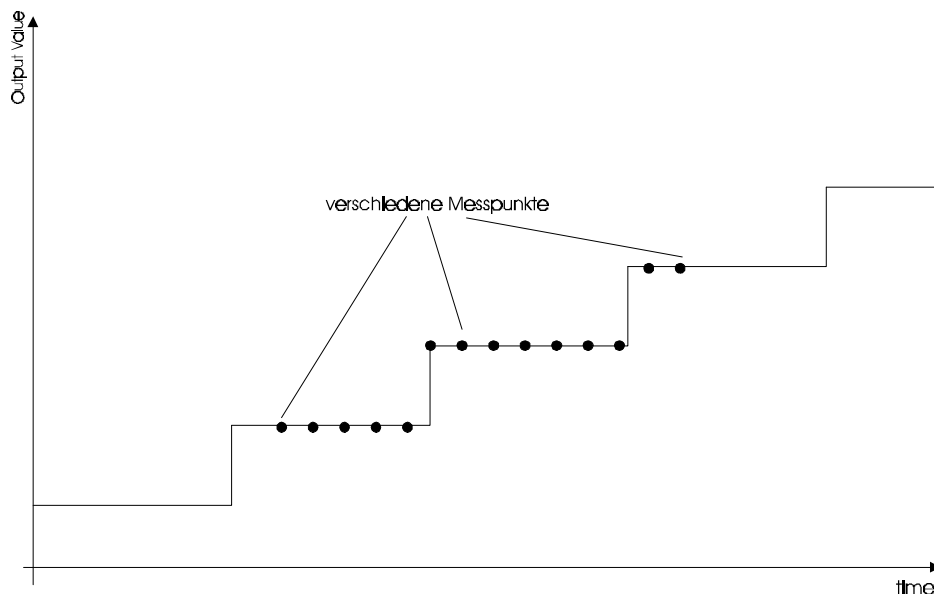
2.4.1 Statistische Voraussetzungen einer guten Mittelwertbildung

Mittelwertbildung kann man immer betreiben, wenn es die Meßaufgabe erlaubt. Will man jedoch die Genauigkeit des Ergebnisses tatsächlich wesentlich verbessern, gilt es einige Randbedingungen zu beachten, damit das Ganze nicht in die Hose geht.

Wichtig ist, daß man nicht mit den systematischen Effekten von Quantisierungsfehlern (siehe 2.1.2) kollidiert. Trifft jede Messung immer auf das gleiche LSB der Meßkennlinie ist jede Mittelwertbildung ergebnislos.

Bei Mittelwertbildung muß entweder die zu messende Zeitdifferenz rauschen oder die Meßkennlinie muß Rauschen, damit sich die zu mittelnden Zeitdifferenzen über viele Stufen der Quantisierungskennlinie verteilen. Das Optimale wäre eine Gleichverteilung der verschiedenen Einzelergebnisse über eine Anzahl von LSBs. Wie es in Bild 9 schematisch skizziert ist.

Abbildung 9



2.4.2 Genauigkeitserhöhung durch Mittelwertbildung

Sind die eben beschriebenen Voraussetzungen erfüllt, kann man die Standardabweichung eines Meßergebnisses mit der Wurzel der Mittelungsrates reduzieren.

Beispiel: Ein TDC hat eine Standardabweichung des Meßergebnisses von 200 ps. Wird der Mittelwert über jeweils 100 Einzelmessungen genommen, so hat dieser Mittelwert noch eine Standardabweichung von 20 ps. Durch die Mittelungsrates von 100 wurde die Standardabweichung der Einzelmessung mit dem Faktor $\sqrt{100} = 10$ reduziert.

Man kann also durch Mittelung die Standardabweichung und (bei geringen systematischen Fehlern) auch die Meßgenauigkeit erheblich verbessern. Theoretisch ist es möglich, mit beliebig hohen Mittelungsraten das Ergebnis beliebig genau bestimmen. Praktisch stellen die systematischen Fehler die Grenzen der Genauigkeit dar. Wo dieser Punkt liegt ist je nach verwendetem TDC Typ sehr unterschiedlich.

Beispiel: Im Resolution Adjust Mode des TDC-GP1 liegen die systematischen Fehler bei $\ll 10$ ps (wahrscheinlich < 2 ps), so daß bis an diese Grenze sicher gegangen werden kann. Durch entsprechend hohe Mittelungsraten kann man die Standardabweichung des TDC-GP1 ohne Probleme bis in den Femtosekunden (10^{-15} s) Bereich verbessern, da das Meßprinzip die notwendigen statistischen Eigenschaften (fast) perfekt selbst generiert. Die Grenze einer stabilen Standardabweichung liegt bei diesem Baustein etwa bei 150 fs (Femtosekunden) !!!!. Diesen Wert bitte jedoch nicht mit erreichbarer Genauigkeit verwechseln. Diese dürfte ungefähr bei 1ps -2 ps liegen.

3. Anwendungen

3.1 Rückführen physikalischer Größen auf Zeitdifferenzen

TDCs sind sehr universelle Produkte, weshalb sich auch das Spektrum der Anwendungen in einem weiten Rahmen erstreckt. Ein TDC kann überall dort eingesetzt werden, wo eine physikalische Größe auf eine Zeitdifferenz zurückgeführt wurde, und das ist weit häufiger der Fall, als man auf Anhieb denken mag.

