

VideoCom - eine einzeilige CCD-Kamera zur hochauflösenden Bewegungsaufnahme und zur Relativmessung von Intensitäten

von Dr. Michael Hund (mhund@ld-didactic.de)

Die Aufnahme und Auswertung von Bewegungsvorgängen ist eine grundlegende Aufgabe des Physikunterrichts. Dabei spielen besonders eindimensionale Bewegungen eine große Rolle. Zur Aufnahme solcher Bewegungen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten (z. B. Staubmarkenmethode, Lichtschranken, Ultraschall). Der vorliegende Beitrag stellt eine neue und einfach zu handhabende Methode zur Erfassung eindimensionaler Bewegungen vor.

VideoCom ist eine universell einsetzbare einzeilige CCD-Kamera (Charge-Coupled Device) der Firma LD Didactic GmbH, die ein oder auch mehrere Körper auf eine CCD-Zeile mit 2048 Pixeln abbildet und dort deren Positionen erfasst (siehe Abb. 1). Die Positionen werden dann bis zu 80 mal pro Sekunde über eine serielle Schnittstelle zu einem Computer übertragen. Dieser Vorgang wird dauernd wiederholt, so dass der Computer in der Lage ist, die gesamte Bewegung aller beteiligten Körper grafisch darzustellen und auszuwerten.



Abb. 1

VideoCom bei der Aufnahme der Schwingung zweier gekoppelter Pendel. Die beiden Pendel sind mit retroreflektierender Folie beklebt, welche vom Blitzlicht der Kamera beleuchtet und so von ihr erkannt werden.

1 Prinzip der Kamera

Das CCD-Element der Kamera besteht aus 2048 Pixeln. Jedes Pixel ist $14\ \mu\text{m}$ breit und $200\ \mu\text{m}$ hoch. Insgesamt ergibt sich dadurch eine lichtempfindliche Fläche von etwa $28\ \text{mm}$ mal $200\ \mu\text{m}$. Die Breite von $28\ \text{mm}$ ist also etwas kleiner als die Breite des Kleinbildformats und damit bietet sich für VideoCom handelsübliche Optik in Form eines 50-mm -Objektivs für Kleinbildkameras mit manuell einstellbarer Entfernung und Blende geradezu an.

Abb. 2 skizziert die optischen Verhältnisse für einen Abstand von $2\ \text{m}$ zwischen VideoCom und bewegtem Körper. Der Position des Mittelpunkts des bewegten Körpers wird dabei mit $0,25\ \text{mm}$ aufgelöst. Das heißt aber noch nicht gleichzeitig, dass auch die Genauigkeit einer solchen Positionsbestimmung ähnlich hoch ist. Neben der gegebenen hervorragenden Linearität des CCD-Sensors muss für die hohe Genauigkeit auch eine kurze Belichtungszeit und ein guter Kontrast gegeben sein.

Die kurze Belichtungszeit ist wichtig, damit das Bild bei einer schnellen Bewegung nicht unscharf wird. VideoCom belichtet mit $1/800\ \text{s}$. Bei einer typischen Geschwindigkeit auf einer Fahrbahn von $1\ \text{m/s}$ bedeutet dies eine Bewegung von $1,25\ \text{mm}$ während der Belichtung. Die dadurch entstehende Unschärfe ist jedoch am linken und rechten Rand des Körpers etwa gleich groß, so dass der dabei entstehende Fehler für den Mittelpunkt des Körpers noch deutlich kleiner sein wird.

Je besser der Kontrast zwischen dem bewegtem Körper und seinem Hintergrund ist, umso genauer lassen sich die Positionen der linken und rechten Kante des Körpers festlegen. Was nützt nämlich die hohe Auflösung des CCD-Elements, wenn nicht zuverlässig entschieden werden kann, bei welchem Pixel des CCD-Elements sich die linke und rechte Kante des Körpers gerade befindet?

Um selbst bei normalem Hintergrundlicht einen hohen Kontrast zwischen den bewegten Körpern und dem Hintergrund zu gewährleisten, wird für VideoCom vorzugsweise retroreflektierende (in den Strahl zurückreflektierende) selbstklebende Folie¹ verwendet, die sich problemlos an vorhandenen Versuchsaufbauten anbringen lässt und nachher kaum noch auffällt. Diese Folie wird von mehreren sehr hellen Leuchtdioden angeblitzt (siehe Abb. 1), die direkt vor dem Objektiv angebracht sind. Dann hat die retroreflektierende Folie die beste Wirkung. VideoCom erreicht sogar durch eine automatische Einstellung der Leuchtdauer der Leuchtdioden zwischen $1/4000\ \text{s}$ und $1/800\ \text{s}$ eine automatische Lichtmengenregelung. Diese ist wichtig, da eine Sättigung der CCD-Zeile bei zu großer Lichtmenge das Ergebnis unbrauchbar macht und eine zu geringe Lichtmenge das zuverlässige Erkennen des Reflexes nicht mehr ermöglicht.

