

HEINRICH·HERTZ·INSTITUT FÜR SCHWINGUNGSFORSCHUNG
BERLIN·CHARLOTTENBURG

Technischer Bericht Nr. 113

Ein Verfahren zur kontinuierlichen Zählung
von Interferenzstreifen

von

Dipl.-Ing. Dieter Filbert

Berlin

1 9 6 9

Ein Verfahren zur kontinuierlichen Zählung von Interferenzstreifen

Zusammenfassung

In der Abteilung Mechanik wird zur Zeit eine Methode zur Messung mechanischer Schwingungen mit einem Laser-Interferometer entwickelt. Dabei werden die Interferenzstreifen, die von dem abgewandelten Michelson-Interferometer gebildet werden, gezählt. In diesem Bericht wird ein elektronisches Verfahren zur Zählung dieser Interferenzstreifen beschrieben.

Das Verfahren beruht auf einer Vorwärts- Rückwärtszählung von Wegstücken der mechanischen Schwingung. Die im Zähler gespeicherte duale Zahl wird in eine analoge Spannung umgesetzt. Diese Spannung ist dann proportional dem Weg der mechanischen Schwingung.

Nach einer ausführlichen Beschreibung des Verfahrens wird der Aufbau des entwickelten Zählgerätes erklärt. Am Schluß werden die Eigenschaften und die Genauigkeit des Gerätes diskutiert.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Der Bearbeiter

Dietrich Filbert

(Dipl.-Ing. D. Filbert)



Der Abteilungsleiter

P. Matthieu

(Prof.Dr.phil. P. Matthieu)

Der Institutsdirektor

P. Matthieu

(Prof.Dr.phil. P. Matthieu)

Berlin-Charlottenburg, den 9. Februar 1970

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Beschreibung des Zählverfahrens
3. Beschreibung der Funktionseinheiten
 - 3.1 Die Pulsformstufe
 - 3.2 Der Zählrichtungsdiskriminator
 - 3.3 Der Vorwärts- Rückwärtszähler
 - 3.4 Der digitale Multiplexer
 - 3.5 Der Digital-Analog-Umsetzer (DAU)
 - 3.6 Der Anpassungsverstärker
4. Diskussion und Zusammenstellung der Messergebnisse
5. Literaturverzeichnis.

Liste der verwendeten Abkürzungen

λ_L	Wellenlänge des Laserlichts ($\lambda_L = 0.6328 \mu\text{m}$)
U_1, U_2	Eingangsspannungen des Zählrichtungsdiskriminators
dU_1, dU_2	Differenzierte Eingangsspannungen des Zählgerätes
\bar{v}, \bar{r}	Vorwärts- bzw. Rückwärtszählimpulse
t_p	Pulsdauer der Zählimpulse
t_v	Signalverzögerungszeit
$t_1 \dots t_4$	Umschaltzeitpunkte der Eingangsspannungen
$\Delta \ell_0$	Quantisiertes Längenelement
$\Delta \ell$	Verschiebung des Reflektors
t_u	Umsetzzeit des DAU
φ	Phasenwinkel
T_s	Schwingungsdauer
r_z	Zählrate
a	Schwingungsamplitude
f_F	Frequenz der Ausgangsspannung der Fotoverstärker
V	Verstärkungsfaktor
d	Digitalsignal
U_a	Ausgangsspannung des Anpassungsverstärkers
q_1	Kleinste Quantisierungsstufe
$F_{lin.}$	Linearitätsfehler
R_i	Innenwiderstand
v	Geschwindigkeit

1. Einleitung

Im vorliegenden Bericht wird ein Verfahren zur Zählung von bewegten Interferenzstreifen beschrieben. Die Interferenzstreifen entstehen in einem Laser-Interferometer, das zur Messung mechanischer Schwingungen dient.

Das Laser-Interferometer ist eine Abwandlung des bekannten Michelson-Interferometers. Der bewegliche Reflektor des Interferometers ist auf dem Objekt angebracht, dessen mechanische Schwingungen gemessen werden sollen. In Bild 1 ist die Anordnung des Interferometers angegeben. Im Rahmen dieses Berichtes kann auf die näheren Einzelheiten des Interferometers nicht eingegangen werden. Dieses bleibt einer späteren Arbeit vorbehalten. Es soll hier nur festgehalten werden, daß in dem Interferometer die beiden Fotoempfänger F_1 und F_2 eingebaut sind, die die wechselnde Lichtintensität der Interferenzstreifen in elektrische Spannungen umsetzen. Die beiden zugehörigen Streifensysteme sind auf Grund der in den Strahlengang des Interferometers eingebauten $\frac{\lambda}{8}$ -Platte um 90° gegeneinander in der Phase verschoben, so daß auch die Ausgangsspannungen der Fotoempfänger um 90° phasenverschoben sind. Die Ausgangsspannung des ersten Fotoempfängers ist gegenüber dem zweiten um $+90^\circ$ verschoben, wenn sich der bewegte Reflektor auf den Laser zu bewegt und ist um -90° verschoben, wenn er sich von ihm fortbewegt.

Die Ausgangsspannungen der Fotoempfänger durchlaufen eine volle Periode, wenn sich der bewegte Reflektor um $\Delta \ell = \lambda_L/2 = 0.3164 \mu\text{m}$ verschoben hat, denn für die Ausgangsspannung der Fotoempfänger U gilt:

$$U = U_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_L} 2\Delta \ell + \varphi_0\right) \quad (1.1)$$

Darin ist λ_L die Wellenlänge des Laserlichts, $\Delta \ell$ die Verschiebung des Reflektors und φ_0 ein beliebiger Phasenwinkel. Das zu beschreibende Verfahren dient nun dazu, aus den Ausgangsspannungen der Fotoempfänger eine der Bewegung (Schwingweg) des bewegten Reflektors proportionale Spannung zu erzeugen.

