

DER FREIE FALL

Mechanischer Aufbau des Experimentes,
Bau der elektronischen Zeitmessung und
Bestimmung der Erdbeschleunigung

Dr. Franz Raemy

22. Juli 2005



1 Zähler, Frequenzmesser und Stoppuhr

Das Projekt umfasst das Experiment des freien Falles. Dazu gehört eine mechanische Anordnung und eine Stoppuhr, so dass die Zeit, welche eine Masse braucht, um eine Höhendifferenz zu durchfallen, gemessen werden kann. Zur Zeitmessung wurde eine Schaltung entworfen, die auch als Frequenzmesser und als Ereigniszähler Anwendung finden kann.

1.1 Bemerkungen zur Messtechnik

Zum mechanischen Aufbau des Experimentes wird eine stabile Aluminiumhalterung gewählt, an deren oberen Ende ein Magnet befestigt ist, dessen Höhe sich verstellen lässt. In diesem Experiment wird nicht wie üblich, das Abschalten des Magnetfeldes als Startsignal verwendet, sondern ein unabhängiger Lichtsensor, der mit einer Reaktionszeit von einigen Nanosekunden ein exaktes Auslösen des Startsignals erlaubt. Zudem hat sich herausgestellt, dass der Fehler der Zeitmessung vor allem beim Start gross wird. Ein weiterer nicht unwesentlicher Vorteil, ist die eindeutige Feststellung der auslösenden Position der Masse. Der Messvorgang geschieht stets zwischen der Startposition und Stoppposition am Ort der Laserlichtschranken. Weiter spielt das Zurückhalten der Masse durch den Magneten eine wichtige Rolle. Die Masse beginnt den Fall, wie leicht durch Messung der Signale gezeigt werden kann nicht im Moment des Abschaltens des Magnetfeldes sondern später. Dieses Problem tritt in diesem Experiment nicht auf, weil der Stromkreis für den Elektromagneten und für die Zeitmessung völlig getrennt sind. Um korrekt fallende Kugeln von Kugeln zu unterscheiden, die den Stopp-Sensor seitlich passieren könnten, wurde eine Lehre für alle Kugeln in ein Aluminiumblech geschnitten, die es erlaubt günstige von ungünstigen Ereignissen zu unterscheiden. Berührt die Kugel das Aluminiumblech, wird das Ereignis nicht berücksichtigt.

1.2 Die Komponenten des mechanischen Aufbaus

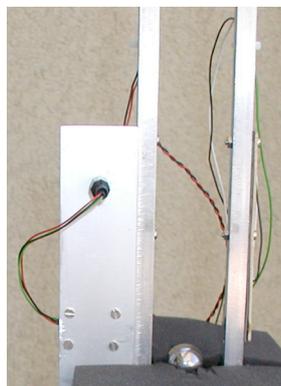
Als Halterung wird eine stabile Aluminiumkonstruktion gewählt, um die Messung beim freien Fall nicht durch störende Magnetfelder zu beeinflussen. Die Abbildung der Titelseite zeigt den gesamten Mechanischen Aufbau.

1.3 Die elektrischen Lichtsensoren

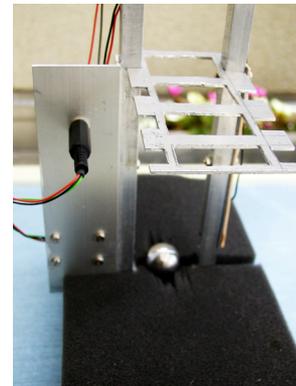
Die elektrischen Lichtsensoren und Lichtquellen sind im Start- und Zielbereich angeordnet. Sie lassen sich jeweils um 5 cm verschieben. Die Länge der so definierten maximalen Fallstrecke ist ein Meter. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen den Start- und den Stopp-Lichtsensor.



Laser, Startsensor, Kugel und Elektromagnet



Stoppsensor

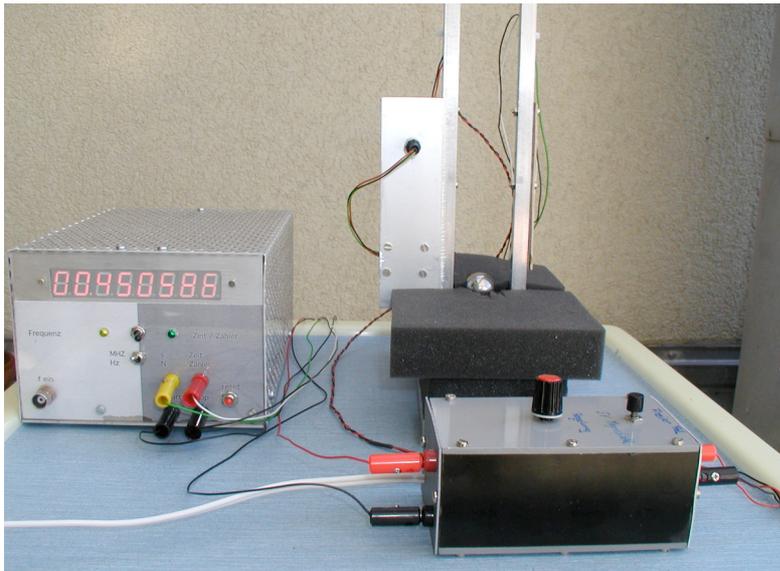


Stoppsensor mit der Lehre

Die Funktionsweise ist bei beiden Sensoren gleich. Wird der Lichtstrahl durch die fallende Masse unterbrochen, dann wird der Sensor hochohmig, das heisst man erhält eine positive Flanke, die von der Elektronik jeweils als Start- oder als Stopp-Signal verwertet wird.

1.4 Das Messgerät

Äusserlich zeigt die Stoppuhr ein achtstelliges Display. Es können Zeiten zwischen einer Mikrosekunde und 100 Sekunden gemessen werden. Gleichzeitig lässt sich die Stoppuhr auch als Frequenzmesser bis 2,5 MHz anwenden. Eine weitere Anwendung ist die Ereigniszählung von 1 bis zu 100 Millionen Vorgängen. Die folgende Abbildung zeigt das vielseitige Messgerät.