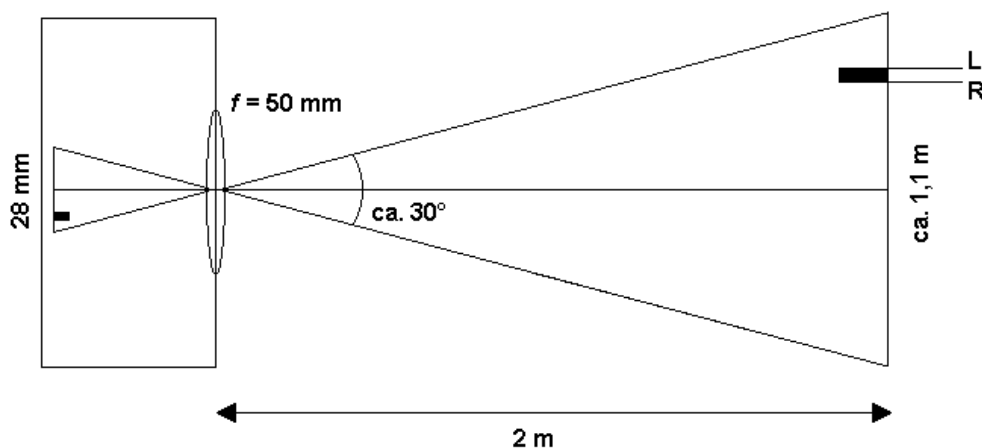


Abb. 2

Die optischen Verhältnisse der Kamera mit einer Brennweite von $50\ \text{mm}$ und einem Abstand von $2\ \text{m}$ zum bewegten Körper. In diesem Fall kann die Bewegung über eine Länge von etwa $1,1\ \text{m}$ verfolgt werden. Da 2048 verschiedene Positionen aufgelöst werden können, ist die Wegauflösung für die linke Kante L und die rechte Kante R des Körpers jeweils etwa $0,5\ \text{mm}$. Damit wird der Mittelpunkt $M=(L+R)/2$ des Körpers sogar mit $0,25\ \text{mm}$ aufgelöst.

¹Retroreflektierende Folie spielt auch bei der Sicherheit im Straßenverkehr eine immer größere Rolle (z. B. an Kinderkleidung und Schulranzen).

2 Versuchsbeispiele

Zu VideoCom gehören zwei Computer-Programme (Windows 95 oder Windows NT, Windows 3.1 auf Anfrage) zur Erfassung und zur Auswertung der Daten. Beim ersten Programm werden die Positionen der Reflexe erkannt und ausgewertet (Mechanik). Beim zweiten Programm werden die gemessenen Intensitäten auf der CCD zum Computer übertragen und dargestellt (Optik). Beide Programme kommen bei den folgenden Beispielen zum Einsatz.

Bei der Erstellung wurde viel Wert auf eine einfache und intuitive Bedienung der Software gelegt. Es sollte schließlich jeder Anwender, der die Software normalerweise nur wenige Male im Jahr verwenden wird, in wenigen Minuten wieder in der Lage sein, optimal damit zu arbeiten.

So lassen sich zum Beispiel alle wesentlichen Funktionen jeweils mit einem einzigen Mausklick über die Schalterleiste am oberen Bildschirmrand erreichen (siehe z. B. Abb. 3). Auf ein Hauptmenü wurde dafür ganz bewusst verzichtet. Auch die Darstellung der Tabelle und des Diagramms lässt sich leicht durch Anklicken einer Notizbuchlasche auswählen (siehe z. B. Abb. 4). Dadurch kann nicht nur jede Einstellung schnell durchgeführt werden, es ist sogar jede Möglichkeit jederzeit sichtbar.

Die Größe des Anzeigeelements, der Tabelle und des Diagramms lässt sich durch Verschieben der Trennlinien verändern. Auf diese Weise kann das Anzeigeelement, die Tabelle oder das Diagramm auch ganz unsichtbar werden.

Lediglich für die Auswahl der unterschiedlichen grafischen Auswertungen wird ein Menü verwendet, welches durch die rechte Maustaste aufgeklappt werden kann.