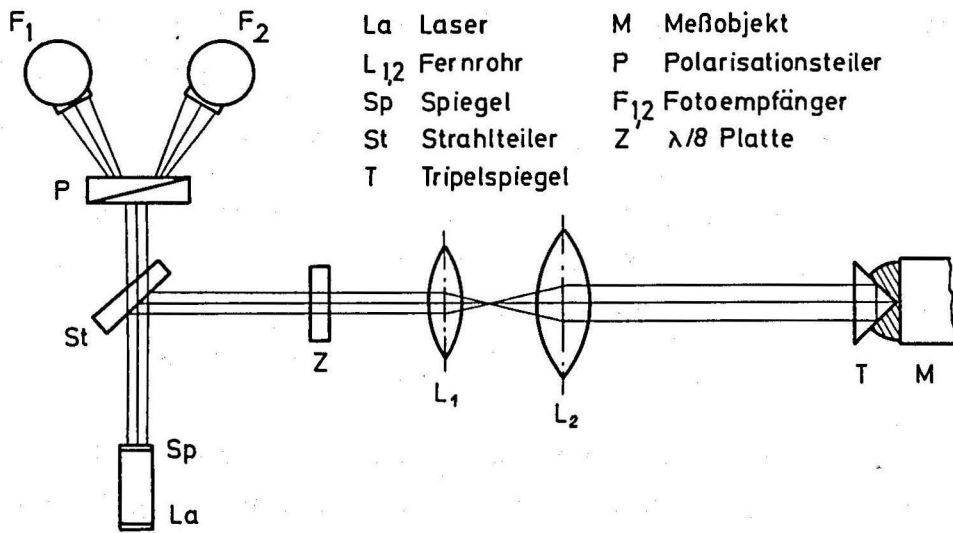


Bild 1: Anordnung des modifizierten Michelson-Interferometers

2. Beschreibung des Zählverfahrens

Mit dem Laser-Interferometer gewinnt man drei charakteristische Größen, aus denen mit Hilfe des zu beschreibenden Zählverfahrens eine elektrische Spannung gewonnen werden soll, die proportional der zu messenden mechanischen Schwingung ist. Die drei Größen, die mit dem Laser-Interferometer gewonnen werden, sind die folgenden:

1. Die Periodizität der Ausgangsspannung der Fotoempfänger.
2. Die gegenseitige Phasenlage der Ausgangsspannungen der Fotoempfänger.
3. Der Zeitpunkt der Umkehrung der gegenseitigen Phasenlage.

Die Periodizität der Ausgangsspannung der Fotoempfänger entspricht einer Verlagerung des Reflektors um $\Delta \ell = \lambda_{\text{I}}/2$. Durch Addition und Subtraktion dieser einzelnen Wegstücke erhält man den gesamten zurückgelegten Schwingweg.

Aus der gegenseitigen Phasenlage der Ausgangsspannungen der Fotoempfänger erhält man die Richtung der zu messenden Bewegung und damit eine Angabe darüber, ob die Wegstücke zu addieren oder zu subtrahieren sind.

Der Zeitpunkt der Umkehrung der Phasenlage muß auch der Zeitpunkt des Wechsels von Addition zu Subtraktion bzw. von Subtraktion zu Addition sein.

Um eine dem Schwingweg proportionale Spannung zu gewinnen, wird dann folgendermaßen verfahren:

Aus den Nulldurchgängen der Ausgangsspannung der Fotoempfänger werden elektrische Impulsfolgen gewonnen. Diese werden in einem Vorwärts- Rückwärtszähler je nach ihrer gegenseitigen Phasenlage aufaddiert oder subtrahiert. Die in dem Zähler zu einem beliebigen Augenblick stehende Zahl ist dann gleich der Summe der vom Reflektor bis zu diesem Augenblick zurückgelegten Wegstücke:

$$d = \sum_{v=1}^n \Delta \ell_v \quad (2.1)$$

Darin ist d die gespeicherte Zahl, v die Anzahl der gezählten Impulse und $\Delta \ell_0$ wiederum die Verschiebung des Reflektors zwischen zwei Impulsen. Da angenommen wurde, daß während einer Periode der Ausgangsspannungen der Fotoempfänger je zwei Impulse gebildet werden, die Spannungen aber um 90° phasenverschoben sind, so ist die gesamte Zahl der Pulse pro Periode gleich vier. Demgemäß ist $\Delta \ell_0 = \lambda_{\text{I}}/8 = 0,0791 \text{ um}$. Der Wert dieser Zahl muß dann nur noch in eine ihr entsprechende elektrische Spannung umgewandelt werden. Diese Spannung ist dann in Betrag, Frequenz und Phase genau dem Schwingweg des Reflektors proportional.

An das Verfahren sind einige Forderungen zu stellen, die sich aus dem Bereich der zu messenden Schwingungen ergeben und die hier erläutert werden sollen:

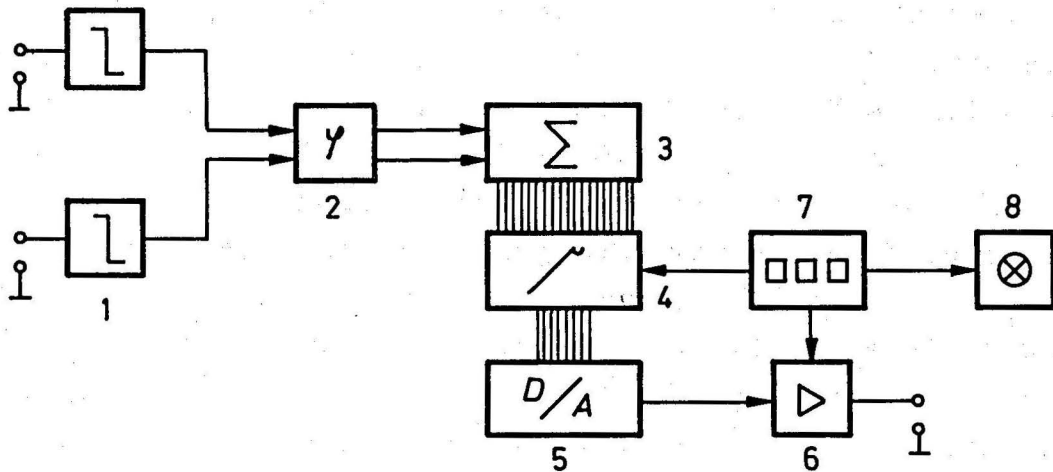
Die Fotoempfänger liefern eine Signalspannung mit einer Frequenz von maximal 2,5 MHz. Diese Frequenz ergibt sich aus der maximal meßbaren Geschwindigkeit von $v = 0,8 \text{ m/sec}$. Die maximal meßbare Amplitude sollte $a = \pm 20 \text{ mm}$ und die maximal meßbare Schwingfrequenz des Reflektors sollte 3 kHz betragen. Mit diesen Angaben ist der Arbeitsbereich des Verfahrens umrissen.