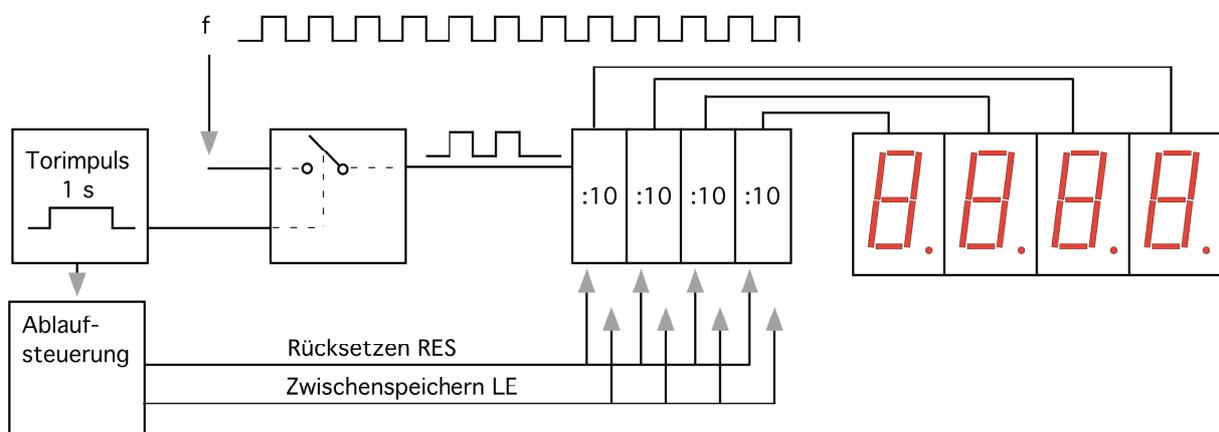


Stromversorgung, Stopplichtschanke und Lehre, sowie die Stoppuhr

2 Der elektronische Aufbau des Frequenz-, Zeitmessers und Ereigniszählers

Das folgende Schema zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Frequenzmessers.

