Vorlesung Experimentalphysik I am 16.10.2000 und 17.10.2000 J. Ihringer

1 Mechanik

Die Mechanik ist die Lehre von der Bewegung und Verformung von Körpern unter dem Einfluß von Kräften. In der „Mechanik der Massenpunkte“ abstrahiert man den realen Körper auf einen einzigen Punkt, eben seinen Massenpunkt, in dem man sich die Masse des Körpers vereinigt denkt. Die Gestalt des Körpers und dessen sonstigen Eigenschaften bleiben unberücksichtigt. Auf diese Weise sind Bewegungsabläufe entlang irgendwelcher Bahnen besonders einfach zu beschreiben. Allerdings kommt dieses Bild schon bei der Beschreibung von Rotationen realer Körper an seine Grenzen.

Man weiß etwa aus dem Spiel mit einem Kreisel, daß für Rotationsbewegungen besondere Gesetze gelten. Offensichtlich genügt zur Berechnung der Kreiselbewegung die Abstraktion des Kreisels auf einen Punkt mit der einzigen Kenngröße „Masse“ nicht mehr. Man kann die Rotation zwar als eine kollektive Bewegung mehrerer einzelner Massenpunkte entlang den der Kreisbewegung entsprechenden Bahnen auffassen, allerdings ist die mathematische Bearbeitung der simultanen Bewegung mehrerer Teilchen sehr aufwendig. Um das „Einteilchenbild“ beizubehalten ordnet man dem Körper neben seinem Massenpunkt, der dann „Schwerpunkt“ genannt wird und sich durch eine bestimmte Lage im Körper auszeichnet, als weitere Eigenschaft seine „Trägheitsmomente“ bezüglich der Achsen in unterschiedlichen Richtungen zu. Die formale Behandlung der Rotationsbewegung ist das Thema der „Mechanik des starren Körpers“.

Ein weiterer Schritt zum realen Körper ist die Berücksichtigung seiner Elastizität in der „Mechanik deformierbarer Medien“. Hier werden Phänomene behandelt, die mit der Viskosität der Materialien zusammenhängen. Sie reichen von der Biegung eines Balkens unter Last bis zum Zusammenhang zwischen Druck und Fließgeschwindigkeit in Aero- und Hydrodynamik.

Eine ganz besondere Bewegungsart sind „Schwingungen und Wellen“, denen in der Mechanik ein besonderes Kapitel gewidmet ist. Schwingungen, die in allen Bereichen der Physik auftreten, sind etwas ganz Besonderes, weil sich jedes schwingende System durch eine individuelle Zeitkonstante, der „Periode der Schwingung“, auszeichnet. Schwingungen verlaufen im Idealfall - der auch in der Realität gut genähert werden kann - ohne Energieverbrauch. Beim Bewegungsablauf „schwappt“ die Energie zwischen unterschiedlichen Formen hin und her, bei einer Schaukel z.B. zwischen kinetischer und potentieller Energie. Der geringe Energieverbrauch der Schwingung ist an einer Uhr mit Pendel gut zu illustrieren: Sie läuft- tage oder wochenlang nach einmaligem Aufziehen ihrer Feder. Denkt man sich die Feder als Antrieb eines Fahrzeugs für dessen Fahrt auf irgendeiner Bahn, so weiß man aus Erfahrung, daß die Bewegung nur einige Sekunden dauert. In der Natur kennt jeder mechanische Schwingungen der Luft als Schall, aber auch in Form oszillierender Bewegungen der Flügel von Insekten, die mit dieser Bewegungsart bei minimalem Energieverbrauch weite Strecken zurücklegen.

Die „Wärmelehre“ beschließt die Mechanik. Hier stehen die Gase im Vordergrund. Die Hauptsätze der Wärmelehre sowie Arbeitsweise und optimaler Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen werden gezeigt. Die „kinetische Gastheorie“ leitet schließlich die Begriffe der Thermodynamik, z.B. die Temperatur, aus den Verteilungen der kinetischen Energie der einzelnen Teilchen ab. Man erkennt dabei, daß der Mittelwert des Verhaltens vieler Individuen eine stabile Größe ist, ungeachtet der Möglichkeit der Abweichungen vom Mittelwert, den „Fluktuationen“, für deren Größenordnung die Wahrscheinlichkeit abgeschätzt werden kann.

Zahlenwerte und die Wahrscheinlichkeit, bei Wiederholung der Situation den gleichen oder einen ähnlichen Wert zu erhalten, sind Thema des folgenden Abschnitts.

1.1 Verteilungen, Messen und Masseinheiten

Die Aussagen der Naturwissenschaften und der Medizin beruhen auf Beobachtungen, den Messungen. Meßwerte können Resultate der Ablesung von Instrumenten oder Skalen sein oder Ergebnisse der Abzählung irgendwelcher Ereignisse. In jedem Fall muss das Ergebnis einer einzigen Messung – ohne jede weitere Information – als zufällig angesehen werden. Man denke z. B. an eine Lotterie, bei der man nur ein einziges Los zieht: Gewinnt man, so wäre die Annahme verfrüht, jedes Los würde gewinnen. Gewinnt man nicht, dann wäre es ebenso falsch, anzunehmen, es gibt überhaupt keinen Gewinn. Die Gewinn/Verlustverteilung der Lotterie erkennt man erst bei wiederholter Teilnahme. Auf die Naturgesetze übertragen schreibt Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) an Jakob Bernoulli (1655-1705): *„Die Gewohnheiten der Natur erkennt man eben erst durch häufiges Beobachten“.*

Wiederholt man eine Messung bei gleichbleibenden Versuchsbedingungen öfter, dann kann man die unterschiedlichen Ergebnisse in einer Tabelle aufschreiben: Die erste Spalte enthält die Nummer der Beobachtung, die zweite den dazugehörigen Messwert. Anschaulich wird die in einer Tabelle enthaltene Information durch eine Grafik vermittelt. Als naheliegende Darstellung trägt man die Nummer der Messwerte als Abszisse und die Messwerte als Ordinate auf.