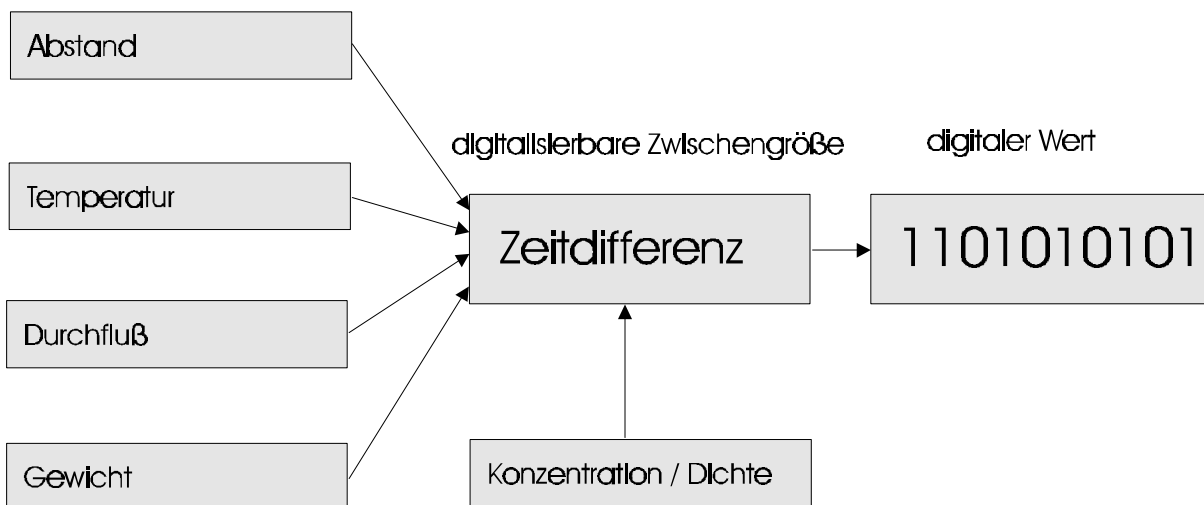
Einige Beispiele in denen dies praktiziert wird sind:

- das Zurückführen des Abstandes zwischen 2 oder mehr Punkten auf eine Zeitdifferenz durch Vermessen der Laufzeit einer Welle (Licht, Microwelle, Schall)
- das Zurückführen der Durchflußmenge eines Gases oder Flüssigkeit auf eine Zeitdifferenz durch Messen der Ultraschallaufzeit und Berücksichtigung des Dopplereffektes
- das Zurückführen einer Temperatur auf eine Zeitdifferenz durch Ausmessen der Zeitkonstanten eines RC-Gliedes mit einem temperaturabhängigen Widerstandes.
- das Zurückführen eines Gewichtes auf eine Zeitdifferenz durch Ausmessen der Zeitkonstanten eines RC-Gliedes mit einer Kapazität die sich gewichtsabhängig verändert.

Wie in der Meßtechnik auch sonst üblich geschieht die Digitalisierung physikalischer Größen über eine Zwischengröße die im Falle von TDCs die Zeit ist. Bild 10 zeigt diesen Zusammenhang noch einmal grafisch

Abbildung 10

physikalische Ursprungsgröße



Doch nun zu einigen konkreten Beispielen wo und wie TDC Technologie eingesetzt wird.

3.2 Physikalische Grundlagenforschung

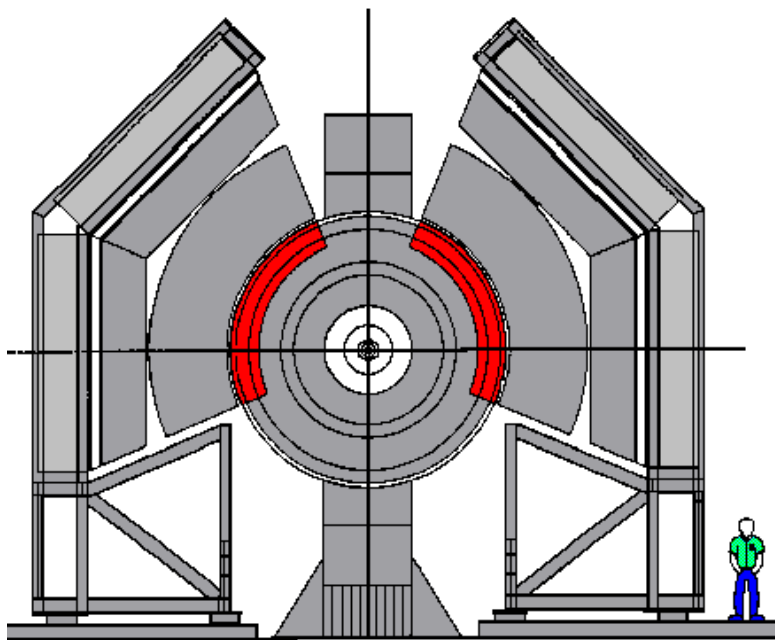
Warum gibt es heute in unserer bekannten Welt nur Materie und keine Antimaterie ? Was geschah 10^{-30} sec. nach dem Urknall ? Welche Kräfte halten die Welt zusammen ?