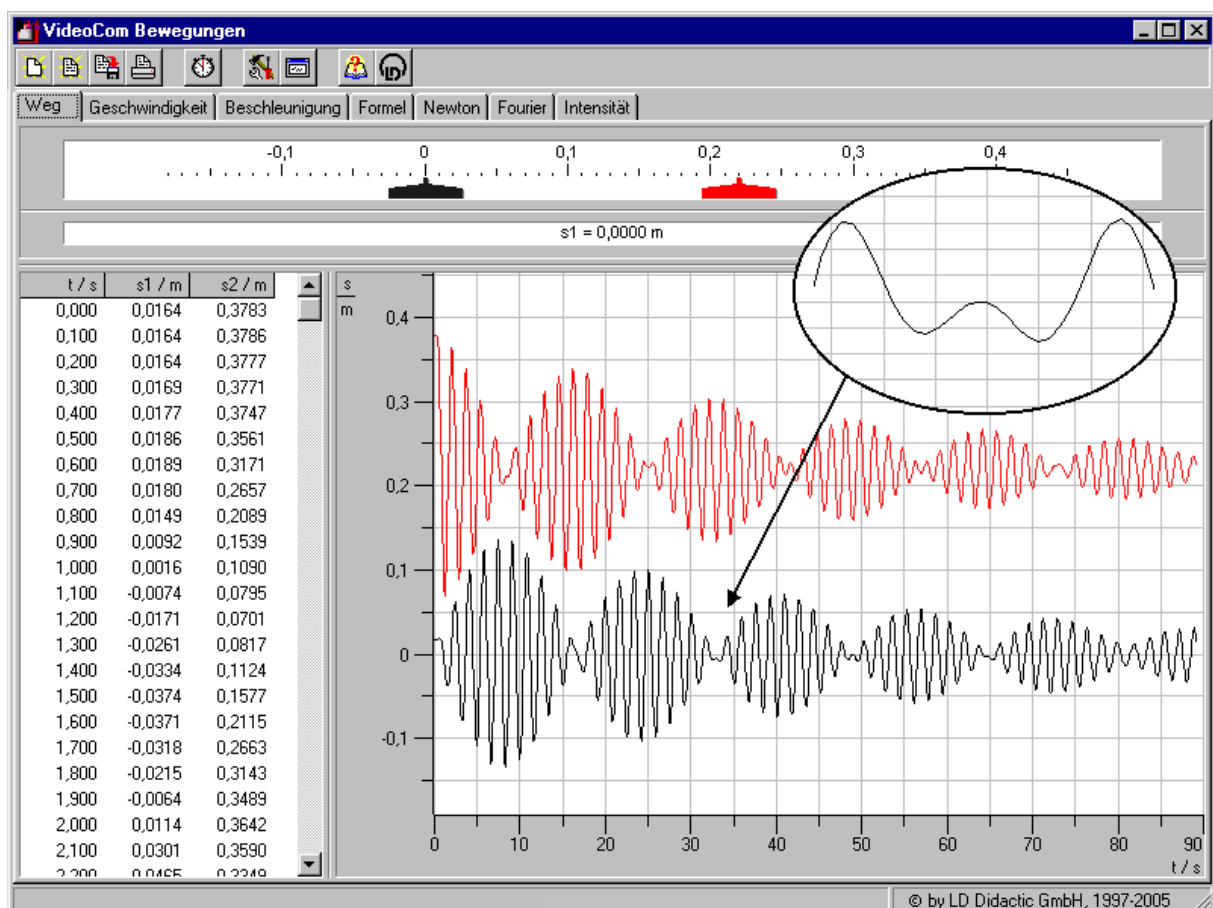


Abb. 3

Die gekoppelte Schwingung wird mit dem Versuchsaufbau aus Abb. 1 mit so hoher Wegauflösung gemessen, dass Zoomen noch problemlos möglich ist (z. B. beim Phasensprung).

2.1 Gekoppelte Pendel

Mit dem Versuchsaufbau in Abb. 1 lässt sich nach einer kurzen Kalibrierung der Kamera (Angabe des Abstands der beiden Pendel) eine gekoppelte Schwingung wie in Abb. 3 aufnehmen. Dabei fällt besonders die hohe Wegauflösung der Kamera positiv auf, da sie das problemlose Zoomen der Messgrafik ermöglicht. Abb. 4 zeigt als eine der möglichen Auswertungen eine Fourieranalyse des $s_1(t)$ -Diagramms aus Abb. 3. Die beiden angeregten Fundamentalfrequenzen sind deutlich zu erkennen.

Mit VideoCom bietet sich hier also ein Verfahren an, mit dem eine gekoppelte Schwingung ohne großen experimentellen Aufwand, ohne Umwege und wechselwirkungsfrei erfasst sowie leistungsfähig ausgewertet werden kann.