1.1.1 Das Histogramm

Eine andere Darstellung erhält man, wenn der Wertebereich der Messwerte in gleich große Intervalle aufgeteilt wird. Man wählt die Breite der Intervalle so groß, dass auch mehrere Ergebnisse in das gleiche Intervall fallen. Als Histogramm bezeichnet man eine Darstellung, bei der man in einem Koordinatensystem die Intervalle als Abszisse und die Anzahl der in die Intervalle fallenden Messwerte als Ordinate aufträgt.

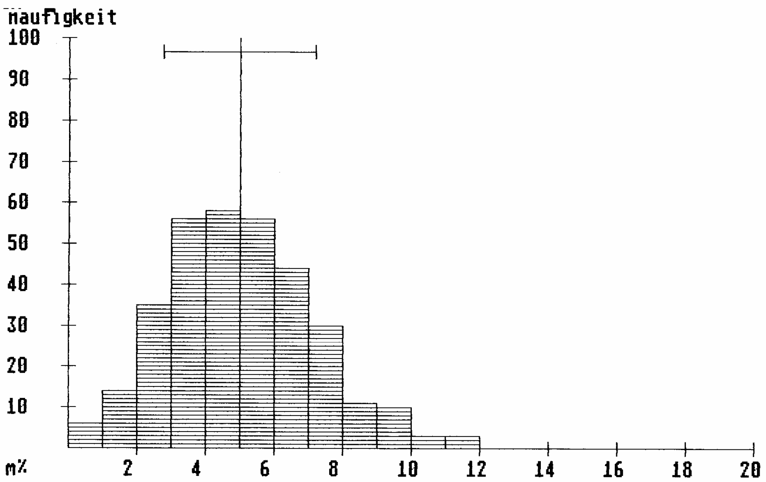


Abbildung 1 Histogramm der Ergebnisse von 250 Beobachtungen eines Ereignisses mit Mittelwert 5. Mittelwert 5 und Standardabweichung $\sqrt{5}$ sind eingezeichnet

Versuch 1 Zeitlicher Verlauf der Lautstärke und Histogramm der Lautstärkeverteilung im Hörsaal.

1.1.2 Mittelwert und Standardabweichung

Soll ein Zahlenwert eine Situation charakterisieren, dann muß auch die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, bei Wiederholung den gleichen oder einen ähnlichen Wert zu erhalten. Diese Information liefert die „Standardabweichung“.

Bei Zahlenangaben im täglichen Leben, z. B. 72 cm bei Messung der Höhe eines Tischs, wird die Standardabweichung durch die Rundung angezeigt: Man erwartet, bei Wiederholung der Messung den gleichen Wert zu erhalten.

Gibt es Erfahrung mit einer Meßmethode, dann wird für einen einzigen Messwert die Standardabweichung aus der Erfahrung angegeben. Fehlen die Erfahrungswerte, dann muß die Standardabweichung aus mehrfacher Wiederholung der Messung ermittelt werden: Dabei gewinnt man zusätzlich den Mittelwert der Meßergebnisse.

Mittelwert und Standardabweichung charakterisieren jede Meßreihe, unabhängig von der Gestalt des Histogramms.

Formel	Anmerkung
$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i$	Mittelwert aus n Beobachtungen der Messgrösse x_i
$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (\mu - x_i)^2$	Quadrat der Standardabweichung σ
x_i	Messwert Nr. i
n	Anzahl der Messungen
$\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	Standardabweichung des Mittelwerts μ

Tabelle 1 Definition des Mittelwerts und der Standardabweichung einer Messreihe mit n Messwerten und die daraus abgeleitete Standardabweichung des Mittelwerts.

Der Mittelwert μ zeigt die Abszisse des Schwerpunkts der Fläche des Histogramms. Die Standardabweichung σ sagt aus, daß bei vielen, wiederholten Beobachtungen in 68% aller Fälle mit einem Wert zwischen $\mu - \sigma$ und $\mu + \sigma$ zu rechnen ist. Weiter als 3σ vom Mittelwert entfernt liegende Messwerte sind praktisch nicht zu erwarten. Ergibt eine Messung doch ein Ergebnis außerhalb $\mu \pm 3\sigma$, dann kann nur die mehrmalige Wiederholung mit erneuter Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung zeigen, ob das Ergebnis zufällig so weit entfernt vom anfangs angenommen Mittelwert lag oder ob sich, aufgrund veränderter Versuchsbedingungen, der Mittelwert verschoben hat.

Messwert zwischen:	Wahrscheinlichkeit für diesen Messwert:
$\mu - \sigma$ und $\mu + \sigma$	In 68% aller Beobachtungen
$\mu - 2\sigma$ und $\mu + 2\sigma$	In 95% aller Beobachtungen
$\mu - 3\sigma$ und $\mu + 3\sigma$	In 99,7% aller Beobachtungen

Tabelle 2 Wahrscheinlichkeit, bei einer einzelnen Messung einen Messwert zu erhalten, der weniger als das 1-, 2-, 3-fachen der Standardabweichung vom Mittelwert entfernt liegt.

Für die Standardabweichung des Mittelwerts, $\mu/\sqrt{n}$, gilt das gleiche, wenn in der Tabelle Beobachtungen durch „Wiederholung der ganzen Messreihe" ersetzt wird.