Solchen und ähnlichen Fragen, die den physikalischen Laien maximal faszinieren aber ansonsten eher gelassen zuschauen lassen, gehen Experimentalphysiker in teilweise sehr großen Experimenten nach. Bei praktisch allen sich aus solchen Fragestellungen ergebenden Experimenten müssen auch Zeitdifferenzen hochgenau gemessen werden, um z.B. die Flugbahn eines Teilchens rekonstruieren zu können. Und da diese Art von Experimenten schon seit Jahrzehnten durchgeführt werden und man auch schon immer dabei die Zeit sehr genau vermessen mußte, wurden und werden hier TDCs oft in sehr großer Zahl eingesetzt. Hier ist, so kann man wohl sagen, der Ursprung hochgenauer Zeitdifferenzmessung, hier wurden wohl die ersten TDCs eingesetzt. Am Beispiel von Driftkammern soll der Einsatz von TDCs dargestellt werden

Um Materie in solche extremen Zustände zu versetzen, damit sie Antwort auf obige Fragen geben kann, muß man sie auf extrem hohe Energien d.h. auf hohe Geschwindigkeit, sehr nahe der

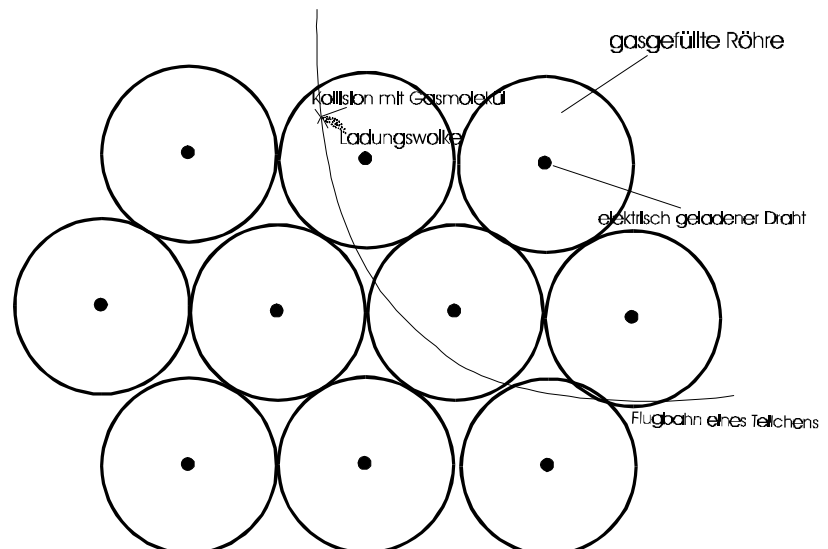
Lichtgeschwindigkeit beschleunigen. Man verwendet dazu heute große Ringbeschleuniger wo in 2 kreisförmigen Röhren die Teilchen beschleunigt werden. In einem Rohr mit dem Uhrzeigersinn im anderen gegen den Uhrzeigersinn. Bei jedem Durchlauf durch die Röhren gewinnen die Teilchen mehr Energie. Bei den größten Beschleunigern erreicht man dabei Energien die dem Durchlaufen eines elektrischen Feldes mit mehreren Billionen Volt entspricht. Haben die Teilchen ihre Endenergie erreicht, bringt man die beiden gegenläufigen Teilchenstrahlen in Reaktionskammern zur Kollision. Wie im wirklichen Leben auch fliegen dabei die Fetzen und alles, was der dabei freiwerdenden Energie nicht widerstehen kann, fliegt auseinander. Die entstehenden Bruchstücke werden in Detektoren, die durchaus die Größe eines mehrstöckigen Hauses erreichen können, nachgewiesen. Eine dieser Detektorarten ist die Driftkammer. Zusammen mit Driftkammern werden u.a. TDCs benötigt um die Flugbahn und Geschwindigkeit der Bruchstücke rekonstruieren zu können. Bild 11 gibt einen Eindruck über das Aussehen eines solchen Detektors.

Abbildung 11



Der Kollisionspunkt ist im Zentrum des Fadenkreuzes. Die Detektoren sind kreisförmig um den Kollisionspunkt angeordnet. Diese bestehen aus gasgefüllten Röhren in denen ein Draht gespannt ist, der unter einer elektrischen Spannung steht. Trifft nun eines der Reaktionsteilchen auf ein Gasmolekül in einer dieser Röhren, löst es eine Ladungswolke aus, die wegen des elektrischen Feldes auf den Draht driftet (deswegen Driftkammer). Wenn die Ladungswolke den Draht erreicht, wird dort ein elektrischer Puls ausgelöst. Die Zeit von der Kollision der Teilchen bis zum Auftreffen der Ladungswolke am Draht wird mit TDCs gemessen. Bild 12 auf der folgenden Seite zeigt den prinzipiellen Ablauf eines solchen Vorganges.