Prinzipschaltbild eines Frequenzzählers

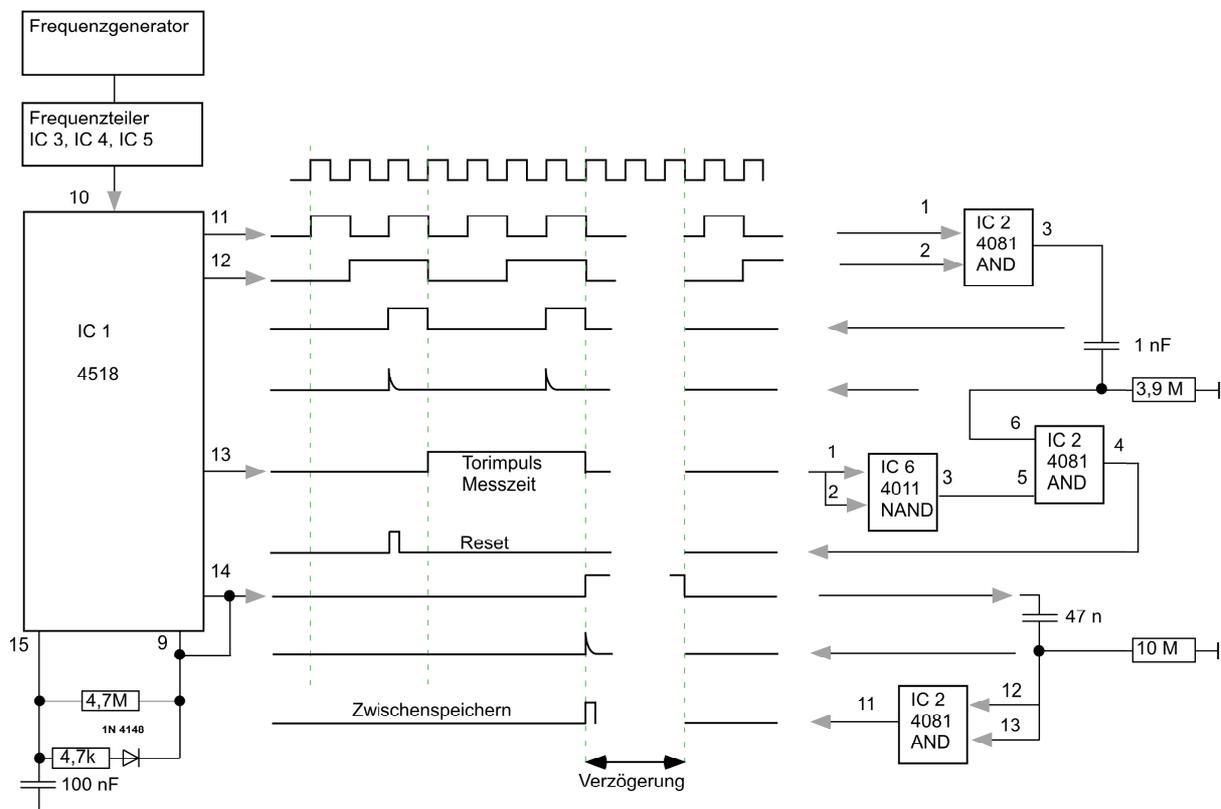


Prinzipschaltbild eines Frequenzmessers

2.1 Die Signalaufbereitung für die Anzeige

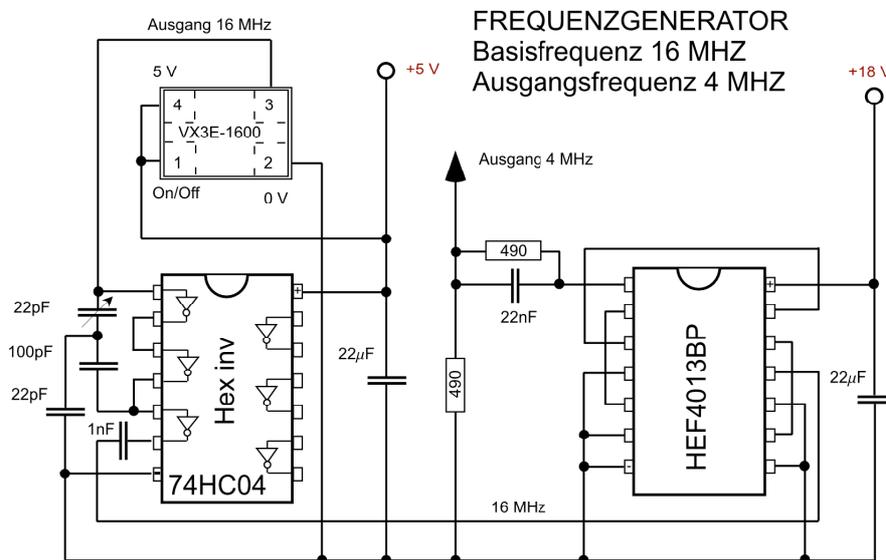
Ein genauer Torimpuls hält das so genannte „Tor“ für die zu messende Frequenz genau eine Sekunde lang offen. Um die geforderte Genauigkeit zu erzeugen, basiert die Schaltung auf einem 16 MHz Frequenzgenerator, dessen Ausgangsfrequenz (4MHz) in einer Kaskade bis auf eine Sekunde geteilt wird. Während dieser Sekunde gelangt das Signal direkt auf den Zählerbaustein. Der Zähler wird angewiesen die gemessene Frequenz in den Speicher zu bringen und diese Zahl weiterhin auch während der Messung des nachfolgenden Tores darzustellen. Durch diese Zwischenspeicherung wird eine stabile Darstellung und die Lesbarkeit am Display erst möglich. Alle Teiler werden anschliessend auf den Wert Null zurückgesetzt, die Anzeige bleibt erhalten, und es wird ein neuer Messvorgang eingeleitet, dessen Resultat nun wie vorher in den Speicher übernommen wird und während Messzeit des nächsten Tores in der Anzeige stehen bleibt. Das folgende Bild zeigt die Signale am IC 1, IC 2 und IC 6, die zur Displaysteuerung erforderlich sind.

Messzeit und Display-Steuerung



2.2 Der Frequenzgenerator

Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Frequenzgenerators, welcher eine Grundfrequenz von 4 MHz für den Eingang des IC 1 zur Verfügung stellt. Die Quarzfrequenz beträgt 16 MHz. Sie wird im IC HEF 4013 zwei Mal durch zwei geteilt.



Schema des Frequenzgenerators mit Ausgangsfrequenz 4 MHz

2.3 Die Signalverarbeitung

Die folgende Abbildung zeigt die Signalverarbeitung des Frequenz- und Zeitmessers sowie Ereigniszählers. Diese Signale steuern den integrierten Schaltkreis MM74C926, der eigentliche Vierdekadenzähler mit Zwischenspeicher, Decoder und Anzeigetreiber. Er steuert die sieben Segmente der Anzeigeeinheit bestehend aus den 8 Stellen. Die vier gemeinsamen Katoden der einzelnen Stellen werden über die 8 Transistoren periodisch im Multiplexbetrieb (nacheinander) mit Masse verbunden.

Die erforderliche genaue Torzeit erzeugt ein stabiler 16 MHz Quarzoszillator in Verbindung mit den 7 Dezimalzählern (IC 1, IC 3, IC 4, IC 5). In der obigen Darstellung des Signalverlaufs am IC 1 wird ersichtlich, dass durch Differenzierung und Ausblendung ein Rückstellimpuls (Reset) erzeugt wird, der den Zähler MM74C926 zur Messung vorbereitet. Am Ausgang 13 des IC 1 entsteht der genaue Torimpuls von einer Sekunde, der auf den Eingang (8 und 9) des IC 6 geführt am Ausgang den invertierten Impuls zeigt, der wiederum auf das UND Gatter des IC 2 gelangt. Dieses Signal erzeugt zusammen mit dem Eingang 6 das „automatische Reset“. Das Tor (8) und der Eingang (9) dieses UND Gatters erlauben die Frequenzmessung. Bei einem positiven Torimpuls wird das Eingangssignal (f_m) auf den Ausgang 10 von IC 2 auf den Zählereingang (12) des MM74C926 geschaltet. Nach Abschluss der Messung springt der Ausgang 14 des IC 1 auf H, sperrt den Takteingang 10 über ein 0V Signal an 9 und leitet gleichzeitig eine Verzögerung ein, die auf den Rückstelleingang 15 (IC1) wirkt. Ausserdem wird aus dem positiven Spannungsanstieg des Ausgangs 14, ein positiver Impuls zur Aktivierung des Zwischenspeichers (Anschluss 5 des MM74C926) gewonnen. Nach Ablauf der Verzögerungszeit (die positive Spannung an der Kapazität am IC 1 überschreitet den Schwellwert des Rückstelleingangs 15) werden alle Ausgänge auf Null zurückgesetzt und ein neuer Messvorgang eingeleitet.