Im Bild 2 ist das Prinzipschaltbild des Gerätes, das für das beschriebene Zählverfahren entwickelt wurde, gezeigt. Es besteht aus den angegebenen acht Funktionseinheiten, deren Konstruktion und Arbeitsweise im folgenden Kapitel ausführlich beschrieben werden soll.

3. Beschreibung der Funktionseinheiten

3.1 Die Pulsformerstufe

Die Pulsformerstufe hat die Aufgabe, im Zeitpunkt der Nulldurchgänge der Ausgangsspannungen der Fotoempfänger, zwischen der Spannung Null und einem positiven Spannungsniveau umzuschalten. Dadurch wird eine zur Spannung der Fotoempfänger frequenz- und phasenrichtige Rechteckspannung gebildet.



- | | |
|------------------------------|---------------------------|
| 1 Pulsformerstufe | 5 Digital-Analog-Umsetzer |
| 2 Zählrichtungsdiskriminator | 6 Anpassungsverstärker |
| 3 Vorwärts-Rückwärts-Zähler | 7 Meßbereichswähler |
| 4 Digitaler Multiplexer | 8 Meßbereichsanzeige |

Bild 2: Prinzipschaltbild des Interferenzstreifen-Zählgerätes.

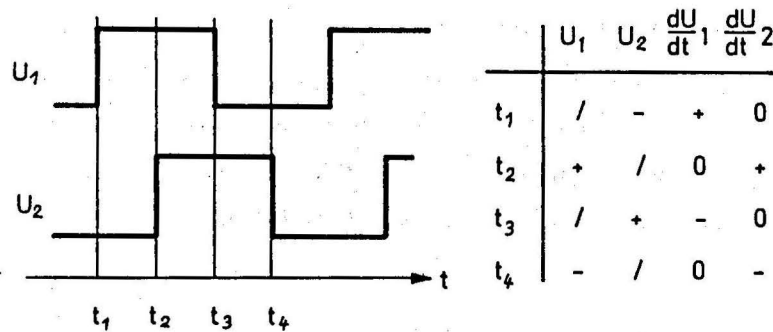


Bild 3: Spannungszustände am Eingang des Zählrichtungsdiskriminators

Diese Umwandlung erfolgt mit Hilfe von zwei Schmitt-Trigger. Für jeden Kanal steht ein Schmitt-Trigger zur Verfügung. Die Hysterese der Schmitt-Trigger wurde mit 0,2 V ausgelegt. Störspannungen, die kleiner als 0,2 V sind, haben dadurch keine Wirkung. Dagegen werden die Signalspannungen, die in den Fotoempfängern auf 1 V begrenzt werden, zu Rechteckspannungen - im folgenden als Rechteckspannungen U_1 , U_2 bezeichnet - mit steilen Flanken umgewandelt. Die Flankensteilheit muß so groß sein, daß die aus ihnen durch Differentiation zu bildenden Zählimpulse kurz genug sind, um eine Pulsrate von 10^7 ppsec zuzulassen. Die Anstiegs- und Abfallzeit der Schmitt-Trigger wurde gemessen und beträgt je 40 nsec. Diese Schaltzeiten sind für die vorgesehene Zählrate ausreichend.

3.2 Der Zählrichtungsdiskriminator

Der Zählrichtungsdiskriminator hat die Aufgabe, aus den Flanken der von den beiden Schmitt-Trigger kommenden Rechteckspannungen U_1 , U_2 die Zählimpulse zu bilden. Diese Zählimpulse muß der Zählrichtungsdiskriminator je nach gegenseitiger Phasenlage von U_1 und U_2 dann auf den Vorwärts- bzw. auf den Rückwärtszählkanal des Zählers geben.

Zur Gewinnung der Zählimpulse werden die beiden Rechteckspannungen differenziert. Das ergibt dann vier Zählimpulse pro Periode der Rechteckspannung. Je nach Phasenlage der beiden Rechteckspannungen U_1 , U_2 zueinander ergeben sich an den Sprungstellen (t_1 bis t_4) bestimmte Zuordnungen der Spannungszustände der beiden Kanäle. Diese sind in der Tabelle in Bild 3 angegeben. Durch logische Verknüpfung dieser Spannungszustände kann man die Zählimpulse dem jeweils richtigen Zählkanal zuordnen.

Durch Umkehrung und Differentiation werden die folgenden 8 Spannungszustände gebildet:

$$U_1; U_2; \bar{U}_1; \bar{U}_2; dU_1; dU_2; \bar{dU}_1; \bar{dU}_2;$$

Darin sollen die überstrichenen Werte die Umkehrung des jeweiligen Wertes bedeuten, d.h. $\bar{U}_1 = -U_1$ etc. Die mit d behafteten Größen sollen die Ableitung des ursprünglichen Wertes bedeuten, d.h. $dU_1 = \frac{d}{dt}(U_1)$. Diese Spannungen werden als Eingangsvariable einer logischen Verknüpfungsschaltung zugeführt.

Für die in Bild 3 dargestellte Phasenlage ergibt sich dann für die Ausgangsvariablen \bar{v} und \bar{r}

$$\bar{v} = \bar{U}_2 dU_1 + U_1 dU_2 + U_2 d\bar{U}_1 + \bar{U}_1 d\bar{U}_2 \quad (3.1)$$

$$\bar{r} = L$$

Ist die Phasenlage umgekehrt, d.h. U_1 eilt U_2 nach, so ergeben sich entsprechende Spannungszustände und für die Ausgangsvariablen \bar{v} und \bar{r} gilt:

$$\bar{v} = L$$

$$\bar{r} = \bar{U}_1 dU_2 + U_2 dU_1 + U_1 d\bar{U}_2 + \bar{U}_2 d\bar{U}_1 \quad (3.2)$$

Diese beiden Ausgangsvariablen sind die Zählimpulse, die den zugehörigen Zählleitungen des Zählers zugeführt werden.

($\bar{v} \hat{=}$ Vorwärts; $\bar{r} \hat{=}$ Rückwärts).

Das Bild 4 zeigt ein Oszillogramm der beiden um 90° phasenverschobenen Rechteckspannungen und der daraus gebildeten Zählimpulse.

Die logische Verknüpfungsschaltung wird mit TTL-NAND-Gattern realisiert und ist in Bild 5 dargestellt.

Die Umkehrer am Ausgang dienen der Anpassung an die Eingänge des Zählers und zusammen mit dem mittleren Gatter der Unterdrückung von Pulsen, die in beiden Kanälen gleichzeitig erscheinen könnten.