Abbildung 12: Querschnitt durch eine Driftkammer

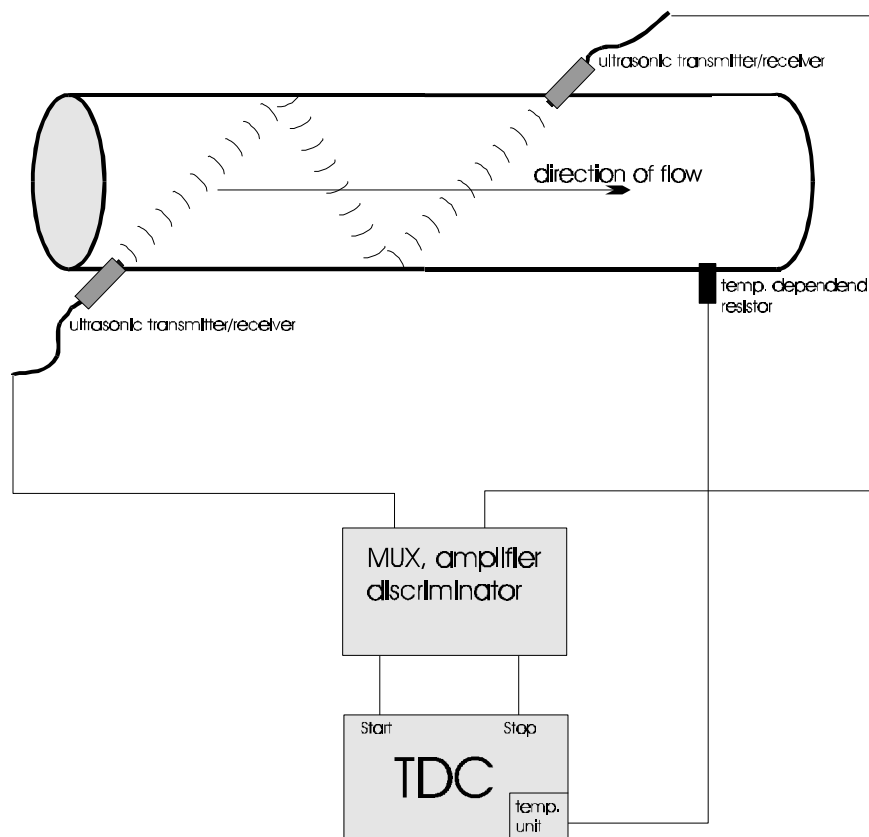


Da bei größeren Experimenten bis zu mehreren hunderttausend solcher gasgefüllter Röhren verwendet werden, sind zuverlässige, genaue, stromsparende und preisgünstige TDCs stets von großem Interesse. Die benötigten Auflösungen liegen bei ca. 500 ps - 1 ns und können von heutigen, mehrkanaligen single Chip TDCs problemlos erreicht werden.

3.3 Ultraschall Durchflußmessung

Technische Lösungen ohne mechanisch bewegte Teile sind ein Garant für hohe Zuverlässigkeit, geringen Wartungsbedarf und lange Lebensdauer. Aufbauend auf dieser Erkenntnis haben sich im Bereich der Durchflußmeßtechnik von Flüssigkeiten und Gasen Meßverfahren etabliert, die dies umsetzen. Eines dieser Verfahren ist die Messung der Durchflußmenge mittels Ultraschall. Bild 13 verdeutlicht den prinzipiellen Ablauf einer solchen Messung.

Abbildung 13



Ein Ultraschallimpuls wird in Flußrichtung des Mediums und ein Zweiter gegen die Flußrichtung geschickt. Die Flugzeit des Ultraschallimpulses zwischen Empfänger und Sender wird gemessen. Als Ultraschall Sender und Empfänger werden in der Regel Piezos verwendet, die sich hervorragend für beide Funktionen verwenden lassen. Durch den Doppler Effekt ergibt sich je nach Fließgeschwindigkeit des Mediums eine Zeitdifferenz zwischen beiden Messungen, die ein Maß für den Durchfluß ist. Hier werden TDCs für die Flugzeitmessung des Ultraschallimpulses eingesetzt. Charakteristisch für diese Applikation ist, daß es sich oft um recht große Zeitdifferenzen von ca. 20 μ s - 1 ms handelt, in denen der Ultraschallimpuls unterwegs ist. Die Flugzeitunterschiede durch den Dopplereffekt betragen mitunter nur wenige Nanosekunden. Diese geringe Zeitdifferenz bei gleichzeitig hoher Meßzeit muß nun noch auf 1-2 % genau aufgelöst werden. Es ergeben hier teilweise Anforderungen an die Auflösungen von 100 ps und weniger. Zum Erreichen dieser Auflösung kann in der Regel auf Mittelung zurückgegriffen werden. Damit kann die Grundauflösung der TDCs bei Einzelmessung durchaus höher liegen, jedoch die systematischen Fehler dürfen natürlich diesen Wert nicht überschreiten, sonst kann es im Laufe der Zeit zu tückischen Fehleradditionen kommen.

Der notwendige Dynamikbereich der Messungen beträgt 22-24 Bit. Diese hohe Dynamik, die so manchen AD Wandler ins Schwitzen kommen ließe, ist für einen TDC 'Alltagsgeschäft' und wird ohne größere Probleme gemeistert. Hier wird durchweg mit dem Meßverfahren mit Vorteiler gearbeitet, welches bei voller Beibehaltung der Auflösung erlaubt, große Zeitdifferenzen zu messen. Es gibt keine verfahrensbedingte Beschränkung des Dynamikbereiches. Wenn man dann noch, wie im Falle der Durchflußmessung gegeben, "nur" auf die relative Abweichung zweier Messungen angewiesen ist, kann man handelsübliche Quarzoszillatoren als Vorteilertakt verwenden, da sich die Frequenzablage des Oszillators bei der Differenzbildung heraushebt.

Beispiel absolute Genauigkeit:

Wollte man die absolute Zeit mit einer Genauigkeit vermessen, die besser ist als die Auflösung, müßte man bei ca. 20 Bit auf ein Frequenznormal als Vorteilertakt ausweichen, dann wären Messungen mit einer absoluten Genauigkeit von bis zu 30 Bit möglich. Ein schönes Beispiel mit welcher hoher Präzision man in der Lage ist die Zeit zu vermessen: Gäbe es einen AD-Wandler, der einen ähnlichen Dynamikbereich und die gleiche Genauigkeit besäße, so müßte er bei 5V Meßbereich Spannungen mit 5nV !!! Genauigkeit messen können. Einen solchen AD-Wandler gibt es nicht. Moderne TDCs sind jedoch tatsächlich in der Lage, so genau zu messen.