Zu Mittelwert und Standardabweichung gibt es entsprechende Begriffe in der Mechanik: Wird das Histogramm als Massenverteilung interpretiert, dann entspricht der Mittelwert dem Schwerpunkt, der Standardabweichung das Trägheitsmoment dieser Verteilung bei Rotation um eine senkrecht zur Abszisse stehende, durch den Schwerpunkt verlaufende Achse.

1.1.2.1 Beispiel für Mittelwert und Standardabweichung

Als Beispiel diene die Anzahl der Möwen, die in der Umgebung eines Schiffes in einer bestimmten Richtung unter einem bestimmten Raumwinkel im Takt einiger Sekunden beobachtet werden.

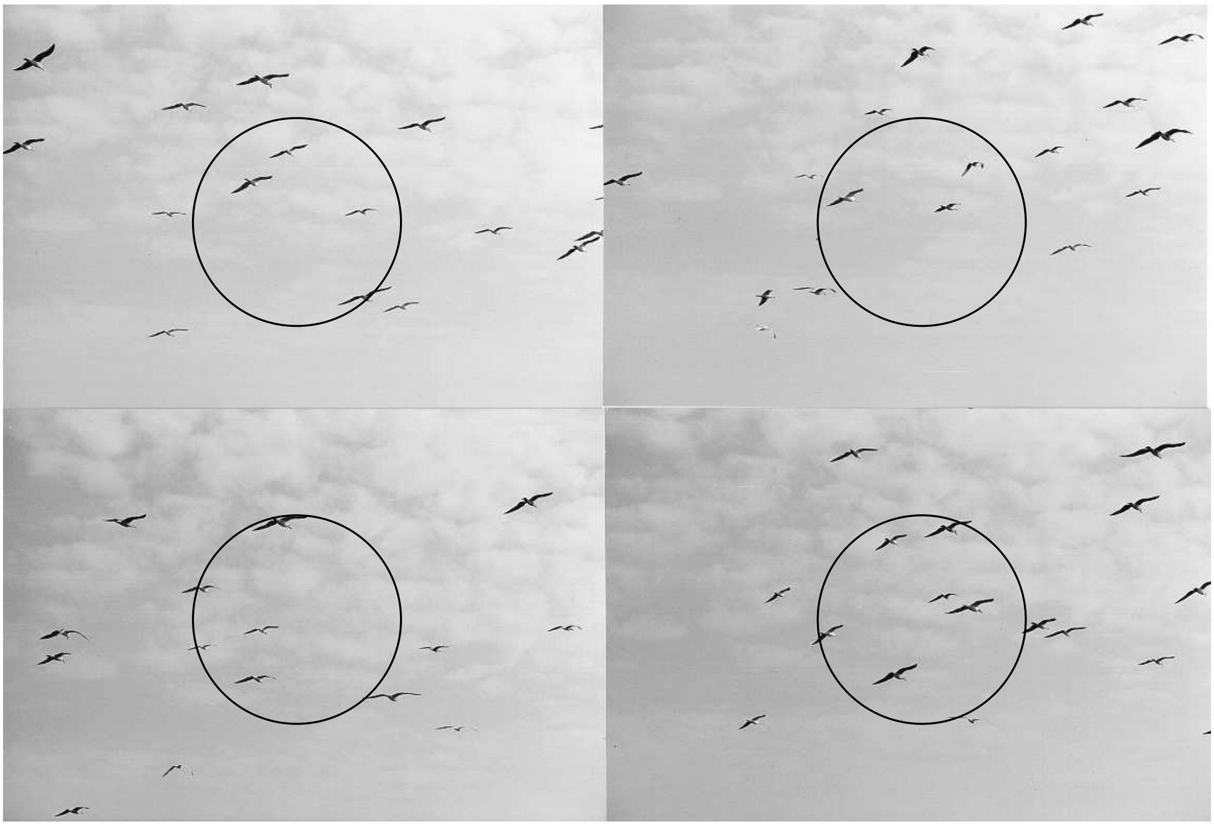


Abbildung 2 Möwen im gleichen Raumwinkel, beobachtet nach jeweils 3 Sekunden.

Aus den Ergebnissen der Beobachtungen kann der Mittelwert bestimmt werden, der sich im Beispiel zu 4,5 ergibt:

Beobachtung Nr.		Anzahl
1		4
2		3
3		5
4		6
Mittelwert	$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i$	4,5

Tabelle 3 Berechnung des Mittelwerts aus 4 aufeinanderfolgenden Beobachtungen

Für die Standardabweichung erhält man im „Möwen“ System $\sigma = 1{,}3$. Man erwartet demnach, daß sich die einzelnen Beobachtungen um weniger als $\pm 3\sigma \approx \pm 4$ vom Mittelwert 4,5 unterscheiden: Bei jeder folgenden Beobachtung sollte deshalb die Anzahl der Vögel zwischen 1 und 9 liegen, wenn die Annahme des Mittelwerts 4,5 und der Standardabweichung 1,3 gerechtfertigt ist.

Beobachtung Nr .i	Anzahl x_i	Mittelwert- Anzahl $\bar{x} - x_i$	(Mittelwert-Anzahl)^2 $(\bar{x} - x_i)^2$
1	4	-0,5	0,25
2	3	-1,5	2,25
3	5	0,5	0,25
4	6	1,5	2,25
Quadrat der Standardabweichung	$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (\bar{x} - x_i)^2$		1,7
Standardabweichung der einzelnen Messung	σ		1,3
Standardabweichung des Mittelwerts	$\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$		0,65

Tabelle 4 Berechnung der Standardabweichung zu den Beobachtungen aus Tabelle 1 und der Standardabweichung zum Mittelwert.