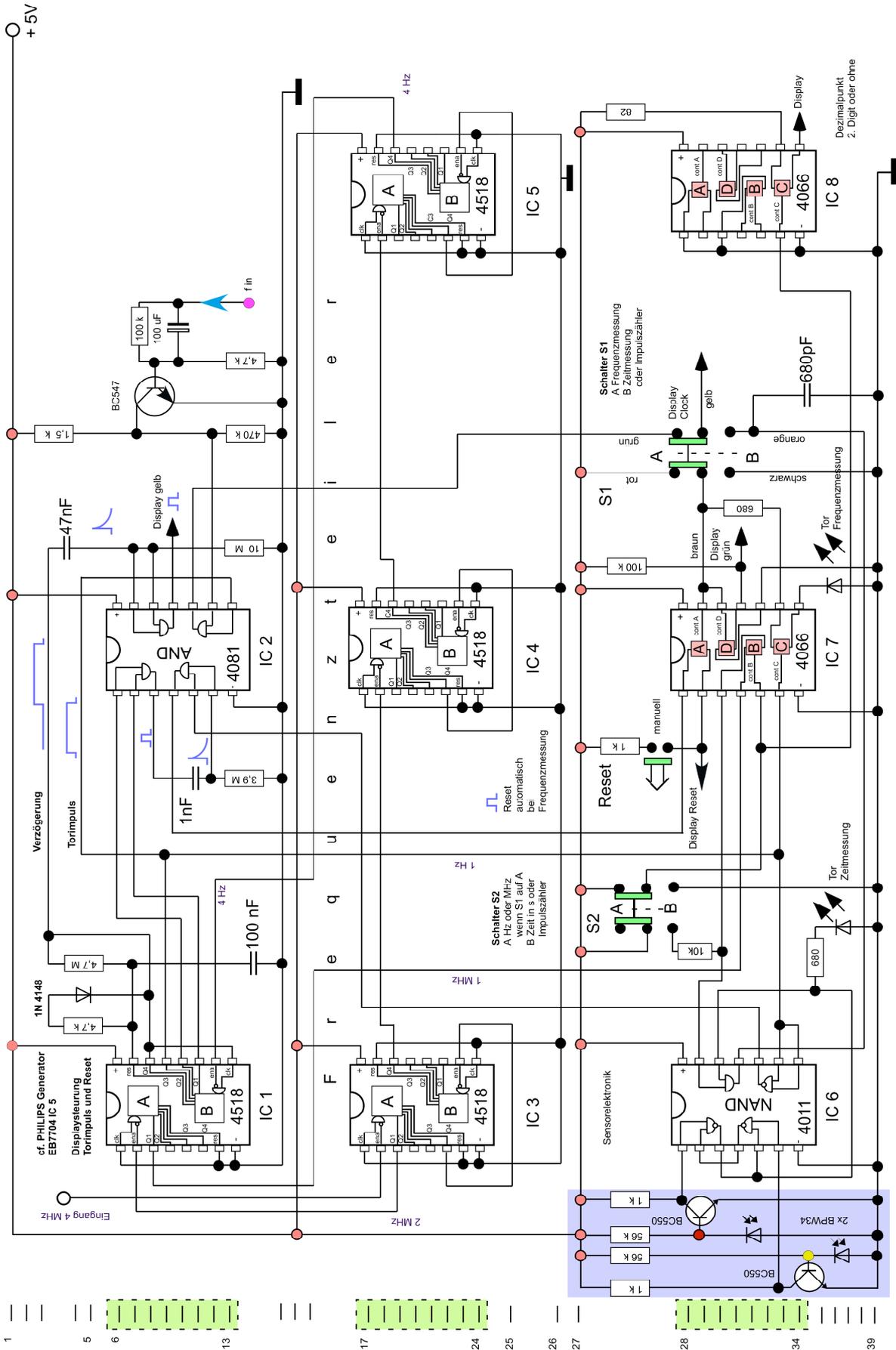
2.4 Der Schaltplan des Frequenzmessers, Zeitmessers und Ereigniszählers

Weil ein Frequenzmesser stets eine Torzeit intern besitzen muss, wird aus einem Frequenzmesser durch eine externe Torzeit und der Zeitbasis einer Mikrosekunde ein neues Gerät, die Stoppuhr. Die folgende Darstellung zeigt die Elektronik sowohl des Frequenzmessers, als auch der Stoppuhr, sowie des Ereigniszählers ohne den Zähler selbst. Wird anstelle der internen Uhr nur die Anzahl der Übergänge am Tor gezählt, dann erhält man den Ereigniszähler. Auch diese Messmöglichkeit ist im Schema enthalten. Die interne Uhr besteht aus einem 16 MHz Oszillator. In den Frequenzteilern IC1, IC 3, IC 4 und IC 5 wird die Frequenz auf 1 Sekunde geteilt. Die Start- und Stopplichtsensoren, liegen an den Eingängen von IC 6. Gatter A von IC 7 schaltet den Reset automatisch oder manuell, abhängig von der Schalterstellung S1. Ein manuelles Reset im Falle der Frequenzmessung hat keinen Einfluss auf den Zählerstand. Steht der Schalter S1 auf A, also der Frequenzmessung, dann kann mittels des Schalters S2 zwischen MHz und Hz Darstellung umgeschaltet werden (Dezimalpunktsteuerung). Ist S1 auf Position B (Zeitmessung oder Ereigniszähler), dann werden im Zähler entweder die Anzahl Mikrosekunden oder die Anzahl Ereignisse gezählt, die von den Lichtsensoren durchgelassen oder direkt als Ereignis detektiert werden. Damit die Einheit der Mikrosekunde zur Verfügung steht, wird aus dem Gatter A des IC 3 die durch 2 geteilte Grundfrequenz von 4 MHz auf das Gatter A des IC 1 gegeben, wo nochmals eine Division durch 2 erfolgt und am Ausgang Q1 steht die Mikrosekunde zur Verfügung. Das Gatter B von IC 7 kann diese Zeitbasis auf das NAND IC 6 (Gatter 4) senden, an dessen zweitem Eingang das Tor der Zeitmessung, gesteuert von den Lichtsensoren anliegt. Gatter 1 und 2 an IC 6 bilden ein klassisches bistabiles Flip-Flop, das von den beiden Lichtsensoren umgeschaltet werden kann. Die Umschaltung erfolgt nur unter gewissen Bedingungen. Ist der Stoppsensor unter Licht, dann schaltet der Startsensor beim Übergang von Hell auf Dunkel den Zähler ein. Dieser zählt die Mikrosekunden auch bei einem Dunkel-Hell-Übergang weiter.

Ist der Stoppsensor im Dunkeln, dann schaltet der Startsensor nur solange durch, wie er Dunkel registriert. Dieses Verhalten erlaubt uns später die Metallkugeln exakt zu positionieren.

Liegt der Startsensor im Dunkeln, dann kann der Stoppsensor keinerlei Umschalten bewirken. Zwei Leuchtdioden zeigen den Zustand des Tores an. Leuchtet die Diode, dann ist das Tor geöffnet und der Zähler misst. Ist die LED dunkel, dann wird die letzte Messung dargestellt. Der Zählerstand kann im Falle der Zeitmessung oder Ereigniszählung mit der Reset-Taste auf Null gestellt werden.