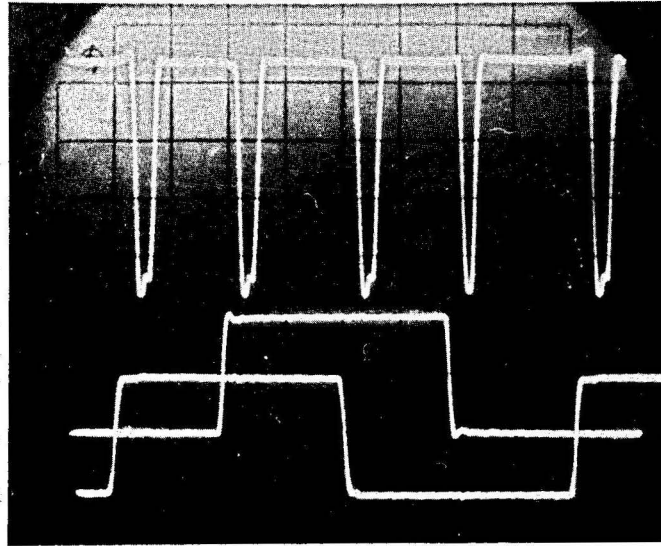


Bild 4: Eingangsspannungen (unteres Oszillogramm) und Ausgangsspannung (oberes Oszillogramm) des Zählrichtungsdiskriminators $y = 1 \text{ V/cm}$; $x = 0.2 \text{ usec/cm}$

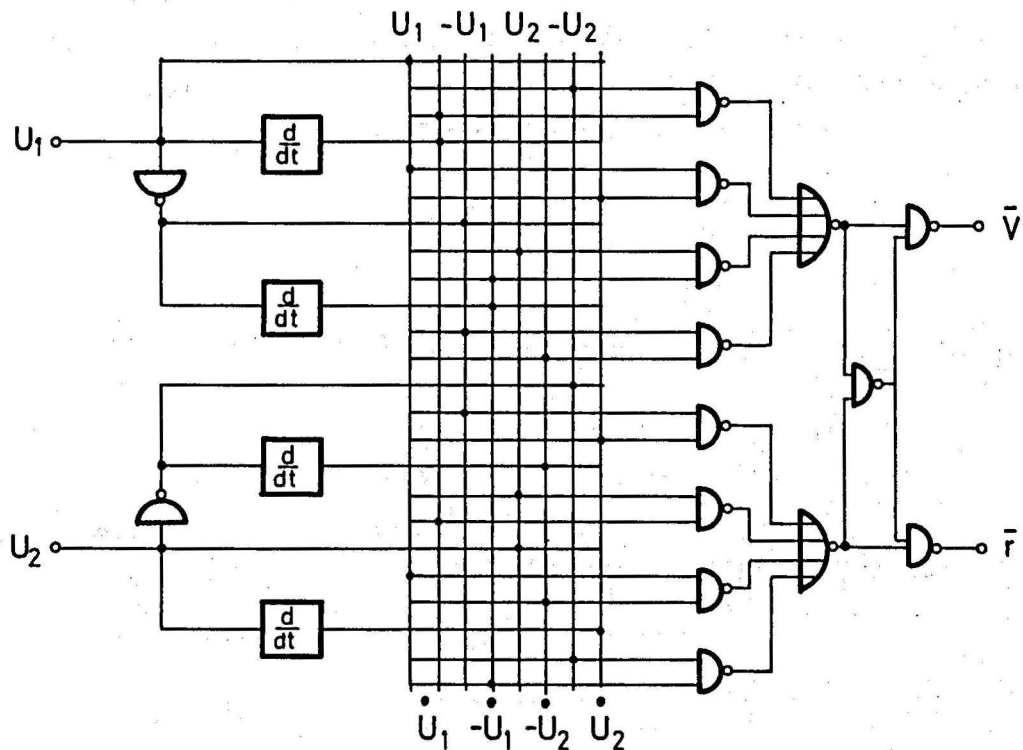


Bild 5: Schaltung des Zählrichtungsdiskriminators

Die Pulsdauer der Zählimpulse beträgt $t_p = 85 \text{ n sec}$ und die Verzögerungszeit gegenüber den Flanken der Rechteckspannungen ist $t_v = 60 \text{ n sec}$.

3.3 Der Vorwärts-Rückwärts-Zähler

Der Vorwärts-Rückwärts-Zähler zählt die Zählimpulse, die vom Zahlrichtungsdiskriminator kommen. Das soll je nach Phasenlage der ursprünglichen Rechteckspannungen in Vorwärts- oder Rückwärtszählweise erfolgen.

Dazu sind die beiden Pulsausgänge des Zahlrichtungsdiskriminators mit den beiden Eingängen des Zählers verbunden. Der Zähler besteht aus fünf gleichen Zähleinheiten. Diese Zähleinheiten sind synchrone Dualzähler für den Zählzyklus 16 (4 bits). Fünf solcher Zähleinheiten sind asynchron hintereinandergeschaltet. Der letzte Ausgang des Zählers wird nicht benutzt. Somit steht ein dualer Zähler mit einer Zählkapazität von $2^{19} = 524\,288$ Pulsen zur Verfügung.

Die zu einem beliebigen Augenblick an den Ausgängen des Zählers stehende duale Zahl multipliziert mit der pro Zählimpuls zurückgelegten Strecke $\Delta l = \lambda_I / 8$ ergibt die gesamte Verschiebung des Reflektors. Entsprechend der Zählkapazität kann die maximale Verschiebung $\pm 2^{18} \cdot \Delta l = \pm 20,74 \text{ mm}$ betragen. Dabei wird das 19. bit für das Vorzeichen verbraucht.