Auch die realisierbare geringe Stromaufnahme spielt in der Durchflußmeßtechnik oft eine große Rolle. Viele der Geräte sind batteriebetrieben, jahrelanger fehlerfreier Betrieb ohne Batteriewechsel ist unabdingbar, und mit CMOS TDCs realisiert.

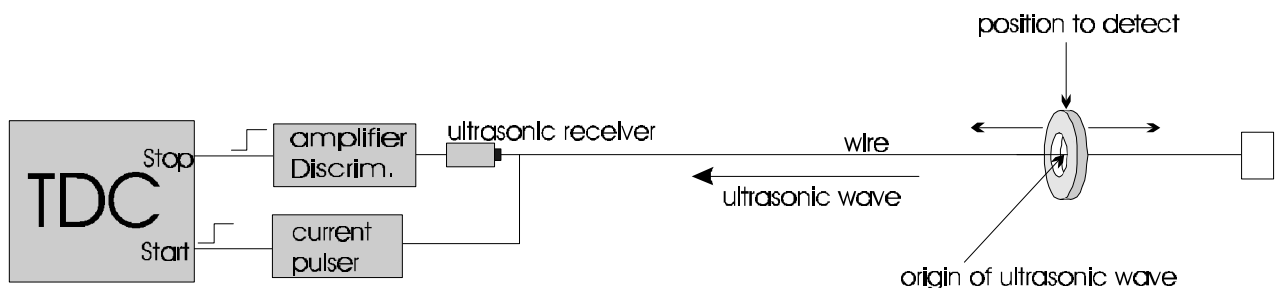
Die Schallgeschwindigkeit im zu messenden Medium ist temperaturabhängig. Eine regelmäßige Messung der Temperatur ist deshalb unerlässlich. Da sich auch eine Temperturmessung gut auf eine Zeitdifferenzmessung zurückführen läßt, bietet es sich an, die Temperaturmessung mit dem TDC zu erledigen, und diese Fliege mit der gleichen Klappe zu schlagen. Der TDC-GP1 bietet mit seinen RLC Ports dazu die Möglichkeit. Die dazu notwendige äußere Beschaltung (vgl. Manual TDC-GP1) ist einfach und preisgünstig. Genauigkeiten bis ca. 0.1 °C lassen sich mit der dort angegebenen Schaltung erreichen. Ist eine noch höhere Meßgenauigkeit notwendig, kann auch dies durch Verwendung von externen MOS-FETs mit geringem R_{DS-ON} (anstelle externer Bipolar Transistoren) erreicht werden. Die Zeitdifferenzmessung ist hier nicht der limitierende Faktor, sondern externe parasitäre Effekte wie z.B. eine temperaturabhängige $U_{CE-REST}$.

3.4 Magnetostriktive Positionierung

Die berührungslose und damit verschleißarme Erfassung von Positionen, Fahrbewegungen etc. ist in der Prozessautomation eine vielfach benötigte Methode, um Rückmeldungen über den Ist-Zustand des Systems zu bekommen. Dabei werden häufig Genauigkeiten im µm Bereich benötigt. Die Systeme müssen robust, wartungsarm und (natürlich) preisgünstig sein. Seit Jahren hat sich hier bereits eine Methode etabliert, welche die Ultraschallaufzeit auf einem Draht benützt um die Position festzustellen.

Folgendes Bild zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solches Positioniersystems

Abbildung 14



Auf der gesamten Länge der Positioniereinrichtung ist ein Draht gespannt. An der zu bestimmenden Position befindet sich ein starker Dauermagnet.

Über den Draht wird nun in regelmäßigen Abständen (z.B. 1k/sec.) ein Strompuls von einigen Ampere und einigen Microsekunden Dauer geschickt. Durch den hohen Strompuls entsteht um den Draht herum ein sich schnell änderndes Magnetfeld. An der Stelle an der sich das Magnetfeld des Dauermagneten befindet, entsteht nach den magnetischen Gesetzmäßigkeiten eine Kraft, die den Draht verwindet und dabei eine Ultraschallwelle auslöst, die sich mit der Schallgeschwindigkeit auf dem Draht (ca. 2.700 m/sec.) nach beiden Seiten ausbreitet. An der 'toten' Seite wird dieser Ultraschallimpuls absorbiert und an der 'aktiven' Seite wird dieser Impuls von einem

Ultraschallempfänger detektiert und in einen digitalen Empfangsimpuls umgewandelt. Die Zeit zwischen dem Start des Strompulses und dem Eintreffen der Empfangsimpulse wird mit einem TDC vermessen und damit die Lage des Dauermagneten bestimmt. Bewegt sich nun der Dauermagnet zusammen mit dem zu positionierenden Teil (z.B. dem Schlitten einer Fräsmaschine), können damit Werkzeuge o.ä. präzise positioniert werden.

Mit diesem Verfahren lassen sich z.Zt. Positioniergenauigkeiten von 2-5 μm erreichen, was einer Ultraschallaufzeit von 800 ps - 2 ns entspricht, also genau die richtige Kragenweite für einen TDC. Mit der hohen Auflösung, die noch einmal ein Stück oberhalb des Geforderten liegt, haben TDCs gerade in diesem Anwendungsfall das Thema Zeitdifferenzmessung von der Problemliste gestrichen. Daß die Bausteine gleichzeitig sehr klein sind, und im Vergleich zu früheren Lösungen bei 10-facher Genauigkeit weniger als 1/10 des Stromes benötigen, sind weitere Pluspunkte, die zu einer raschen Verbreitung beitragen.