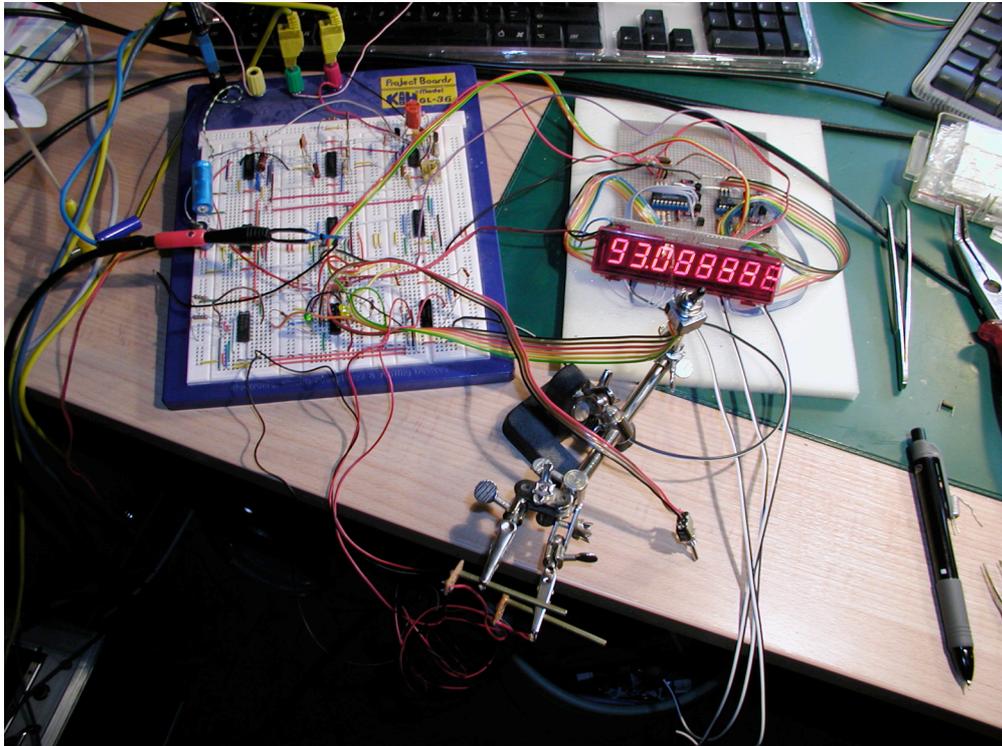
Frequenz-, Zeitmesser und Ereigniszähler mit Eingang für 4 MHz Quarzeitbasis



Schaltungsaufbau des Frequenz- und Zeitmessers sowie des Ereigniszählers auf einer Platine 100x160 mm

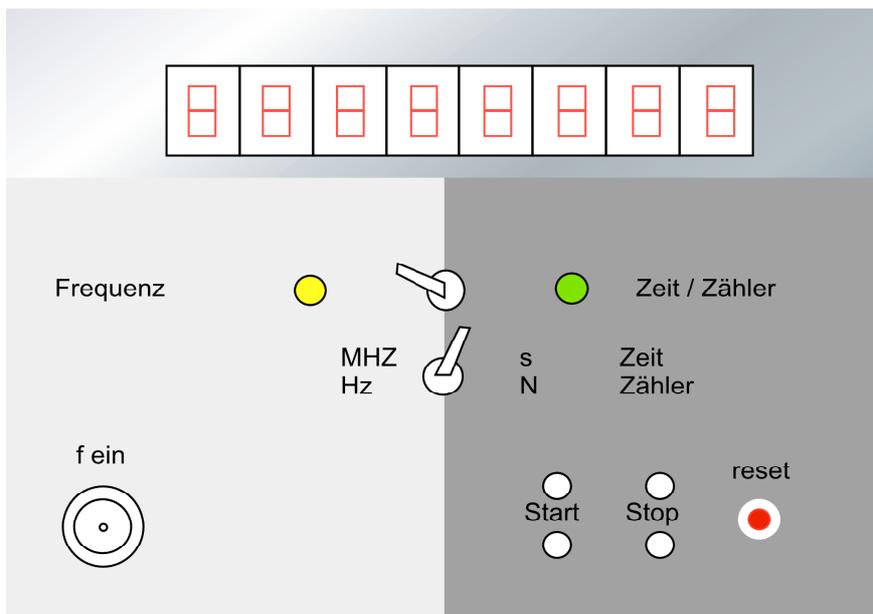
2.5 Der Aufbau der Schaltung auf dem Projektbord

Das nachfolgende Bild zeigt die obige Schaltung auf dem Projektbord zusammen mit dem Display des Zählers und den beiden Start- und Stoppsensoren im Vordergrund.



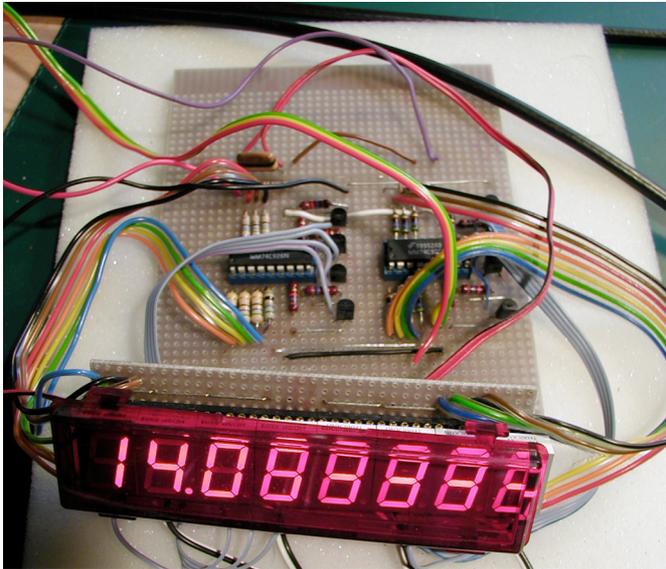
2.6 Die Gestaltung der Frontplatte

Auf der Frontplatte werden die Funktionen des Gerätes ersichtlich. Der Schalter S1 erlaubt die Wahl zwischen Frequenzmessung und Zeit- oder Ereignismessung. Der Schalter S2 hat zwei Funktionen in Abhängigkeit von der Schalterstellung S1.