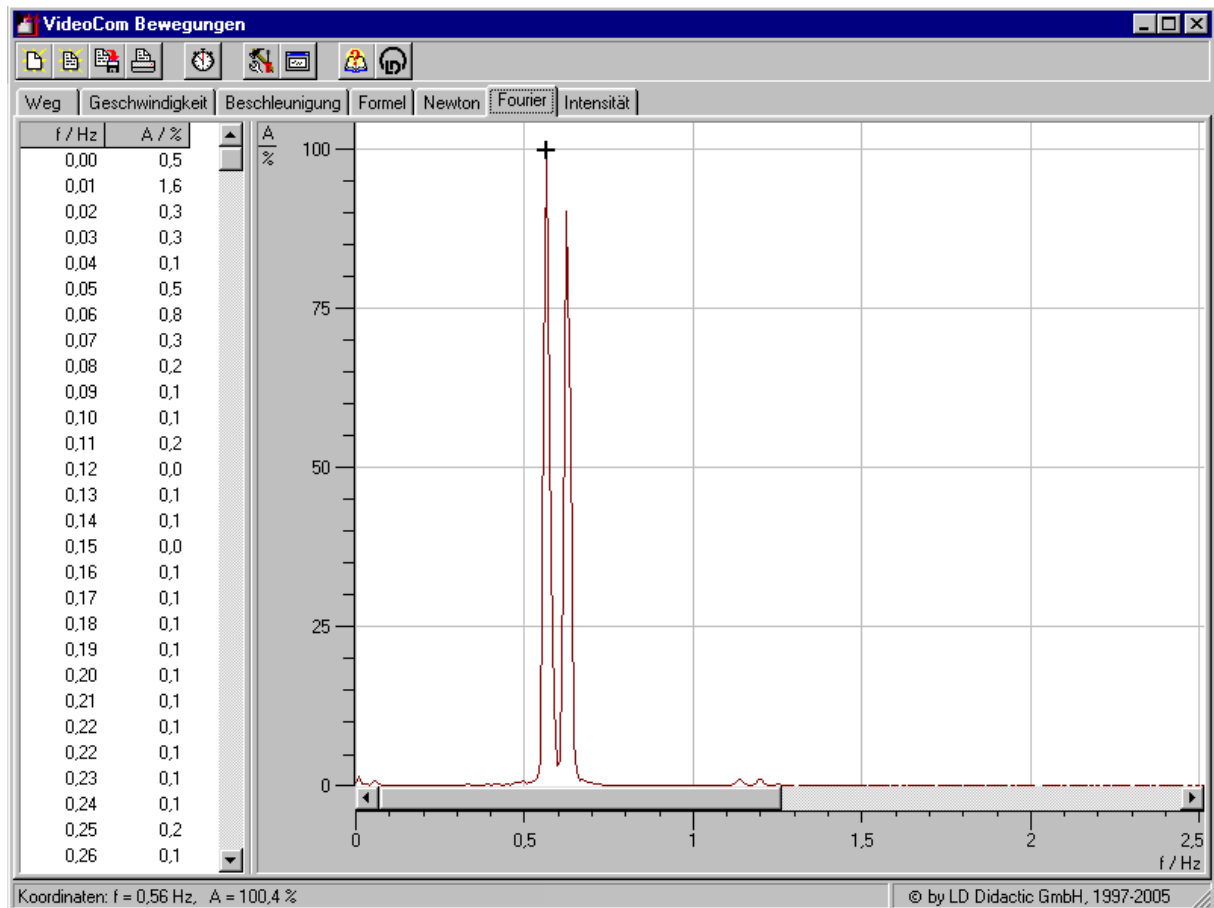


Abb. 4

Die Fourier-Transformation der gekoppelten Schwingung aus Abb. 3 zeigt deutlich die beiden angeregten Fundamentalschwingungen. Die kleinere Frequenz wird gerade als Mausposition in der Fußzeile angezeigt ($f=0,56$ Hz).

2.2 Newtonsche Bewegungsgleichung

Auf einer Luftkissenfahrbahn wird ein Gleiter der Masse m durch vier verschiedene Kräfte F beschleunigt. VideoCom schaltet zum Start der Messung den Haltemagneten ab, und der Gleiter fährt zum Zeitpunkt $t=0$ s los. Anschließend wird das entsprechende $s(t)$ -Diagramm aufgenommen. Abb. 5 zeigt die vier unterschiedlichen Messungen jeweils als $s(t)$ -, $v(t)$ - und $a(t)$ -Kurve. Als Ergebnis wird aus den ermittelten Beschleunigungswerten und den vorgegebenen beschleunigenden Kräften sehr schön die Newtonsche Bewegungsgleichung $F=ma$ bestätigt.

Gerade bei dieser grundlegenden Beziehung der klassischen Mechanik unterstützt VideoCom das Physikkernen durch einen problemlosen qualitativen und quantitativen Vergleich der resultierenden Beschleunigungen bei veränderten beschleunigenden Kräften.