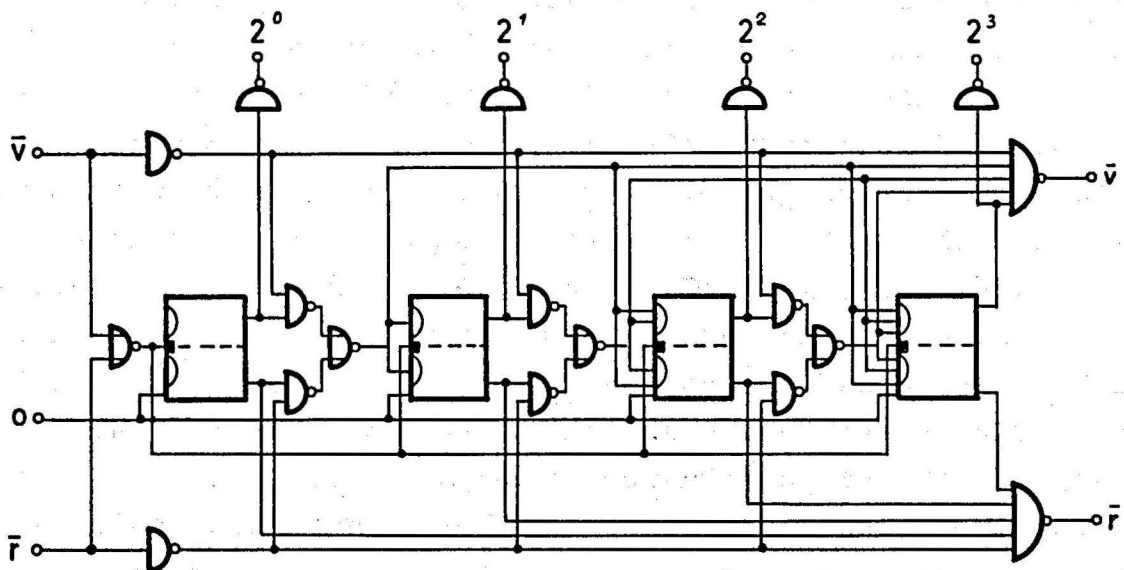


Bild 6: Prinzipschaltbild einer Zähleinheit

Der Zähler ist in integrierter Halbleitertechnik aufgebaut. Sein Prinzipschaltbild ist in Bild 6 angegeben. Die maximale Zählfrequenz ist größer als 10^7 ppsec. Die Verzögerungszeit zwischen einem Zählimpuls und dem Zeitpunkt, zu dem der duale Zahlenwert am Ausgang zur Verfügung steht, beträgt nach der ersten Zähleinheit $t_{v1} = 20$ nsec und nach den vier anderen Zähleinheiten $t_{v4} = 200$ nsec .

Unter Punkt 3.2 wurde angegeben, daß die Pulsdauer der Zählimpulse $t_p = 85$ nsec beträgt. Daraus ergibt sich eine theoretische maximale Zählrate von $1,18 \cdot 10^7$ ppsec. Diese Zählrate kann aber nur erreicht werden, wenn die Zählimpulse zeitlich direkt nacheinander folgen, d.h., die Zählimpulse müssen zeitlich äquidistant und die Pulsdauer konstant sein. Das hat aber zur Voraussetzung, daß die Phasenverschiebung der Rechteckspannungen, aus denen die Pulse gebildet werden, genau um $\pm 90^\circ$ gegeneinander verschoben sind. Bei geringeren Zählraten kann die gegenseitige Phasenverschiebung von 90° abweichen, ohne die Funktion des Zählers zu beeinflussen. Die Zählimpulse müssen nur einen zeitlichen Mindestabstand von 85 nsec voneinander haben.

In Bild 7 sind die Grenzen der Arbeitsbereiche der Zählordnung für die Rückwärts- und die Vorwärtszählung angegeben, die sich nach den oben angestellten Überlegungen ergeben. Die maximal mögliche Phasenverschiebung ist dabei über der Frequenz der Ausgangsspannung der Fotoverstärker f_F aufgetragen. Aus den Kurven ist zu entnehmen, daß die Phasenverschiebung bei tiefen Frequenzen einen großen Bereich überstreichen kann. Bei der maximal möglichen Frequenz muß sie dagegen genau $\pm 90^\circ$ sein. Der theoretisch mögliche Arbeitsbereich wird von den gestrichelt gezeichneten Linien eingeschlossen. Die gemessenen Werte (ausgezogene Kurven) weichen davon ab. Bei ihnen ist die zulässige Änderung der Phasenverschiebung geringer. Ebenso ist auch die maximale Frequenz niedriger. Das hat seine Ursache darin, daß durch unterschiedliche Signalverzögerungszeiten in der logischen Verknüpfungsschaltung die Zählimpulse nicht zeitlich äquidistant sind. Nach den gemessenen Werten beträgt die maximale Zählrate $r_z (\max) = 4 \cdot f_F = 10,2 \cdot 10^6$ ppsec .