3.5 Laser Entfernungsmessung

Zur Messung von Abständen und Entfernungen aller Art ist ein Laserstrahl bestens geeignet. Durch seine exakte Fokussierbarkeit, die Unabhängigkeit seiner Ausbreitungsgeschwindigkeit von Umwelteinflüssen und etlichen weiteren Vorteilen bietet er sich als modernes Metermaß auch für größere Entfernungen an. Vor allem bei der Verwendung von kurzen Laserpulsen hat man die Möglichkeit mit hohen Leistungen (etliche Watt) zu fahren, ohne dabei die Sicherheit von Menschen zu gefährden. Es ergibt sich ein weites Einsatzspektrum von Scannern für Oberflächen oder Schutzfeldbeobachtung, bis zur Entfernungsbestimmung für Distanzen von einigen Metern bis zu einigen Kilometern.

Der Einsatz von TDCs bietet sich dabei natürlich für die klassische Methode der Flugzeitmessung des Laserimpulses an. Aber auch andere Methoden der Entfernungsbestimmung mit Laser, wie z.B. das Ausmessen der Phase eines aufmodulierten Signals kann mit einem TDC schnell, mit geringer Stromaufnahme und preisgünstig durchgeführt werden.

Licht oder allgemeiner gesagt elektromagnetische Strahlung ist, wie wir alle wissen (und bis zum Beweis des Gegenteils), das Schnellste was die Natur zu bieten hat. Jede Art von Informations- oder Energietransport kann maximal mit Lichtgeschwindigkeit stattfinden.

Messungen der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ergaben einen Wert von: 299.792,458 km/sec.

Will man bei dieser Ausbreitungsgeschwindigkeit Entfernungen mit einem Laufzeitverfahren genau messen, kommt man sehr schnell auf sehr kleine Zeiten. Möchte man mit dieser Methode auf die Genauigkeit eines normalen Meterstabes kommen, die mit 1 mm festgelegt werden kann, dann entspricht dies einer Lichtlaufzeit von 3 ps. Mißt man die Entfernung im Reflexionsverfahren, wird diese Zeit wegen des doppelten Weges auf 6 ps erhöht. Diese Zeitdifferenz liegt unter dem, was mit digitalen Laufzeit TDCs unter Zugrundelegung momentan 'vernünftig' verfügbarer Halbleiterprozesse an Auflösung (ohne Mittelung) möglich ist. Damit wartet bei der Laserentfernungsmessung noch eine echte Herausforderung auf TDCs in Bezug auf die Auflösung und Genauigkeit. Glücklicher Weise wird auch hier nicht alles so heiß gegessen wie es gekocht wird, denn:

- oft reichen für typische Laseranwendungen Auflösungen von mehreren Zentimetern aus, und dann sind wir bereits in den gewohnten Bereichen
- oft kann auf Mittelung des Ergebnisses zurückgegriffen werden, und es kann bereits mit vertretbaren Mittelungsraten die gewünschte Genauigkeit erreicht werden.
- auch ist die Zeitdifferenzmessung nicht die einzige Fehlerquelle. Der restliche Signalpfad incl. Meßstrecke bringt es selbst bei guten Bedingungen und guter schaltungstechnischer Auslegung auf 30-50 ps Standardabweichung und liegt damit in etwa der gleichen Größenordnung wie heutige gute TDCs, so daß selbst ein 5 ps TDC kein Durchbruch wäre, sondern nur eine der Fehlerursachen minimieren würde, ohne das Gesamtergebnis dabei drastisch zu verbessern.

Unter Berücksichtigung all dieser Randbedingungen sind TDCs für die Laserentfernungsmessung mittels Pulslaufzeitmessung gut geeignet und werden auch in zunehmenden Maße für diese Aufgabe eingesetzt.

Soweit zu den Applikationsbeispielen. Wir hoffen, sie haben zumindest einen kleinen Einblick in die breit gefächerten Anwendungsmöglichkeiten hochgenauer Zeitdifferenzmeßtechnik erlaubt. Wenden wir uns nun dem nächsten Kapitel zu, dem TDC Wörterbuch.

4. Kleines TDC Wörterbuch

Die Betonung liegt hier bewußt auf klein. Es war nicht das Ziel das TDC-Kochbuch damit um 20 Seiten zu erweitern. Es enthält eine Reihe spezieller Begriffe, die im Zusammenhang mit TDCs häufig verwendet werden und deren Bedeutung sich immer wieder als erklärungsbedürftig herausgestellt hat. Auf die Erklärung allgemein gebräuchlicher Begriffe wie Kalibration, Statusregister, Overflow etc. wird hier verzichtet. Dieser Abschnitt soll als Nachschlagemöglichkeit für Begriffe dienen, auf die viele Benutzer hier vielleicht das erste mal stoßen.

Absolutlaufzeit TDC

Unterfamilie digitaler Laufzeit TDCs bei denen die absolute Laufzeit digitaler Gatter für die Feinquantisierung verwendet wird. Die Auflösung des TDCs entspricht der Laufzeit der verwendeten Gatter.

Auto Kalibration

Kalibrationsmethode bei der automatisch zu einem Meßwert vom TDC Kalibrationswerte erzeugt werden, mit denen der Meßwert normiert werden kann. In aller Regel werden bei der Auto Kalibration die Kalibrierwerte unmittelbar nach einer Messung erzeugt.