1.1.3 Verteilungen

Die im Histogramm dargestellten Messwerte nennt man auch ihre Verteilung (auf die Intervalle der Abszisse). Die Form der Verteilung ist zunächst beliebig. Eine Verteilung beantwortet die Frage „wie oft?“. Genauer: Wie oft wurde (oder würde) bei vielen Messungen einer Größe ein Wert im Intervall zwischen x und $x + \Delta x$ beobachtet?

Bei sehr vielen Beobachtungen kann die Form des Histogramms durch eine glatte Kurve angenähert werden. Ist $f(x)$ eine Funktion, die diese Kurve beschreibt, dann wird sie so normiert, daß das Integral über alle Werte x der Abszisse „1“ ergibt. Für die Wahrscheinlichkeit dw, einen Meßwert im Intervall zwischen x und $x + dx$ der Abszisse zu finden, gilt dann:

$dw = f(x) \cdot dx$	Wahrscheinlichkeit, einen Wert im Intervall zwischen x und $x + dx$ anzutreffen

Für Verteilungen gibt es zwei wichtige Spezialfälle:

- Messungen einer beliebigen Größe, bei der nur zufällige „Fehler" auftreten, zeigen im Grenzfall unendlich vieler Beobachtungen die *Gaußverteilung*. (http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V1_1A_Gauss.DOC)

- Bei *Abzählung* von voneinander unabhängigen, zufällig eintretenden Ereignissen, wie im Beispiel der Zahl der Möwen in einem bestimmten Raumwinkel, zeigen die Zahlen im Grenzfall unendlich vieler Beobachtungen die *Poissonverteilung*. In dieser Verteilung ist die Standardabweichung $\sigma = \sqrt{\mu}$ eine Funktion des Mittelwerts μ. Liegt der Mittelwert μ etwa über 20, dann kann die Poissonverteilung durch eine Gaußverteilung mit $\sigma = \sqrt{\mu}$ angenähert werden. (http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V1_1A_Poisson.DOC)

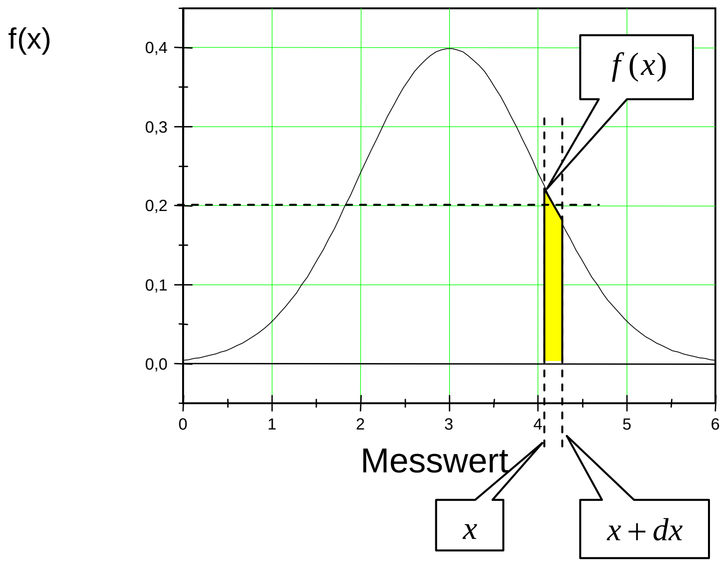


Abbildung 3 Interpretation einer Verteilung: Ist $x = 4{,}1$ *und* $dx = 0{,}15$, *dann liegen bei insgesamt 1000 Beobachtungen* $1000 \cdot f(x) \cdot dx = 1000 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}15 = 30$ *Meßwerte zwischen* $x = 4{,}1$ *und* $x + dx = 4{,}25$. *Die Wahrscheinlichkeit dieser Meßwerte entspricht der mit der Zahl der Beobachtungen multiplizierten gelben Fläche unter der Kurve. (Die Kurve in diesem Beispiel zeigt die Gaußverteilung)*

Versuch 2 On-line Erzeugung des Histogramms zur Poisson-Verteilung aus der Simulation von etwa 250 Abzählungen von Ereignissen mit Mittelwert 5. (Prog. HIST_POI.GFA mit Datei POI_VERT.DAT, letztere wird mit POIVER.GFA erzeugt)

Die aus den Messwerten bestimmten Mittelwerte und Standardabweichungen zeigen nur dann Information über den „wahren Wert", wenn die Messung nicht durch systematische Fehler beeinflußt ist. Ein systematischer Fehler ergibt sich z. B. aus der Parallaxe bei der Ablesung eines Instruments.

Versuch 3 Parallaxe bei der Ablesung einer Skala. Eine Skala wird schräg an die Wand projiziert.

1.1.4 Die Einheiten der physikalischen Grundgrößen

Die Ergebnisse einer Messung werden in Anzahl der Einheiten einer für das Problem geeigneten Größe angegeben. Im Rahmen der Mechanik lassen sich alle Meßergebnisse auf drei Grundgrößen zurückführen, die im „Internationalen Einheitensystem“ dem SI-System (Système Internationale d’Unités), festgelegt sind. Man beachte, daß die Definition der Länge auf die der Zeit zurückgeführt ist. Ursprünglich war die Länge des Meters als der $1/4 \cdot 10^{-7} \cdot$ Teil der Länge des Erdmeridians durch die Sternwarte in Paris definiert. Die Zeit ist über die Schwingungsdauer eines Cäsium Isotops definiert, also einer Naturkonstanten.