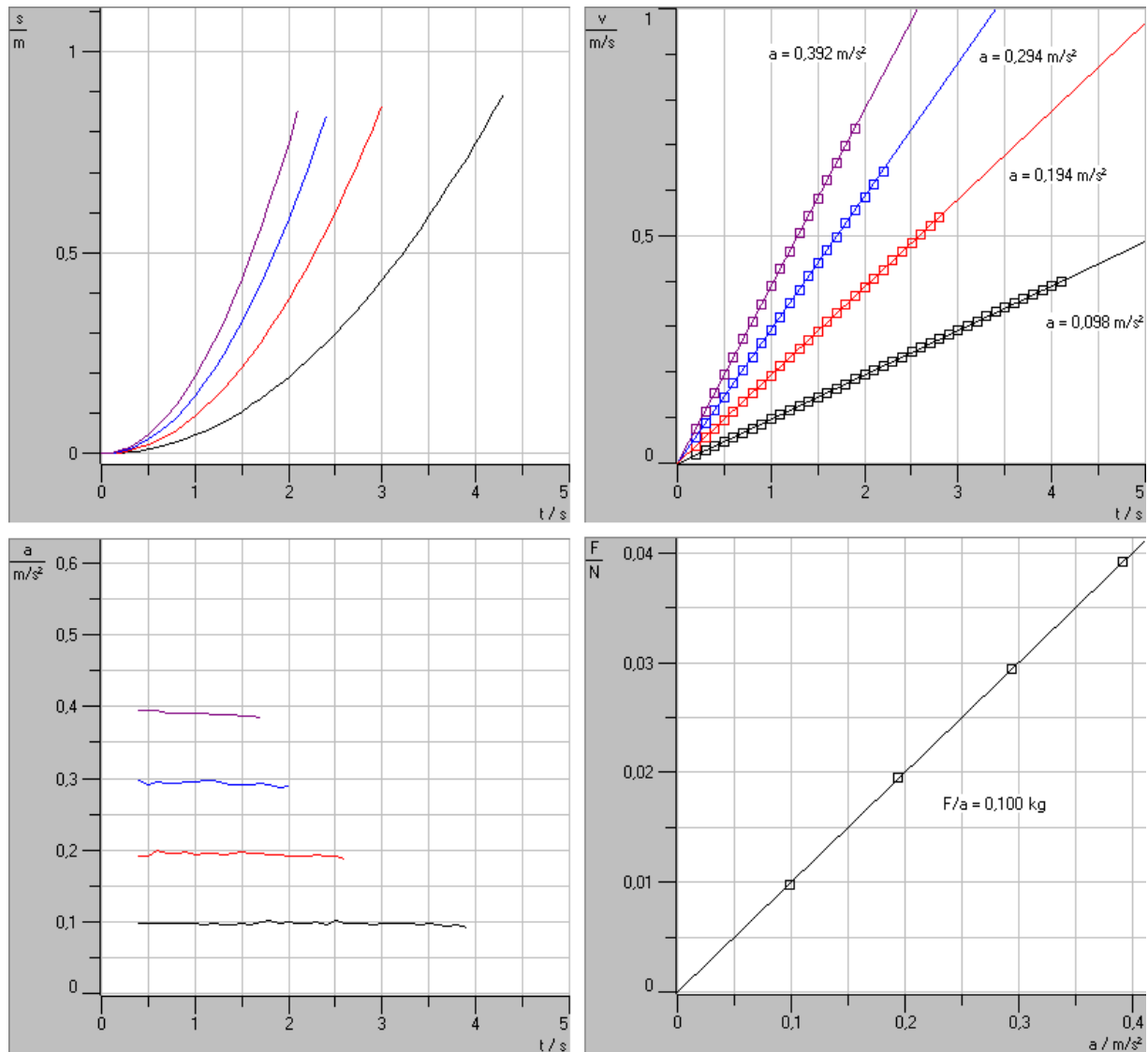


Abb. 5
 Ein Gleiter der Masse m wird viermal nacheinander durch unterschiedliche Kräfte F beschleunigt. Es sind die dazugehörigen $s(t)$ -, $v(t)$ - und $a(t)$ -Diagramme dargestellt. Die $v(t)$ -Diagramme zeigen zusätzlich die einzelnen Messpunkte und die Ausgleichsgeraden zur Bestimmung der Beschleunigungen. Die ermittelten Beschleunigungen sowie die beschleunigenden Kräfte sind im $F(a)$ -Diagramm (unten rechts) dargestellt und bestätigen die Bewegungsgleichung $F=ma$ mit m als Proportionalitätsfaktor.

2.3 Stoß auf einer Fahrbahn ("Actio = Reactio")

VideoCom kann bis zu 80 Bilder pro Sekunde aufnehmen. Das reicht aus, um den eigentlichen Stoßvorgang (Stauhen und Dehnen der Federn) zweier Gleiter auf einer Luftkissenfahrbahn zu erfassen. Um eine möglichst lange Stoßdauer zu erreichen, müssen die Massen m_1 und m_2 relativ groß gewählt werden. Im Beispiel betragen $m_1=0,4$ kg und $m_2=0,2$ kg. Dadurch werden die beiden Federn beim Stoß stärker gestaucht und damit sowohl der Stoßweg wie auch die Stoßdauer größer. In Abb. 6 (oben rechts) kann die Stoßdauer mit etwa 90 ms abgelesen werden.

Während dieser Zeit werden von VideoCom etwa 8 Messungen durchgeführt. Diese Messwerte können für die Berechnung der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen auch *während* des Stoßes verwendet werden. Im Beispiel wurden die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen nach

$$v = (s_{i+2} - s_{i-2}) / (t_{i+2} - t_{i-2}) \quad a = (v_{i+2} - v_{i-2}) / (t_{i+2} - t_{i-2})$$

berechnet, um den statistischen Fehler, verursacht durch die begrenzte Auflösung in der Wegmessung von etwa 0,25 mm, zu verkleinern (übrig bleiben die "Zacken" in Abb. 6 und 7). Dadurch erscheint vor

allem der Peak in den $a(t)$ -Kurven etwas breiter als 90 ms. Es bleiben aber noch genug Werte übrig, um physikalisch sinnvolle Aussagen treffen zu können.

Im einzelnen handelt es sich um folgende Aussagen, die zugleich den Beitrag zu qualifiziertem Physikalern durch VideoCom bestätigen:

Das $v(t)$ -Diagramm aus Abb. 6 zeigt einen Schnittpunkt der beiden Kurven mit tieferem physikalischem Sinn. Leider sieht man solche Kurven recht selten, weil sie bisher schwer zu messen waren. Schneiden sich nämlich zum Zeitpunkt $t_{\underline{}}$ die beiden Kurven, dann ist die Geschwindigkeit der beiden Gleiter zu diesem Zeitpunkt gleich - und ihre Relativgeschwindigkeit Null. Das heißt wiederum, dass zum Zeitpunkt $t_{\underline{}}$ der Relativabstand der beiden Gleiter minimal ist, woraus wiederum folgt, dass zu diesem Zeitpunkt die Federn maximal gestaucht sind und die maximale Kraft ausüben. Mit anderen Worten: Es entsprechen sich der Schnittpunkt im $v(t)$ -Diagramm und die Maxima im $a(t)$ -Diagramm.