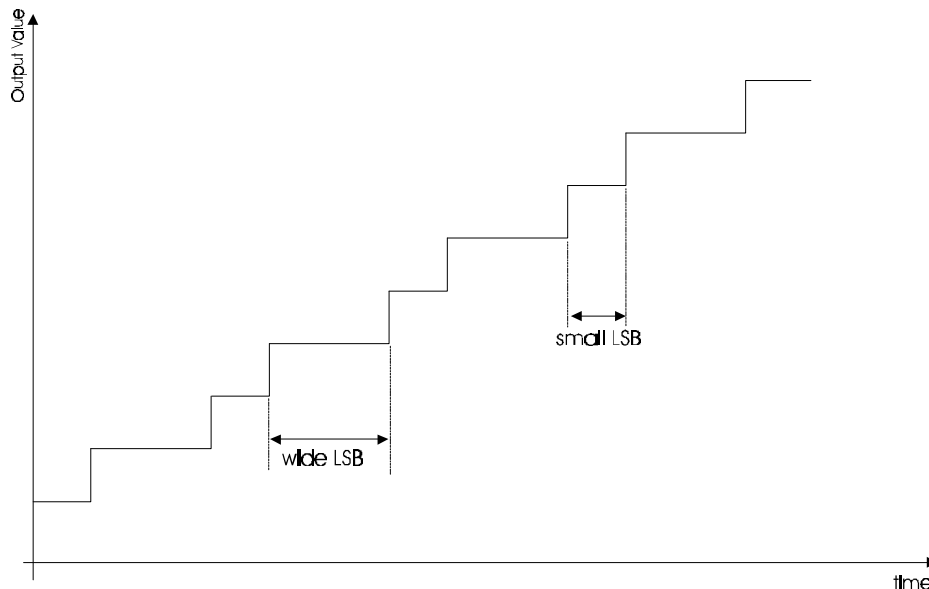
Auto Noise

TDC interner Schaltungsteil in dem pseudozufällig eine zusätzliche Zeitverzögerung zur zu messenden Zeitdifferenz addiert wird. Die gleiche Zeitdifferenz wird bei zur Messung gehörenden Kalibration ebenfalls dazu addiert. Fällt somit bei der Berechnung wieder heraus, bewirkt aber, daß bei gleicher Zeitdifferenz an verschiedenen Stellen der Kennlinie gemessen wird. Nützlich bei Mittelwertbildung (vgl. TDC-GP1 Manual Abschnitt 2.3.2e).

Differentielle Nichtlinearität (DNL)

Unterschied in der Breite der LSBs einer Meßkennlinie. Bedingt durch die speziellen Charakteristika der Wandlungsverfahren sind LSBs nie bis auf die Picosekunde exakt gleich breit, sondern haben, meist systematisch, unterschiedliche Breiten. Die DNL wird absolut in Picosekunden oder relativ als prozentuale Abweichung jeweils vom schmalsten zum breitesten LSB angegeben. Das Bild 15 zeigt eine Kennlinie mit hoher DNL.

Abbildung 15



Digitale Laufzeit TDCs

Unterfamilie von TDCs, die Laufzeiten digitaler Gatter zur Bestimmung der Zeitdifferenz benutzt.

Doppelpulsauflösung

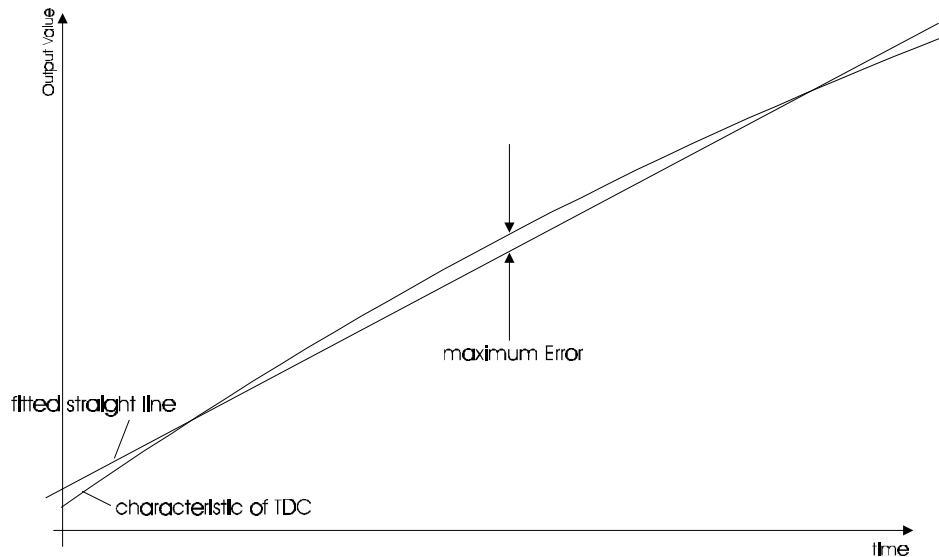
Kenngroße bei Multihit TDCs. Können auf einem Stop Eingang bei einer Messung mehr als 1 Stop Impuls vermessen werden, so müssen die Pulse untereinander einen minimalen Abstand haben,

damit sie als 2 Pulse registriert werden. Den minimalen Abstand (Abstand der aktiven Flanken) den 2 Meßereignisse auf einem Stop Eingang haben müssen wird Doppelpulsauflösung genannt (vgl. Manual TDC-GP1 2.3.1)

Integrale Nichtlinearität

Maximale Abweichung der Quantisierungskennlinie über den gesamten Meßbereich von einer idealen Geraden. Durch die Meßkennlinie wird eine Gerade mit minimalem Fehler gelegt. Die maximale Abweichung der Meßkennlinie zur Geraden bezeichnet man als integrale Nichtlinearität. Sie wird meist in LSBs angegeben. Bild 16 auf der folgenden Seite zeigt den Zusammenhang grafisch.