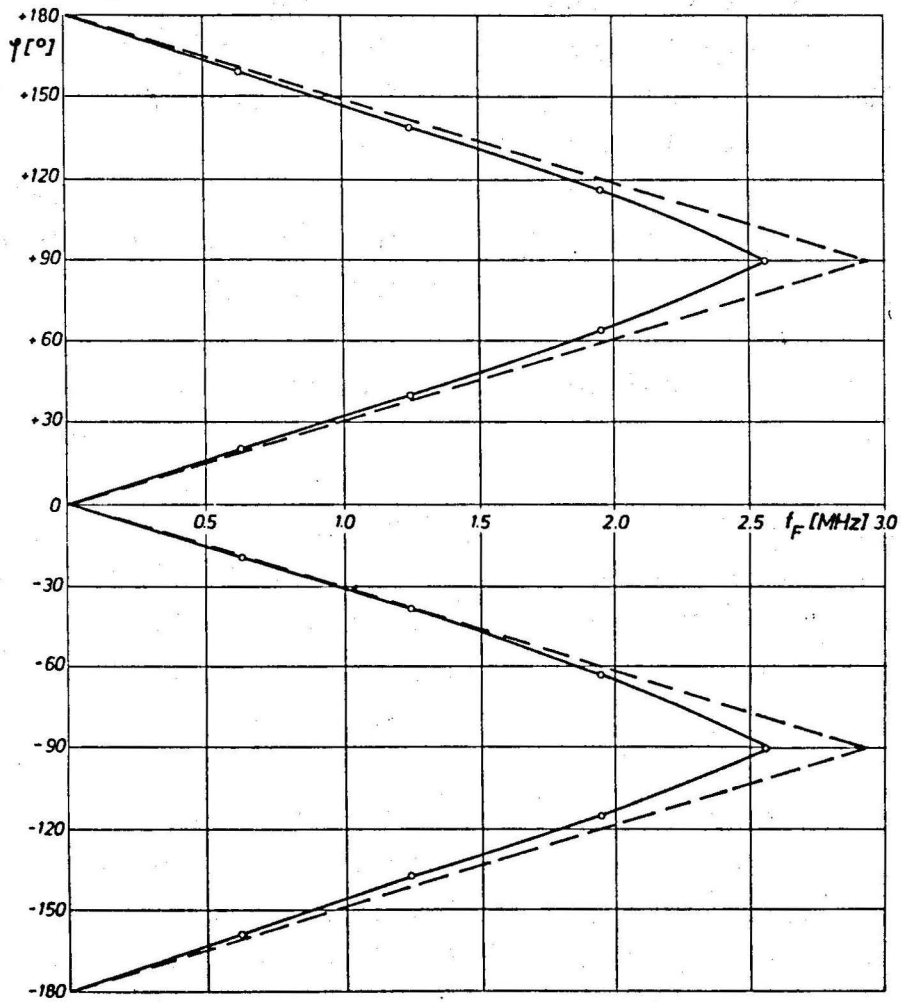


Bild 7: Maximale Phasenverschiebung φ als Funktion der Frequenz f_F der Rechteckspannungen U_1 , U_2 .

3.4 Der digitale Multiplexer

Der digitale Multiplexer hat die Aufgabe, die 19 Ausgänge - entsprechend den 19 bits - des Zählers mit den 8 Eingängen - entsprechend 8 bits - des Digital-Analog-Umsetzers (DAU) zu verbinden. Mit Hilfe des Multiplexers ist es möglich, aus den 19 Ausgängen des Zählers 8 hintereinanderliegende Ausgänge auszuwählen, und diese an die 8 Eingänge des DAU zu legen, so daß ein für die jeweilige, zu messende Schwingung geeigneter Meßbereich ausgewählt wird. Der Meßbereich und damit die Stellung des Multiplexers ist stets so zu wählen, daß das bit mit der höchsten Wertigkeit (hb), das während der Messung noch beaufschlagt wird, mit dem bit mit der höchsten Wertigkeit des DAU verbunden ist. Ist dies nicht der Fall, so wird der DAU entweder übersteuert, oder zu gering angesteuert. In beiden Fällen steigt die Meßunsicherheit stark an.

Der gesamte Meßumfang von $\pm 0,079 \mu\text{m}$ bis $\pm 20,74 \text{ mm}$ wird mit Hilfe des Multiplexers in 15 Bereiche eingeteilt. Die Stellung des Multiplexers wird von einem Meßbereichswähler (7, Bild 1) bestimmt. Durch ihn erfolgt die Anwahl des Multiplexers im Dualcode über 4 Leitungen.

Mit jeder Weiterschaltung des Multiplexers werden die 8 Eingänge des DAU mit je einem anderen Ausgang des Zählers verbunden. Das bedeutet eine Änderung der Empfindlichkeit der Messung im Verhältnis $1 : 2 \cdot n$. Fortschaltungen ergeben demgemäß eine Änderung der Empfindlichkeit von $1 : 2^n$.

Günstiger als eine Bereichsumschaltung im dualen Rhythmus ist ein gemischter Rhythmus aus dualen und dezimalen Meßbereichsänderungen, wie das in Tabelle 1 in der Spalte "Empfindlichkeit" angegeben ist. Man gewinnt dann eine reine dezimale Meßbereichsklassifikation. Die ersten beiden Umschaltungen verdoppeln den Meßbereich, während die 3. Umschaltung eine Verzehnfachung gegenüber dem Meßbereich Nr. 1 bedeutet. Da also die 3. Umschaltung nicht im Verhältnis $1 : 2$, sondern im Verhältnis $1 : 2,5$ erfolgen soll, der DAU gegenüber dem Zähler aber

Meß- bereich Nr.	Code des Multipl.	Wort- länge (bit)	Auflösg. (μm)	Empfind- lichkeit (mm/V)	Quanti- sierg. Ausg. (V/bit)	Quant.- Fehler (%)
1	OOOL	4	0,079	$0,5 \cdot 10^{-4}$	1,582	7,9
2	OOL0	5	0,079	1,0 "	0,791	3,95
3	OOLL	6	0,079	2,0 "	0,395	1,98
4	OLOL	7	0,079	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,158	0,79
5	OLLO	8	0,079	1,0 "	0,079	0,39
6	OLLL	8	0,158	2,0 "	0,079	0,39
7	LOOL	8	0,633	$0,5 \cdot 10^{-2}$	0,127	0,64
8	LOLO	8	1,266	1,0 "	0,127	0,64
9	LOLL	8	2,531	2,0 "	0,127	0,64
10	LLOL	8	5,062	$0,5 \cdot 10^{-1}$	0,101	0,5
11	LLLO	8	10,12	1,0 "	0,101	0,5
12	LLLL	8	20,25	2,0 "	0,101	0,5
13	OLOO	8	40,50	0,5	0,081	0,4
14	LOOO	8	81,00	1,0	0,081	0,4
15	LLOO	8	162,00	2,0	0,081	0,4

Tabelle 1 :

stets um 1 bit weitergeschaltet wird - im Verhältnis 1 : 2 also - , wird zum Ausgleich die Verstärkung des Anpassungsverstärkers mit jeder 3. Umschaltung so verändert, daß für die Ausgangsspannung des Verstärkers ein Verhältnis von 1 : 2,5 zustandekommt.

Nach diesen Überlegungen muß die Verstärkung also bei jeder 3. Bereichsumschaltung im Verhältnis 1 : 1,25 vergrößert werden. Um zu verhindern, daß die Verstärkung in zu weiten Grenzen geändert werden muß, ist bei der Umschaltung von Bereich Nr. 6 nach Bereich Nr. 7 ein anderer Weg beschritten worden. Der DAU wird mit Hilfe des Multiplexers um je 2 Ausgänge des Zählers weitergeschaltet. Das bedeutet eine Änderung der

Empfindlichkeit im Verhältnis 1 : 4 . Um für die Ausgangsspannung des Verstärkers wieder auf 1 : 2,5 zu kommen, wird die Verstärkung im Verhältnis 1 : 1,6 verringert. Bei den nächsten Umschaltungen wird dann wieder in der ursprünglichen Weise verfahren.