Grundgröße	Si-Einheit		
	Zeichen	Name	Definition
Länge	m	Meter	1 m ist die Strecke, die das Licht im Vakuum in $\frac{1}{299792485}$ s zurücklegt
Zeit	s	Sekunde	1 s ist die Zeit für 9192631770 Schwingungen des $^{133}_{55}$Cäsium Isotops beim Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes (magnet. Kernresonanz)
Masse	kg	Kilogramm	Urkilogramm in Bureau International des Poids et Mesures in Paris Sèvres.

Tabelle 5 Grundgrößen der Mechanik

Grundgröße	Si-Einheit		
	Zeichen	Name	Definition
Elektrische Stromstärke	A	Ampere	Die Stromstärke in zwei parallel zueinader angebrachten Leitern im Abstand von 1m beträgt 1 A, wenn die Ströme, bezogen auf die Länge 1m die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ N aufeinander ausüben
Temperatur	K	Kelvin	Zwischen dem Nullpunkt der thermodynamischen Temperaturskala (abolu-ter Nullpunkt) und dem Tripelpunkt des Wassers liegen 273,15 K
Stoffmenge	mol	Mol	1 mol eines Stoffes ist die Menge des Stoffes, die *ebensoviele Teilchen* enthält, wie Atome in $^{12}\!/_{1000}$ kg des Nuklids ^{12}C enthalten sind.
Lichtstärke	cd	Candela	Lichtstrom, der von $^{1}\!/_{60}$ cm^2 eines schwarzen Körpers bei 2042 K, der Schmelztemperatur von Platin, ausgeht

Tabelle 6 Grundgrößen für die übrigen Gebiete der Physik

Der Schwachpunkt des SI Systems ist die Einheit der Masse, die ursprünglich als Masse eines Kubikdezimeters Wassers eingeführt wurde. Es gibt 6 Ur-kg Stücke, deren Massen sich aber, vor etwa 100 Jahren aus Platin-Iridium gegossen, aus nicht ganz einsichtigen Gründen zeitlich verändern. Inzwischen unterscheiden sie sich um 20σ, wobei σ die Standardabweichung des Meßverfahrens ist. Man sucht deshalb nach einer neuen Definition, etwa über die Masse einer bestimmten Anzahl von Goldionen, weil es von Gold nur ein Isotop gibt. Die Abzählung kann über den Ionenstrom erfolgen, es wird solange gezählt, bis ein Goldstück mit wägbarer Masse entstanden ist.

Es sei daran erinnert, daß Winkel im Grad- oder im Bogenmaß angegeben werden. Das Bogenmaß ist das Verhältnis des Kreisbogens über dem Winkel zum Radius des Kreises. Es ist also eine dimensionslose Zahl, es trägt den Namen Radiant (rad). Analog ist der Raumwinkel definiert: Man betrachtet ihn als den Öffnungswinkel eines geraden Kreiskegels mit der Spitze im Mittelpunkt einer Kugel. Seine Größe wird als das Verhältnis der Fläche der von ihm an der Oberfläche ausgeschnittenen Kalotte zum Quadrat des Radius der Kugel angegeben. Als Beide Winkelangaben sind Verhältnisse und deshalb dimensionslos. Bei Kontrolle der Einheiten können beide „1“ gesetzt werden.

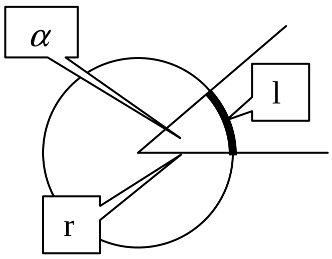
Winkel		
Radiant		Umrechnung in Grad
$\alpha = \frac{l}{r}$ rad		$1\,\text{rad} = \frac{360^0}{2\pi} = 57{,}295^0$

Tabelle 7 Definition des Winkels Radiant

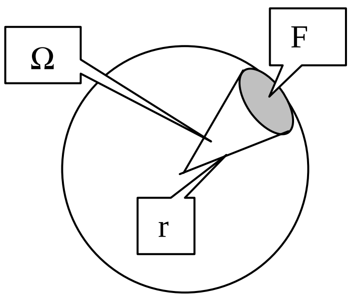
Raumwinkel		
Steradiant		
$\Omega = \frac{F}{r^2}$ sr		

Tabelle 8 Definition des Raumwinkels Steradiant

1.1.4.1 Abkürzungen zur Bezeichnung unterschiedlicher Größenordnungen

Bezeichnung	Abkürzung	Zehnerpotenz	Beispiel
Tera-	T	10^{12}	
Giga-	G	10^{9}	60 Gigawatt: El. Leistungsbedarf in Deutschland 3 Gigawatt: El. Leistung der Niagarafälle
Mega-	M	10^{6}	0,75 Megawatt: El. Leistung des Flußkraftwerks am Neckar in Tübingen, Bismarkstraße
Kilo-	k	10^{3}	
Milli-	m	10^{-3}	
Mikro-	μ	10^{-6}	
Nano-	n	10^{-9}	0,1 nm: Größenordnung der Atomdurchmesser In 1 ns bewegt sich das Licht 30 cm weit
Pico-	p	10^{-12}	
Femto-	f	10^{-15}	1 fm= 1 Fermi: Größenordnung der Atomkerne

Tabelle 9 Abkürzungen für unterschiedliche Größenordnungen

1.1.5 Messung der Zeit

Die Zeit wird durch Abzählung der Perioden in periodisch wiederkehrenden Vorgängen gemessen. Man denke etwa an die Angabe von Jahren, Tagen oder der Bruchteile von Tagen, den Stunden, Minuten und Sekunden. Periodische Vorgänge sind die Umläufe von Planeten und Monden, aber auch die Schwingungen von Pendeln und elektromagnetischen Schwingkreisen, z. B. im Bereich der Radiowellen. Auch Atome in Kristallgittern können mit einer definierten Periode schwingen, die Strahlung liegt im Bereich des Infraroten Lichtes. Ebenso senden die Elektronen der Atome beim Übergang zwischen zwei Energieniveaus Schwingungen mit für den Übergang spezifischer Periode aus, in äußeren Schalen bis zum Bereich des sichtbaren Lichts, in inneren Schalen im Bereich der Röntgenstrahlung. Auch beim Kernzerfall wird Strahlung ausgesandt, harte Röntgen und γ Strahlung mit für den Zerfallsprozess spezifischer Periode.