2.7 Der Zähler und das Achtstellendisplay

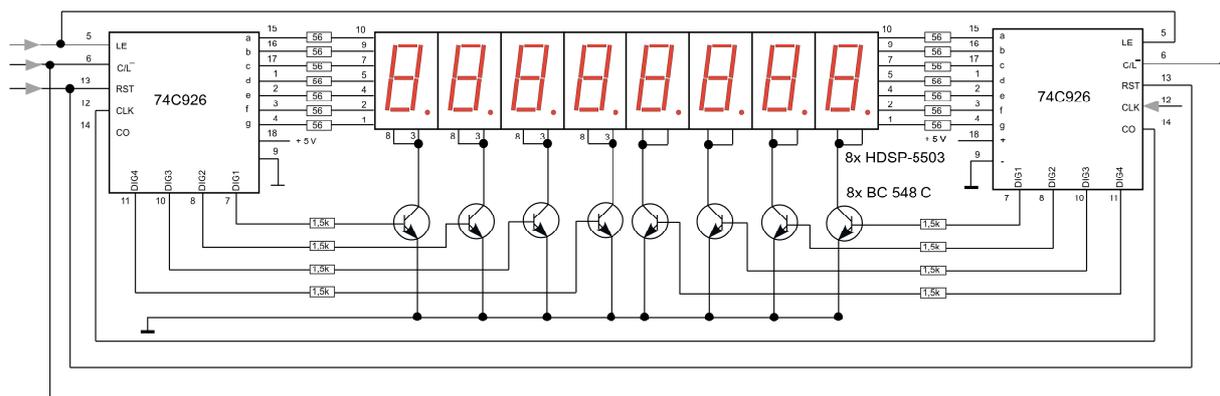
Grundlage des 8-stelligen Displays bildet der integrierte Baustein MM74C926. Er ist für Zählvorgänge mit vierstellige Anzeigen geeignet. Die hier verwendete Schaltung umfasst zwei dieser Elemente, die als Kaskade geschaltet sind. Der wesentliche Vorteil dieses integrierten Schaltkreises besteht in der sehr einfachen Steuerbarkeit.



Das Display und die beiden integrierten Schaltkreise

Die folgende Abbildung zeigt das Schaltschema der elektronischen Kaskadierung dieser beiden Bausteine. Am CLK Eingang des rechten Zählers, der für die vier rechten Digits verantwortlich ist, werden die Impulse der Hauptplatine gezählt. Der Überlauf dieses Zählers CO ist mit dem CLK Eingang des linken Zählers verbunden und steuert die linken 4 Stellen.

8 Stellen Zähler



Eingang 5: LE Latch Enable: Zwischenspeichern
Eingang 6: Display select

Elektronisches Schaltbild der Zählrichtung.

2.8 Das eingebaute Frequenz- und Zeitmessgerät und Zähler

Die nachfolgende Abbildung zeigt das fertige Messgerät mit den drei Messmöglichkeiten. Die Schalterstellungen sind auf Zeitmessung eingestellt. Weiter können Ereignisse gezählt oder Frequenzen bestimmt werden.



Das fertig gestellte Messgerät für Frequenz- und Zeitmessung sowie Ereigniszähler

3 Messungen des freien Falles von Metallkugeln

Die Fallstrecke wird senkrecht aufgestellt. Mit der Lehre für die Kugeln werden günstige Fallereignisse von ungünstigen unterschieden. Das Messgerät wird eingeschaltet, die Sensoren montiert. Zusätzlich wird eine Spannungsquelle von 5 V für die Lasermodule benötigt, die für eine genügende Lichtintensität gegenüber dem Lichtsensor sorgt. Eine zweite, variable Spannungsquelle 5V liefert den Strom für das Magnetfeld. Beide Spannungsquellen sind voneinander getrennt, um Störungen, die beim Abschalten des Magnetfeldes entstehen, von den Start- und Stoppsensoren fernzuhalten. Das Messgerät wird auf Zeitmessung eingestellt.

Vor jeder Messung wird die obere Halterung bei aufgehängter Fallmasse exakt auf die Schwelle des Startens der Uhr justiert. Der Vorgang passiert wie folgt. Das Magnetfeld wird eingeschaltet und die Metallkugel in den Sitz geschoben. Der Stopplightsensor wird abgedunkelt und die oberste Schraube so lange gedreht, bis die Einschaltsschwelle gerade nicht überschritten wird. Anschliessend wird der Stopplightsensor wieder dem Licht ausgesetzt und der Zähler mit der Reset-Taste auf Null gestellt. Die Starttaste im Gehäuse der Generatorspannungen schaltet das Magnetfeld aus und die Kugel passiert die Start-Lichtschranke. Die Kugel macht eine beschleunigte Bewegung innerhalb der Fallstrecke von ca. einem Meter und löst das Stoppsignal nach korrektem Fall durch die Lehre beim Passieren der Stopplightschranke aus. Im Experiment kommen zwei Eisenkugeln zum Einsatz. Die Tabelle im Kapitel 3.1 zeigt die Messresultate der Zeit t , der Zeitabweichung vom Mittelwert und den berechneten Wert der Erdbeschleunigung aus der Fallhöhe $h = 0,9975$ m einmal ohne Lehre und einmal mit Lehre:

$$h = \frac{g}{2} t^2 \Rightarrow g = \frac{2h}{t^2}$$

Die Lehre besteht aus einem Aluminiumblech, das für jede Kugel eine rechteckförmige Öffnung aufweist. Wir messen einmal mit Lehre und einmal ohne Lehre.