3.5 Der Digital-Analog-Umsetzer

Der Digital-Analog-Umsetzer wandelt die über den Multiplexer vom Zähler übernommene duale Zahl in einen ihr proportionalen Strom um. Der Anpassungsverstärker bildet daraus eine Spannung. Da die maximale Wortlänge 8 bits - entsprechend den 8 Eingängen des DAU - beträgt, ist der gesamte duale Zahlenbereich in $2^8 = 256$ Teile eingeteilt. Hiervon werden durch den Anpassungsverstärker am oberen und unteren Ende des Bereichs einige Quantisierungsstufen unterdrückt, so daß der Bereich der Ausgangsspannung in weniger als 256 Teile quantisiert ist. Die Auflösung und der Quantisierungsfehler für alle 15 Meßbereiche ist in Tabelle 1 angegeben.

Für den empfindlichsten Bereich (Bereich Nr. 1) sollen die Zusammenhänge im folgenden näher untersucht werden:

Die digitale Wortlänge n beträgt hier $n = 4$. Das bit d_1 mit der höchsten Wertigkeit (hb) hat besondere Bedeutung, da es das Vorzeichen des Digitalsignals d festlegt. Das bit d_4 hat die kleinste Bewertung (kb).

Die kleinste Quantisierungsstufe war, wie unter 2. beschrieben, $0.079 \mu\text{m}$. Bei einer Empfindlichkeit von $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ mm/V}$ gilt dann folgende Zuordnung:

Kleinste analoge Quantisierungsstufe:

$$q_1 = 1,582 \text{ V (s. Tabelle 1)} \quad (3.5.1)$$

Dem entspricht das bit mit der kleinsten Bewertung (kb).

Das größte positive Digitalsignal ist gegeben durch:

$$+ d_{(\text{max})} = \sum_{v=0}^{n-2} 2^v = + 7 \quad (3.5.2)$$

Nach 3.5.1 entspricht diesem Digitalsignal die analoge Ausgangsspannung $U_{a1} = + 11,07 \text{ V}$.

Das größte negative Digitalsignal ist gegeben durch:

$$- d_{(\text{max})} = - \sum_{v=0}^{n-2} 2^v - 1 = -8 \quad (3.5.3)$$

Nach 3.5.1 entspricht dem die analoge Ausgangsspannung

$$U_{a2} = - 12,67 \text{ V}$$

Diese Verhältnisse sind in Bild 8 dargestellt.

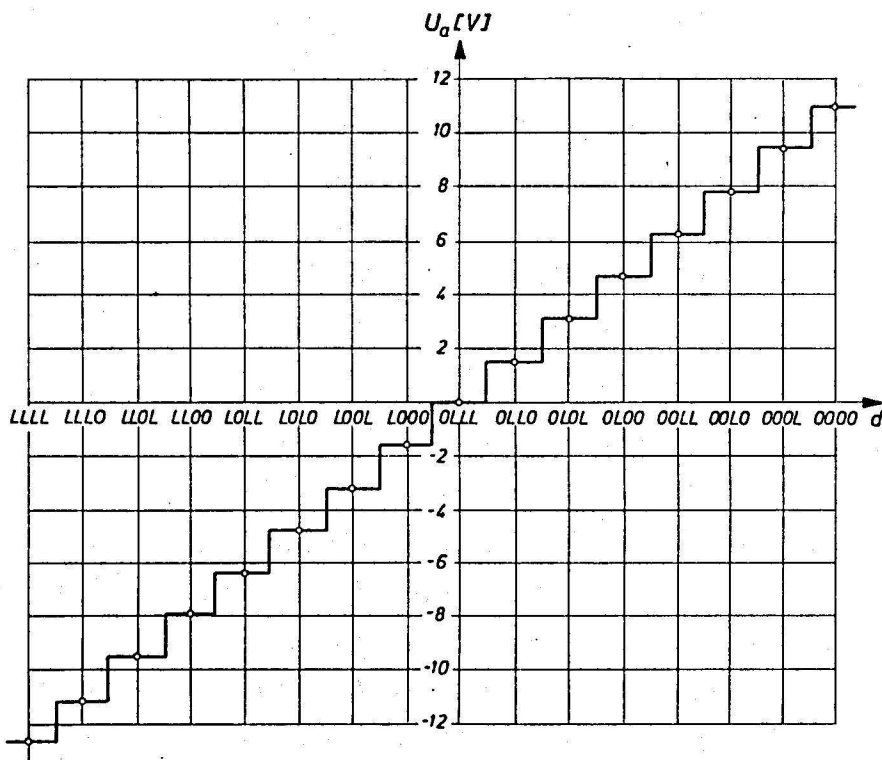


Bild 8: Zuordnung der dualen Zahlen d zur Ausgangsspannung U_a des Digital-Analog-Umsetzers

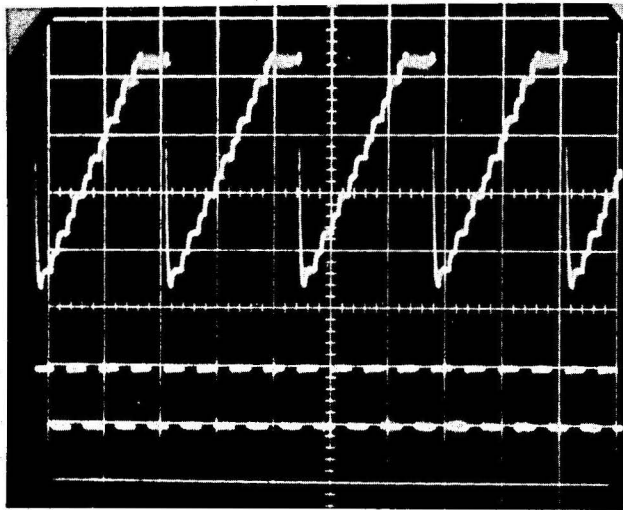


Bild 9: Ausgangsspannung des DAU mit Anpassungsverstärker (oberes Oszillogramm und zugehörige Eingangsspannung des Zählgerätes (unteres Oszillogramm)

$$x = 5 \text{ msec/cm}$$

$$y_1 = 5 \text{ V/cm (oberes Oszillogramm)}$$

$$y_2 = 1 \text{ V/cm (unteres Oszillogramm)}$$

Bild 9 zeigt ein Oszillogramm der Umsetzung im DAU für den Meßbereich Nr. 1.

Wird der Zähler durch den Reset-Eingang auf Null gesetzt, so liegt an seinen sämtlichen Ausgängen die Ziffer 1. Damit aber die Stellung 0 der dualen Zahl $d = 0111$ - entsprechend Bild 7 - zugeordnet werden kann, ist vor dem Vorzeichen bit (hb) des DAU ein Umkehrer angebracht.