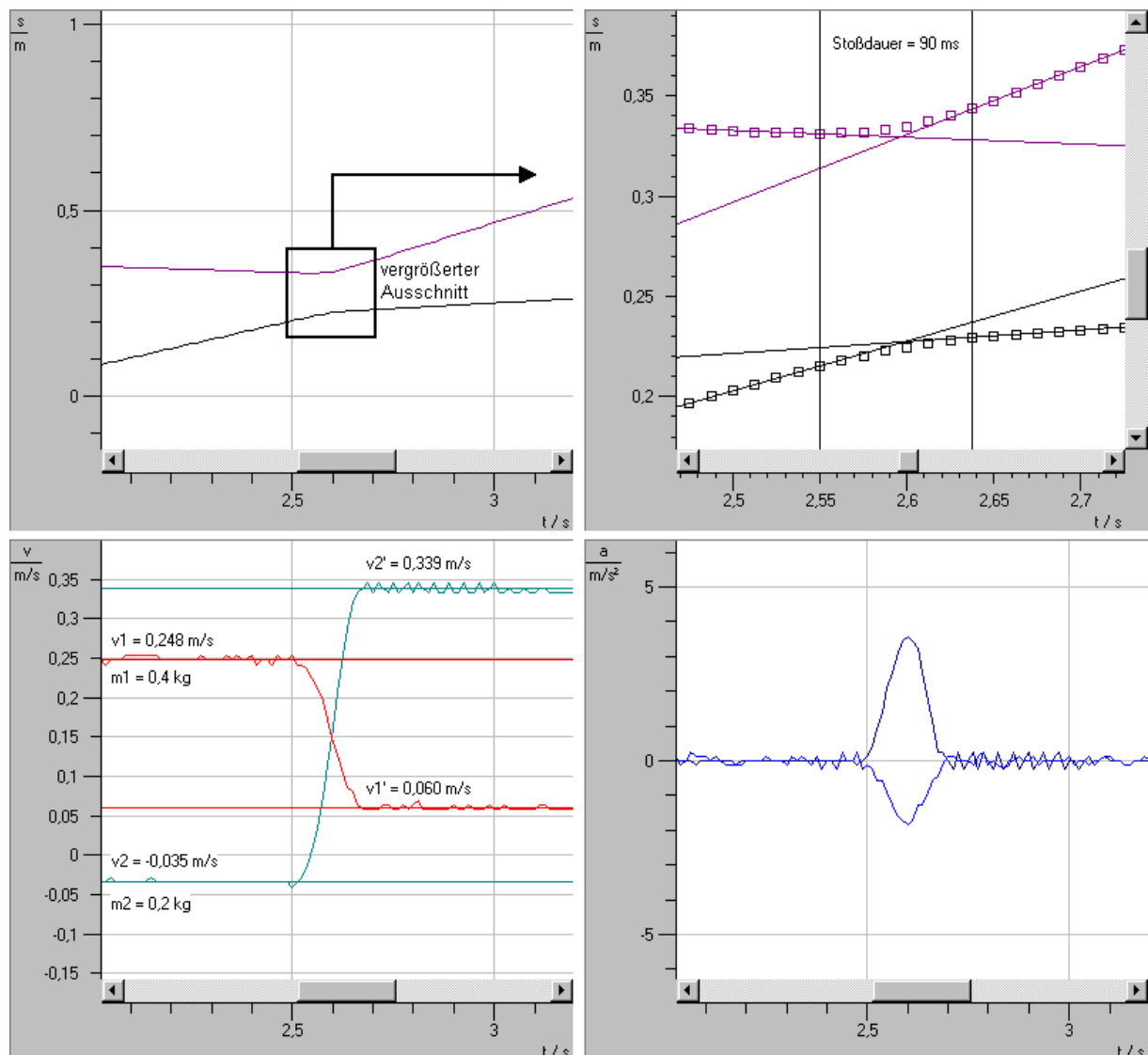


Abb. 6

Zwei relativ schwere Gleiter ($m_1=0,4$ kg und $m_2=0,2$ kg) fahren aufeinander zu. Damit wird erreicht, dass der eigentliche Stoß der beiden Gleiter etwa 90 ms dauert. Zeit genug, um während des Stoßes etwa 8 Positionsbestimmungen durchzuführen (siehe Vergrößerung oben rechts). Unten zeigen die $v(t)$ - und $a(t)$ -Diagramme den Verlauf des Stoßes.

Neben diesem kurzen Hinweis lässt sich natürlich auch der Impulserhaltungssatz bestätigen. Dafür gibt es jetzt sogar zwei Möglichkeiten: Die Impulse können z. B. aus dem $v(t)$ -Diagramm in Abb. 6 berechnet und miteinander verglichen werden. Die andere Möglichkeit ist in Abb. 7 dargestellt. Durch frei zur Verfügung stehende Formeln kann zusätzlich zu $a(t)$ auch $F=ma(t)$ berechnet werden. Damit wird jetzt Newtons drittes Axiom "Actio = Reactio" bestätigt. Die übertragenen Impulse ergeben sich als Flächen unter der Kurve und sind daher zu jedem Zeitpunkt betragsmäßig gleich. Der Impulserhaltungssatz ergibt sich also sofort grafisch aus Newtons drittem Axiom.