Natur und Technik stellen Uhren konstanter Perioden auf unterschiedlicher Zeitskalen bereit, die sich, in den oben genannten Beispielen, über etwa 30 Zehnerpotenzen erstrecken. Eine Übersicht über das elektromagnetische Spektrum findet sich in http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V8_1Huygens.DOC. Die Zeitmessung wird zur *Abzählung,* wenn man die Perioden einer Schwingung zählt, die in das zu messende Zeitintervall fallen. Zu jedem Zeitintervall kann man die passende Uhr wählen, deren Periode nicht zu groß sein soll, weil die Standardabweichung des Ergebnisses in der Größenordnung einer Schwingungsdauer liegt. Zur Definition der Sekunde verwendet man deshalb einen inneratomaren Absorptionsvorgang in einem Cäsium Isotop, bei dem elektromagnetische Strahlung im Bereich der Radiowellen absorbiert wird und zählt 9192631770 Schwingungen ab. Die Standardabweichung der Sekunde liegt in der Größenordnung von 1/9192631770 $\approx 10^{-10}$ s.

Versuch 4 Schwingungsdauer eines Pendel. Die Schwingungsdauer (1 s) ist unabhängig von der Auslenkung.

1.1.6 Messung der Länge

Auch die Messung der Länge kann auf die *Abzählung* von Perioden zurückgeführt werden. Ist die Wellenlänge durch einen elementaren Prozeß definiert, z.B. den Übergang eines Atoms zwischen zwei Zuständen, dann liefert, bei Wahl einer möglichst kurzen Wellenlänge als Längeneinheit, deren Abzählung entlang der zu messenden Strecke die genaueste Längenangabe. Tatsächlich ist das Meter auf diese Weise definiert.

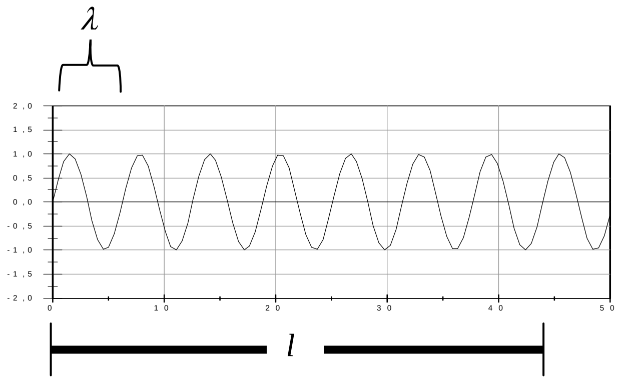


Abbildung 4 Messung einer Strecke der Länge l durch Abzählung der Wellenlängen: $l = 7\lambda$. Die Standardabweichung kann mit $\sigma = \lambda / 2$ abgeschätzt werden.

Die Abzählung der Perioden erfolgt mit Hilfe eines Interferometers: Im Interferometer von Michelson wird der von einer Lichtquelle ausgehende Strahl durch einen halbdurchlässigen Spiegel in zwei Teilstrahlen aufgeteilt. Nach Reflektion an zwei Spiegeln werden beide Teilstrahlen zur Überlagerung gebracht. In Abhängigkeit von der Stellung des beweglichen Spiegels, an dem sich das auszumessende Objekt befindet, überlagern sich die Teilstrahlen konstruktiv oder sie löschen sich aus. Beginnt man bei einer Stellung mit Auslöschung, dann erhält man Auslöschung nach Verschiebung des Spiegels um jeweils $\lambda / 2$. Eine Messung einer beliebigen Strecke wird damit zu einer Abzählung der Intensitätswechsel.

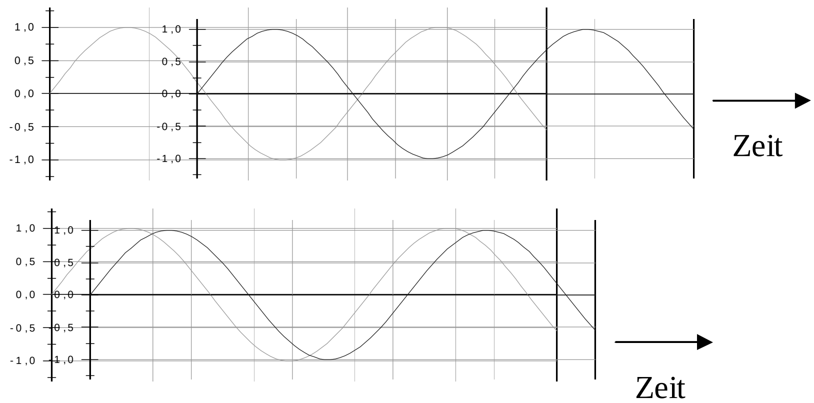


Abbildung 5 Auslöschende (oben) und verstärkende (unten) Überlagerung von zwei Wellenzügen.