Zusätzlich werden noch Maßnahmen getroffen, um dem DAU die Zahlen 1011 und 0011 zuzuführen. Im Bereich Nr. 1 entsprechen diesen Digitalsignalen die analogen Spannungen plus und minus 6,328 V. Mit diesen Eichsignalen läßt sich die Ausgangsspannung jederzeit kontrollieren.

Diese Überlegungen gelten entsprechend auch für alle anderen

Meßbereiche. Entsprechend Tabelle 1 steigt mit der Nr. des Meßbereiches auch die Wortlänge des Digitalsignals bis auf 8 bits . In diesen Meßbereichen ist der analoge Ausgangsspannungsbereich entsprechend feiner quantisiert.

Die Digitalsignale werden dem DAU parallel zugeführt und verarbeitet. Dadurch ist er sehr schnell. Die Schaltzeit für eine Umsetzung beträgt 600 nsec .

Der nachgeschaltete Verstärker hat eine Anstiegszeit von 300 usec . In dieser Zeitspanne müssen maximal 256 Umsetzungen im DAU erfolgen. Es steht also eine Zeit von $t_u = 1,17 \mu s$ pro Umsetzung zur Verfügung. Somit ist der DAU noch fast doppelt so schnell wie unbedingt notwendig.

3.6 Der Anpassungsverstärker

Der Anpassungsverstärker besteht aus zwei hintereinandergeschalteten Operationsverstärkern. Der erste Operationsverstärker wird mit dem aus dem DAU kommenden Strom beaufschlagt. Am Ausgang des Verstärkers steht eine diesem Strom proportionale Spannung von maximal $\pm 10 V$ zur Verfügung. Der Nullpunkt und die Verstärkung ist entsprechend der unter 3.5 behandelten Eichkontrolle einstellbar. Der zweite Operationsverstärker hat einen in fünf Stufen veränderbaren Verstärkungsfaktor, und zwar:

1. $V_1 = 1,250$
2. $V_2 = 1,000$
3. $V_3 = 1,600$
4. $V_4 = 1,280$
5. $V_5 = 1,024$

Die Umschaltung dieser 5 Verstärkungsfaktoren erfolgt vom Meßbereichswähler gleichzeitig mit der Umschaltung des digitalen Multiplexers. Damit wird die unter 3.4 beschriebene Anpassung der Meßbereiche an das Dezimalsystem gewährleistet. Um die Abhängigkeit der Verstärkung von der Umgebungstemperatur klein zu

halten, wurden für die verstärkungsbestimmenden Widerstände Metallschichtwiderstände mit einem $T_k = 15 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ benutzt. Der Ausgang des Verstärkers ist gegen Kurzschluß gesichert.

4. Diskussion und Zusammenstellung der Meßergebnisse

Ein Meßergebnis, das mit der beschriebenen Zählleinrichtung gefunden wird, kann durch äußere Einflüsse auf die Zählleinrichtung mit zusätzlichen Fehlern behaftet sein. Es kommen die folgenden drei Arten von Fehlern in Betracht:

1. Nullpunktfehler
2. Linearitätsfehler
3. Phasenfehler

Der Nullpunktsfehler ist natürlich nur im analogen Teil feststellbar. Es ist dafür also nur der DAU und der Anpassungsverstärker verantwortlich. Auf Grund der verwendeten Metallschichtwiderstände ist der Nullpunktsfehler aber sehr klein.

Die Linearität über das gesamte Gerät wurde gemessen und der Linearitätsfehler ermittelt. Es ist zu unterscheiden zwischen dem Quantisierungsfehler und der Abweichung von dem linearen Quantisierungsgesetz.

Der Quantisierungsfehler ist für alle Meßbereiche in Tabelle 1 angegeben. Die Linearitätsmessung ergab Abweichungen in den einzelnen Quantisierungsstufen. Das Ergebnis ist in der Zusammenstellung der Meßergebnisse zu finden.

Der Phasenfehler kommt im digitalen Teil durch die Signalverzögerungszeit und im analogen Teil durch die Phasendrehung des Anpassungsverstärkers bei hohen Frequenzen zustande.

Die Signalverzögerungszeit für den Pulsformer, den Zähler und den Multiplexer beträgt zusammen 280 nsec. Dazu kommt noch die Umsetzzeit des DAU von 600 nsec. Rechnet man diese

Signalverzögerungszeit von 880 nsec um in eine Phasenverschiebung bei der höchsten zu messenden Schwingfrequenz von 3 kHz, so ergibt dies die maximale Phasenverschiebung, hervorgerufen durch die Signalverzögerungszeit im digitalen Teil:

$$\varphi(\max) = 360^\circ \cdot \frac{t_v}{T_S} = 0.96^\circ \quad (4.1)$$

T_S ist darin die Schwingungsdauer der zu messenden Schwingung. Für tiefere Frequenzen als 3 kHz ist die Phasenverschiebung natürlich noch geringer.

Bei der Frequenz von 3 kHz erzeugt der Anpassungsverstärker aber schon eine größere Phasenverschiebung, die bedingt ist durch die obere Grenzfrequenz des Verstärkers.

Im folgenden sind die wichtigsten Angaben und Meßwerte des Zählgerätes zusammengestellt:

1. Pulsformerstufe und Zählrichtungsdiskriminator:

Pulsdauer $t_p = 85 \text{ nsec}$
Signalverzögerungszeit: $t_v = 60 \text{ nsec}$

2. Vorwärts- Rückwärtszähler

maximale Zählrate $v_z = 10,2 \cdot 10^6 \text{ ppsec.}$

Signalverzögerungszeit

1. Zähleinheit $t_v = 120 \text{ nsec}$

5. Zähleinheit $t_v = 200 \text{ nsec}$

maximale Wortlänge $d(\max) = 19 \text{ bits}$

3. Digital-Analog-Umsetzer

Minimale Wertlänge $d(\min) = 4 \text{ bits}$

Maximale " $d(\max) = 8 \text{ bits}$

Umsetzzeit $t_n = 600 \text{ nsec}$

Quantisierungsfehler siehe Tabelle 1

Linearitätsfehler = 0,1 %

Temperaturdrift des Nullpunktes = $5 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

4. Anpassungsverstärker

Maximale Ausgangsspannung:

$U_a(\max) = \pm 10 \text{ V}$

Frequenzgang

0 bis 3 kHz

Verstärkung

$V = 10 \text{ V}/1.25 \text{ mA}$

$R_i = 280 \Omega$ kurzschlußsicher