Kugel : $\varnothing 16 \text{ mm}$ *Öffnung :* $20,3 \text{ mm}$
Kugel : $\varnothing 22 \text{ mm}$ *ohne Lehre*

Die Lehre wird über dem Stoppsensor angeordnet. Mit ihr können günstige Ereignisse von ungünstigen Ereignissen unterschieden werden. Berührt die Kugel die Lehre beim freien Fall, dann ist die Zeitmessung sehr ungenau oder die Stopp-Lichtschranke wird von der Kugel nicht passiert. Ohne Lehre müsste die Fallstrecke bei kleinen Durchmessern der Kugeln mit einem Fehler des Radius der Kugel angenommen werden, was einen relativen Fehler in der Grössenordnung von 1 % bedeuten würde. Die Messungen ohne Lehre bedingen eine regelmässige Kontrolle des Lotes. Der Fehler mit Lehre ist im Falle kleiner Kugeln jedoch mindestens 5 mal kleiner, weil in jedem Fallversuch gute und schlechte Ereignisse eindeutig unterschieden werden können.

3.1 Zeitmessung, Abweichung vom Mittelwert der Zeit und Erdbeschleunigung g

Messung ohne Lehre

Messung mit Lehre

Durchm.	t	dt	g	Durchm.	t	dt	g
22 mm	0.450663	-0.000202	9.82288576	16 mm	0.451407	0.0002534	9.79053267
	0.451057	0.000192	9.8057326		0.450973	-0.0001806	9.80938585
	0.450684	-0.000181	9.82197037		0.450472	-0.0006816	9.83121733
	0.451125	0.00026	9.8027767		0.451408	0.0002544	9.7904893
	0.450796	-6.9E-05	9.81709045		0.451508	0.0003544	9.78615298
Mittelwert	0.450865		9.81409118	Mittelwert	0,451594		9.80155563
Max		0.00026	9.82288576	Max		0.0003544	9.83121733
Min		-0.000202	9.8027767	Min		-0.0006816	9.78615298

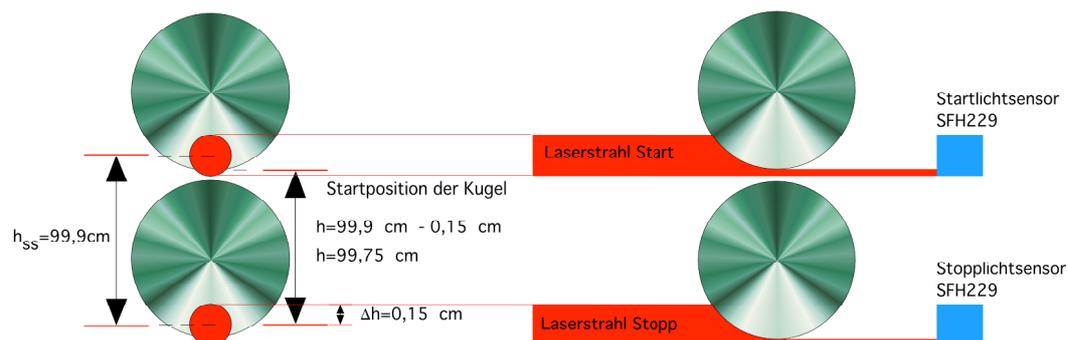
Die g -Wertbestimmung in Düringen auf 680 m ü M, vom 10. Oktober 2005 ergibt:

$$g = (9,81 \pm 0,03) \text{ m/s}^2$$

$$g = (9,81 \pm 0,05) \text{ m/s}^2$$

3.2 Mittelwerte und die maximale und minimale Abweichung vom Mittelwert

Aus der Zusammenfassung des Mittelwertes der Zeitmessung berechnet sich g in m/s^2 . Für die Fehlerrechnung werden weiter die Maximalwerte der Abweichungen benötigt. Die maximale Abweichung der Zeitmessung vom Mittelwert beträgt $\Delta t = \pm 0,0003 \text{ s}$ ohne Lehre und mit Lehre ist der Fehler $\Delta t = \pm 0,0007 \text{ s}$. Das zeigt, dass bei grossen Durchmessern der Kugeln die Lehre keine wesentliche Verbesserung der Messresultate bewirkt. Der Fehler der Fallhöhe ist der Radius der Bohrung für den Stoppsensor.



3.3 Fehlerrechnung

Wird der Fehler der Fallhöhe h als 1,5 mm angenommen, dann kann g aus dem Mittelwert aller Messungen und dem Fehler auf der Zeitmessung bestimmt werden.

$$t = 0.450865 \text{ s}; \quad \Delta h = \pm 1,5 \text{ mm}$$

ohne Lehre

$$\Delta t = \pm 0,0003 \text{ s}$$

$$h = \frac{g}{2} t^2 \quad \Rightarrow \quad g = \frac{2h}{t^2}$$

mit Lehre

$$\Delta t = \pm 0,0007 \text{ s}$$

Der relative Fehler der Erdbeschleunigung:

ohne Lehre

$$\frac{\Delta g}{g} = \pm \left(\frac{\Delta h}{h} + 2 \frac{\Delta t}{t} \right) = \pm \left(\frac{1,5}{997,5} + 2 \frac{0,0007 \text{ s}}{0,451500 \text{ s}} \right) = \pm 0,27\%$$

mit Lehre

$$\frac{\Delta g}{g} = \pm \left(\frac{1,5}{997,5} + 2 \frac{0,0007 \text{ s}}{0,451500 \text{ s}} \right) = \pm 0,45\%$$

Der absolute Fehler der Erdbeschleunigung:

ohne Lehre

$$\Delta g = \pm 0,03 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

mit Lehre

$$\Delta g = \pm 0,05 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Daraus folgt unser Messresultat:

ohne Lehre

$$\Rightarrow \quad \underline{\underline{g = (9,81 \pm 0,03) \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}}$$

mit Lehre

$$\underline{\underline{g = (9,81 \pm 0,05) \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}}$$

Das Resultat zeigt, dass es wichtiger ist eine Kugel mit grossem Durchmesser zu wählen, als mit der Lehre die Fallrichtung zu kontrollieren.