Bei diesem Experiment kann VideoCom also gleichzeitig mit

- seiner hohen Aufnahmegeschwindigkeit,
 - der hohen Wegauflösung und
 - der Möglichkeit, mehrere Körper gleichzeitig zu verfolgen,
- glänzen sowie dedizierte Einblicke in physikalische Prozesse und den Aufbau der Mechanik Newtons gewähren.

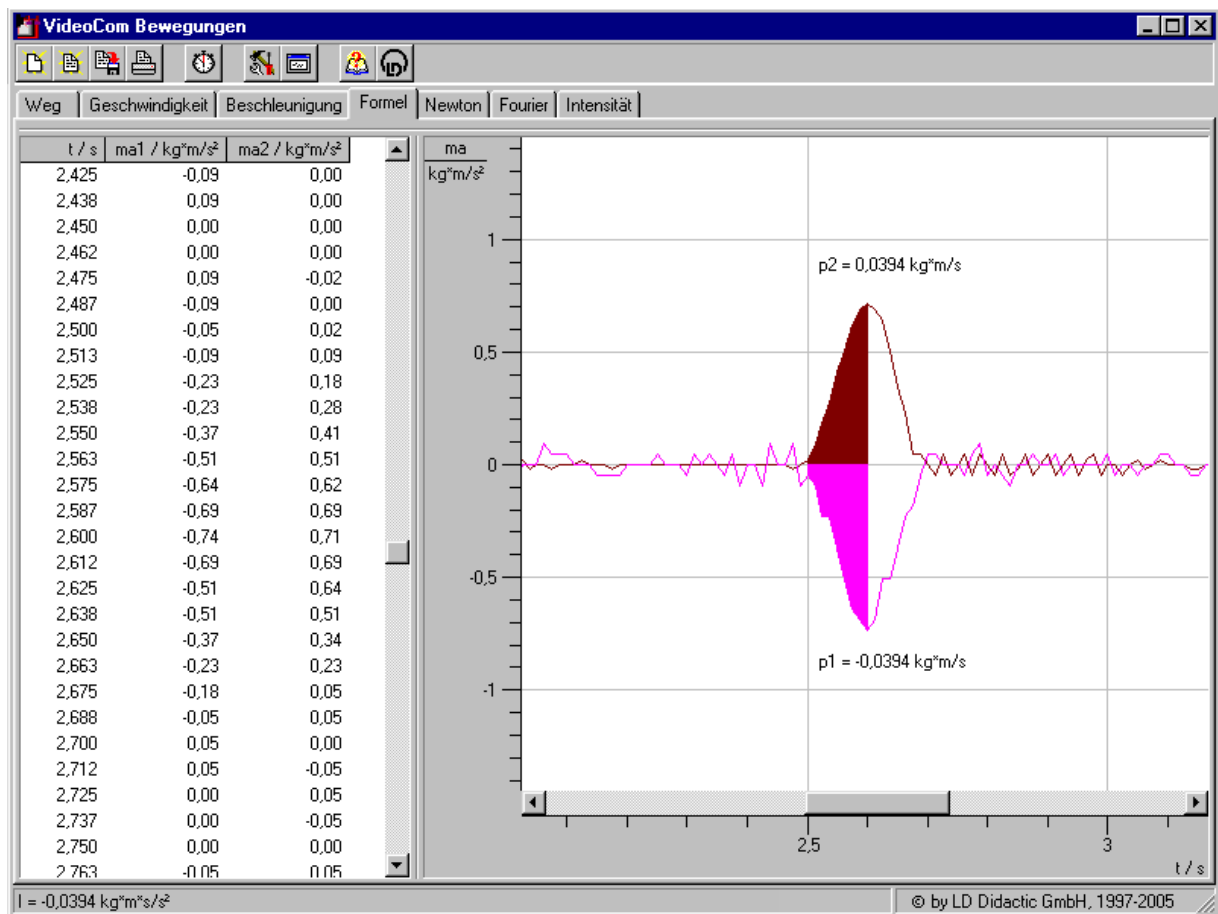


Abb. 7

Die beiden $a(t)$ -Kurven aus Abb. 6 zeigen mehr, als zunächst vermutet. Multipliziert man nämlich die beiden Kurven mit den beiden Massen, dann bekommt man die beiden dargestellten $ma(t)$ -Kurven. Zusammen mit der Newtonschen Bewegungsgleichung kann man jetzt also direkt sein drittes Axiom "Actio = Reactio" ablesen. Auch die Impulserhaltung wird jetzt sofort verständlich, da natürlich auch zu jedem Zeitpunkt t die Flächen (Impulsüberträge) gleich sein müssen. So ist z. B. in der Mitte des Stoßes bereits ein Impuls von etwa 0,04 kg m/s übertragen worden.