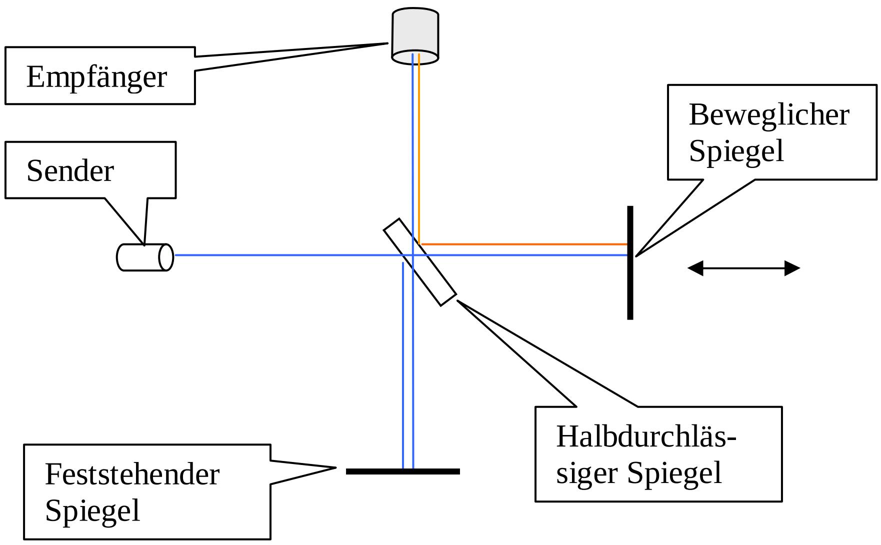


Abbildung 6 Michelson-Interferometer mit beweglichem Spiegel zur Längenmessung. Blau: Strahlengang des Referenzstrahls, phasentreu zum Sender. Rot: Strahl nach Reflektion am beweglichen Spiegel, in Abhängigkeit vom Ort des Spiegels phasenverschoben zum Referenzstrahl.

Versuch 5 Michelson Interferometer zur Angabe der Länge durch Abzählung von Wellenlängen. Hier: gezeigt mit cm-Wellen (Mikrowellen, $\lambda = 3{,}2\ \mathrm{cm}$*).*

Anmerkung zum Michelson Interferometer: Läßt man beide Spiegel und die restlichen Komponenten fest, dann ändert sich die Überlagerung der beiden Wellenzüge nur noch dann, wenn sich die Geschwindigkeit der Ausbreitung beider Wellenzüge relativ zueinander verändert. Mit der Sonne als Lichtquelle zeigt das Michelson Interferometer, daß die Lichtausbreitung nicht an einen ruhenden kosmischen „Äther“ gebunden ist.

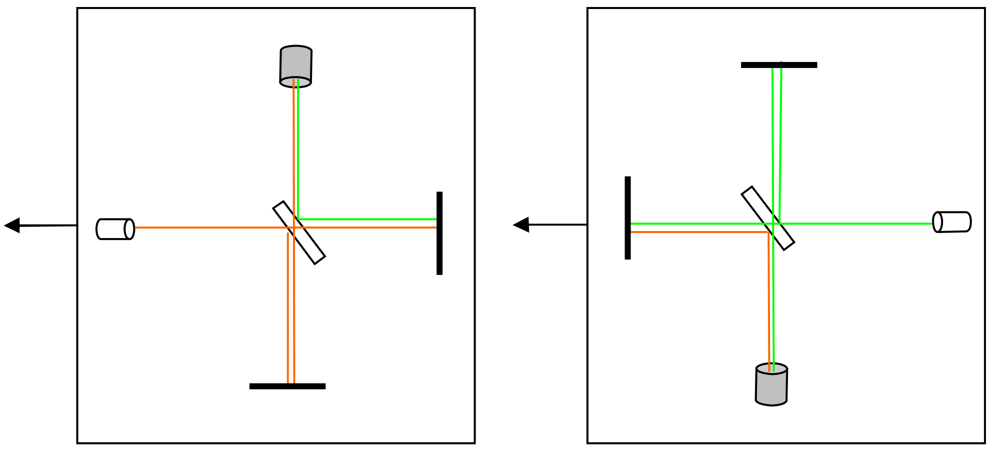


Abbildung 7 Das Interferometer werde z.B. in Luft nach links bewegt und der Sender sende Schallwellen aus. In beiden Stellungen ist der Schall mit der durch die Bewegung erhöhten Geschwindigkeit grün eingezeichnet. Man erkennt, daß sich die Laufzeit beider Strahlen bei Drehung des Interferometers ändert, damit ändert sich die Überlagerung im Empfänger.

1.1.7 Messung der Geschwindigkeit

In Verbindung mit einer Zeitmessung kann bei bekannter Länge die Geschwindigkeit errechnet werden.

Formel	Anmerkung
$v = \frac{s}{t}$	Konstante Geschwindigkeit
$v(t) = \frac{ds}{dt}$	Zeitlich variable Geschwindigkeit
t	Zeit
s	In der Zeit t zurückgelegter Weg

Tabelle 10 Betrag der Geschwindigkeit, konstant bzw. zeitlich variabel

Versuch 6 Messung von Weg und Zeit zur Bestimmung der Geschwindigkeit eines Geschosses.