Abbildung 16



Multihitfähigkeit

Die Möglichkeit eines TDCs auf einem Stop Eingang innerhalb einer Messung mehr als eine Zeitdifferenz zu vermessen. Der TDC-GP1 ist ein Multihit TDC, da er auf jedem Stop Eingang bis zu 4 Zeitdifferenzen (Hits) vermessen kann.

Relativlaufzeit TDC

Untergruppe digitaler Laufzeit TDCs. Es wird die relative Zeitdifferenz zwischen zwei digitalen Gattern mit geringfügig unterschiedlicher Laufzeit zur Zeitdifferenzmessung benutzt. Damit kann man bei Relativlaufzeit TDCs Auflösungen weit unter der minimalen Laufzeit eines Gatters realisieren.

Resolution Adjust

Bestimmter Betriebsmodus, in dem die Auflösung des TDC per Register eingestellt werden kann. Die Auflösung ist unabhängig von äußeren Einflüssen und entspricht exakt dem im Register gewählten Wert.

Resolution Lock

Bestimmter Betriebsmodus in dem die Auflösung weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen (Temperaturänderungen) stabilisiert ist. Die Auflösung läßt sich nicht genau einstellen, sondern wird lediglich auf einem sich ergebenden Wert stabilisiert. Man erreicht eine Temperaturabhängigkeit auf die Auflösung von ca. 30-50 ppm / °C.

Retriggerfähigkeit

Kommen auf dem Start Eingang mehrere Starts bevor der erste Stop kommt wird bei einem retriggerfähigen TDC mit jedem Start (bis Stops kommen) die Meßeinheit neu gestartet. Es wird die Zeitdifferenz vom letzten Start zu den Stops vermessen. (vgl. Manual TDC-GP1 1.14f)

RLC-Meßeinheit

Die Messung von

- Widerständen R
- Induktivitäten L
- Kapazitäten C

kann leicht auf eine Zeitdifferenzmessung zurückgeführt werden. Die RLC-Meßeinheit stellt die dafür notwendigen Schaltungsteile zur Verfügung, damit mit einfachen externen Mitteln eine Messung dieser Grundgrößen der Elektronik möglich ist.

A

Absolutlaufzeit TDC	4; 25
ALU	12
Amplitude to Digital Conversion	4
Analog to Digital Converter	2
Analoge Verfahren	4
Antimaterie	20
Anwendungen von TDCs	19
ASIC	11
Auto Kalibration	25
Auto Noise	25

B

Beispiel absolute Genauigkeit:	23
beliebig hohe Auflösungen	6

D

Datenbus	12
Differentielle Nichtlinearität	6; 26
Digitale Laufzeit TDCs	4; 9; 11; 26
Doppelpulsauflösung	26
Doppler Effekt	23
Driftkammer	20
Durchflußmeßtechnik	22

E

Einmalkosten	11
Erweiterter Meßbereich	7

F

Feinquantisierung	4
-------------------------	---

G

Genauigkeitserhöhung durch Mittelwertbildung	18
Grundlaufzeiten	4
Grundmeßbereich	6; 12

H

Hardwaremaßnahmen zur Einstellung der Auflösung	9
Hochgeschwindigkeitsmeßeinheit	11
hohe digitale Eigenintelligenz	11

I

Integrale Nichtlinearität	9; 26
---------------------------------	-------

K

Kalibrations und Justierungsmethoden	7
Kalibriertakteingang	12; 13
kostengünstig	11
Kundenspezifische Lösungen	11

L

Laser Entfernungsmessung	24
Leckstrom	11
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	25

M

Magnetostriktive Positionierung	24
Matching Effekte	10

Mehrfachauslegung des Meßkreises.....	5
Meßbereiche	6; 28
Meßprinzipien	4
Mittelwertbildung.....	17
Multihitfähigkeit.....	27
N	
Nanoampere.....	11; 13
O	
Offsetfehler.....	17
P	
Phasenregelkreise.....	9
Physikalische Grundlagenforschung	20
PLL	5; 9; 10; 13
Prinzipielle Wirkungsweise analoger TDCs	4
Q	
Quantisierungsfehler	14
R	
Rauscheffekte	14
redundante Schaltungsteile.....	4
relativer Laufzeitunterschied	5
Relativlaufzeit TDC.....	5; 27
Resolution Adjust.....	10; 27
Resolution Lock	9; 27
Retriggerfähigkeit.....	27
Ringbeschleuniger	20
RLC-Meßeinheit	27
Ruhestromaufnahme	13
S	
Softwarekalibration.....	8
Statistische Voraussetzungen einer guten Mittelwertbildung	18
Stochastische Fehler	14
Stromaufnahme	7; 11; 13
Systematische Fehler.....	15
Systematischer Fehler des TDC-GP1	16
T	
TDC Wörterbuch.....	25
TDC-GP1	7; 12
TDC-Meßkreis	12
Temperturmessung	24
Time to Amplitude Conversion.....	4
U	
Ultraschall Durchflußmessung	22
ungeregelte Temperaturabhängigkeit.....	10
Urknall.....	20
V	
Vorteilerverfahren.....	7
W	
Wann benötigt ein TDC Strom	11