3.4 Eliminierung wesentlicher Fehlerquellen

In diversen Experimenten der Messung der Erdbeschleunigung g wird als Startsignal der Zeitpunkt des Unterbruchs des Stromes durch die Magnetfeldspule verwendet. Als Stoppsignal kommen häufig Mikrophone zur Anwendung. Weiter wird als Kurzzeituhr eine Zeitbasis einer Millisekunde verwendet. Hier sollen die Fehlerquellen beschrieben und wo möglich eliminiert werden.

Die erste Fehlerquelle ist in der Zeitmessung zu finden. In unserem Experiment wird eine Kurzzeituhr mit der Grundfrequenz eines Quarzes von 16 MHz verwendet und nicht wie üblich eine 1kHz Grundfrequenz.

Die zweite Fehlerquelle betrifft die Start- und Stoppeinrichtung. Die obgenannte Genauigkeit der Zeitmessung wirkt sich nur dann positiv aus, wenn der Startzeitpunkt unabhängig vom Zeitpunkt des Abschaltens des Stromes durch die Magnetfeldspule erfolgt. Diese Verbesserung wird in diesem Experiment durch einen Lichtsensoren erreicht, der das Startsignal erst dann auslöst, wenn die Kugel tatsächlich fällt. Das Remanenzfeld des Elektromagneten wirkt noch während ca. 0,01 Sekunden, abhängig von der Intensität des Stromes, der die Spule durchflossen hat.

Die dritte Fehlerquelle betrifft die Fallstrecke. Der freie Fall soll senkrecht erfolgen. Das Lot muss kontrolliert und eine Lehre kurz vor dem Stoppsensors eingebaut sein, so dass günstige von ungünstigen Ereignissen unterschieden werden können. Die Fallehre besteht aus einer Metallplatte mit rechteckiger Öffnung mit Durchmesser der Kugel plus 2 mm. Jede Kugel, die ohne die Lehre zu berühren das Stoppsignal auslöst, wird berücksichtigt. Das Experiment zeigt, dass die Lehre nur für kleine Kugeldurchmesser eine Notwendigkeit ist.

Die vierte Fehlerquelle betrifft den Stoppsensor. In diversen Experimenten wird der Aufprall durch ein Mikrophon gemessen und als Stoppsignal interpretiert. Die Laufzeit der Schallwelle für die Distanz von 10 cm bis 30 cm bewirkt einen Fehler in der Größenordnung von +0,3 ms bis +0,9 ms. Zu diesem Fehler kommt die Aktivierungszeit der Membran hinzu. In unserem Experiment wird ein Lichtsensor gleich wie der Startsensor verwendet, der eine Reaktionszeit $< 1 \mu s$ aufweist.

Die fünfte Fehlerquelle betrifft den Luftwiderstand auf die Eisenkugeln. Durch die Verwendung einer kurzen Fallstrecke von 1 m ist der Einfluss des Luftwiderstandes, der für kleine Geschwindigkeiten proportional zur Fallgeschwindigkeit ist, vernachlässigbar. Dieser Fehler ist im Fehler der Zeitmessung eingeschlossen.

3.5 Schlussfolgerungen

Das Resultat zeigt, dass auch mit einem vernünftigen Messaufwand der Mittelwert der Erdbeschleunigungskonstante g korrekt gemessen werden kann. Die relative Messfehler liegt bei 0,5%. Eine nicht unwesentliche Verbesserung der Messresultate kann mit der Lehre erzielt werden, wenn Kugeln mit kleinen Durchmessern verwendet werden, weil nur Ereignisse berücksichtigt werden, bei denen die Kugel die Lehre nicht berührt hat. Allgemein ist die Messung mit einer grossen Kugel ohne Lehre einer Messung mit kleinen Kugeln mit Lehre vorzuziehen. Der Grund liegt darin, dass der Anteil der Verdunkelung der Sonde durch eine Kugel mit grossem Durchmesser auch bei leicht schiefen Fallstrecken besser definiert bleibt.

Das Experiment zeigt, dass selbst durch die Möglichkeit der Messung im Bereich von Mikrosekunden noch viele Unsicherheits- und Störfaktoren auftreten, welche eine kleinere Streuung um den Mittelwert nicht zulassen. Genauere Messungen können nach der Methode von Cavendish erreicht werden.

Inhaltsverzeichnis

1	ZÄHLER, FREQUENZMESSER UND STOPPUHR	2
1.1	BEMERKUNGEN ZUR MESSTECHNIK.....	2
1.2	DIE KOMPONENTEN DES MECHANISCHEN AUFBAUS.....	2
1.3	DIE ELEKTRISCHEN LICHTSENSOREN	2
1.4	DAS MESSGERÄT	3
2	DER ELEKTRONISCHE AUFBAU DES FREQUENZ-, ZEITMESSERS UND EREIGNISZÄHLERS	3
2.1	DIE SIGNALAUFBEREITUNG FÜR DIE ANZEIGE	4
2.2	DER FREQUENZGENERATOR	5
2.3	DIE SIGNALVERARBEITUNG	5
2.4	DER SCHALTPLAN DES FREQUENZMESSERS, ZEITMESSERS UND EREIGNISZÄHLERS	6
2.5	DER AUFBAU DER SCHALTUNG AUF DEM PROJEKTBOARD	8
2.6	DIE GESTALTUNG DER FRONTPLATTE	8
2.7	DER ZÄHLER UND DAS ACHTSTELLENDISPLAY	9
2.8	DAS EINGEBAUTE FREQUENZ- UND ZEITMESSGERÄT UND ZÄHLER.....	10
3	MESSUNGEN DES FREIEN FALLES VON METALLKUGELN	11
3.1	ZEITMESSUNG, ABWEICHUNG VOM MITTELWERT DER ZEIT UND ERDBESCHLEUNIGUNG G	12
3.2	MITTELWERTE UND DIE MAXIMALE UND MINIMALE ABWEICHUNG VOM MITTELWERT	12
3.3	FEHLERRECHNUNG	13
3.4	ELIMINIERUNG WESENTLICHER FEHLERQUELLEN	13
3.5	SCHLUSSFOLGERUNGEN	14