Weg s	Zeit t	Geschwindigkeit $v = \frac{s}{t}$
1 m	0,003913 μs	255 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
		Zum Vergleich: $v_{Schall} = 330 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Tabelle 11 Geschwindigkeit eines Geschosses und die Schallgeschwindigkeit

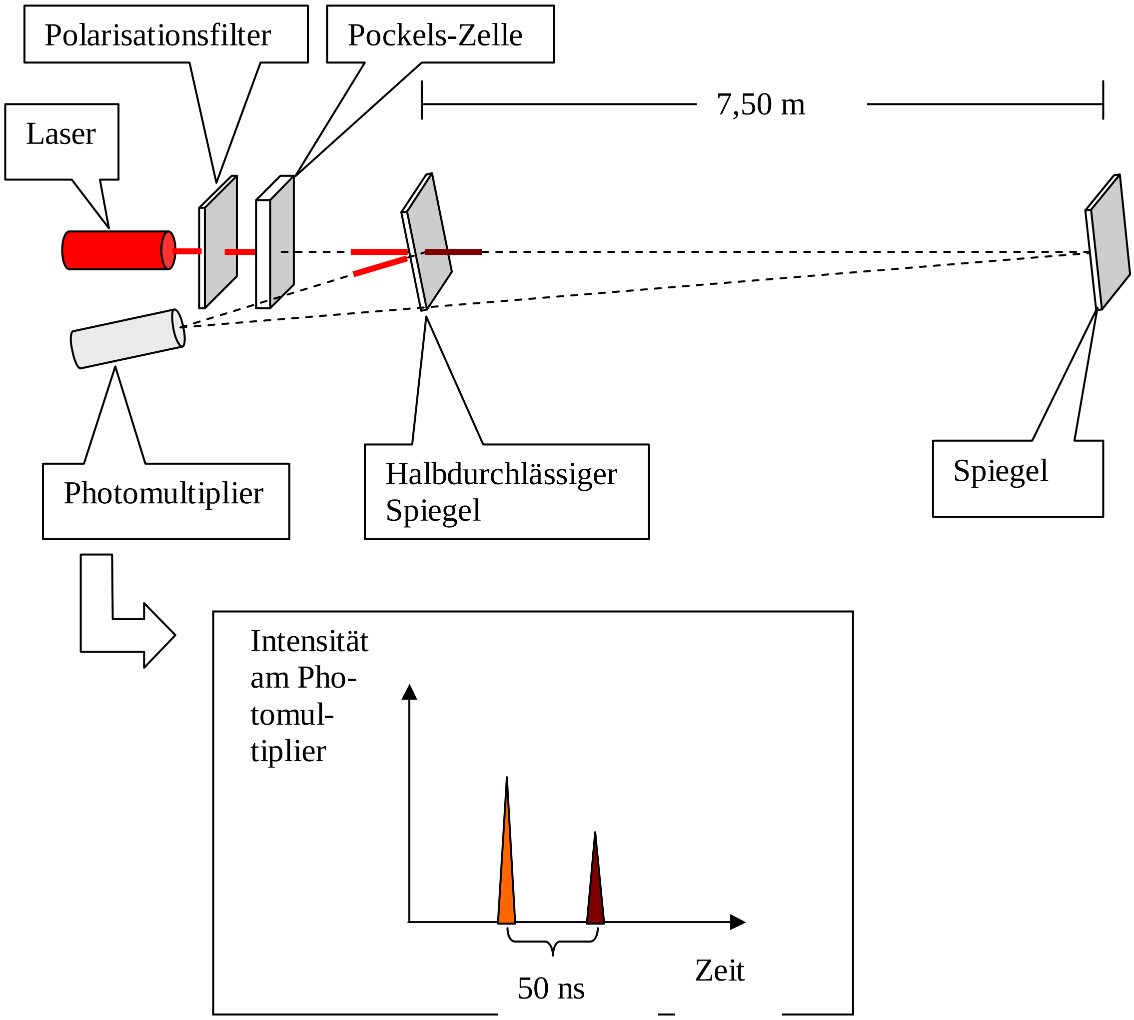
Versuch 7 Messung der Schallgeschwindigkeit bei variablem Druck

Versuch Nr.	Druck	Laufzeit	Geschwindigkeit
	$\text{Pa} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$	s	m/s
1	1	0,0029	345
2	0.1	0,0031	322
3	< 0.05	0,0092	108

Tabelle 12 Versuchsergebnis: Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Druck, der Druck ist in Pascal angegeben: $10^5\ \text{Pa} = 1\,\text{bar}$ *. Die Schallgeschwindigkeit ist bei nicht zu tiefen Drucken praktisch unabhängig vom Druck.*

1.1.7.1 Messung der Lichtgeschwindigkeit

Zur Messung der Lichtgeschwindigkeit wird die Laufzeit eines Licht-Wellenpakets über eine 2*7,50=15 m lange Laufstrecke gemessen. Die experimentelle Herausforderung besteht darin, sehr kurze Lichtpulse zu erzeugen und die Zeit im Bereich von Nanosekunden zu messen. Der Lichtpuls wird mit einer Pockelszelle erzeugt, die durch kurzzeitiges, elektrisch ausgelöstes Drehen der Polarisationsebene für polarisiertes Licht vom Laser durchlässig wird. Das Lichtbündel durchquert einen halbdurchlässigen Spiegel. Dieser Spiegel reflektiert einen Referenzstrahl in den Photomultiplier, der die Leuchtdichte in eine Spannung umsetzt. Nach 50 ns erreicht das von einem 2. Spiegel am Ende der Laufstrecke reflektierte Licht den Multiplier ein und erzeugt einen zweiten, zum ersten zeitlich versetzten Impuls auf dem Leuchtschirm eines Oszillographen.



Formel	Anmerkung
$v = \frac{s}{t}$	Definition der Geschwindigkeit
$v = \frac{2 \cdot 7{,}50}{50 \cdot 10^{-9}} = 3 \cdot 10^{8} \left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$	Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts folgt aus dem Lichtweg und der Laufzeit des Signals

Versuch 8 Messung der Lichtgeschwindigkeit nach dem Schema der Abbildung

Zur Fehlerrechnung: (http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/Mathe.DOC - Delta_v)