2.4 Freier Fall

Natürlich lässt sich die hohe Geschwindigkeit und Auflösung von VideoCom auch für den freien Fall nutzen. Beim freien Fall wird der Fallkörper, der wieder mit einem Streifen retroreflektierender Folie beklebt ist, von einem Haltemagneten bis zum Start der Messung festgehalten. Während des Fallvorgangs wird dann die Positionen des Reflexes erfasst und dargestellt. Abb. 8 zeigt das $s(t)$ - und $a(t)$ -Diagramm eines freien Falls.

Der im $a(t)$ -Diagramm angegebene Fehler ist rein statistisch aus der Streuung einzelnen Messpunkte errechnet, die durch die Berechnung der Beschleunigungen nach der Gleichung aus Abschnitt 2.3 entsteht. Allein die Auflösung von $\Delta s=0,25$ mm bei der Positionsbestimmung verursacht mit $t_{i+2}-t_{i-2}=50$ ms bereits einen Einzelfehler $\Delta a=0,28$ m/s² (Gaußsche Fehlerfortpflanzung). Der im Diagramm angegebene Fehler von $\Delta a=0,023$ m/s² muss als Fehler des Mittelwerts über viele Einzelmessungen entsprechend kleiner sein.

Der tatsächliche Fehler der Messung hängt dagegen auch von der sorgfältigen Kalibrierung ab, die beim freien Fall z. B. durch einen zweiten Streifen der retroreflektierenden Folie auf dem Fallkörper erreicht werden kann. Da der Fallkörper aber im allgemeinen nicht sehr lang ist (z. B. eine etwa 10 cm hohe magnetische "Cola"-Dose), ist die Kalibrierung nur schwer besser als mit etwa 1 % (entspricht 1 mm bzw. etwa 0,1 m/s²) durchführbar.

Das Experiment in Abb. 8 wurde mit einer langen Kunststoffplatte durchgeführt, welche zum Kalibrieren mit zwei reflektierenden Folienstreifen im Abstand von 50 cm versehen wurde. Daher ist dort die Genauigkeit entsprechend höher. Alternativ kann auch der Fallkörper zu VideoCom verwendet werden.

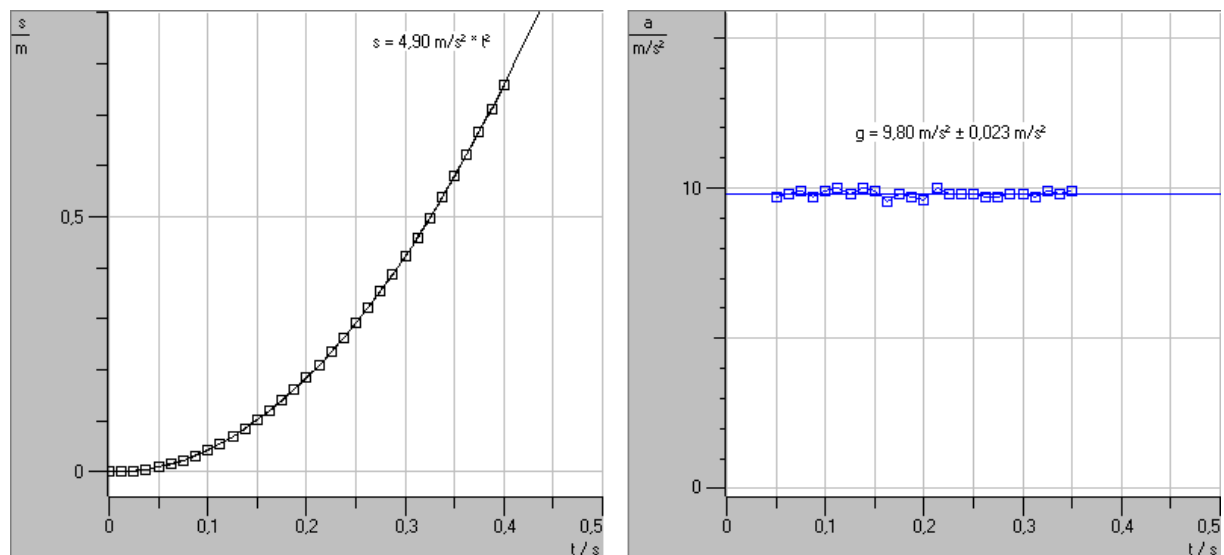


Abb. 8

Wegen der hohen Aufnahmegeschwindigkeit mit bis zu 80 Bildern pro Sekunde eignet sich die Kamera auch zur Aufnahme des freien Falls. Aus dem $a(t)$ -Diagramm kann sofort die Erdbeschleunigung abgelesen werden. Der angegebene statistische Fehler der Erdbeschleunigung ergibt sich aus der endlichen Auflösung der CCD.

2.5 Filter-Transmissionskurven

Bisher wurden von VideoCom nur Reflexpositionen erfasst. Als digitale Kamera kann VideoCom natürlich auch die Intensitäten aller 2048 Pixel zum Computer übertragen. Nur dauert die Übertragung wegen des hohen Datenaufkommens natürlich viel länger. Sollen alle 2048 Intensitäten übertragen werden, dann dauert ein Bildaufbau etwa 2 s. Das ist jedoch für viele optische Versuche nicht störend.

Eine sinnvolle Anwendung von VideoCom ist sicherlich das Ausmessen verschiedener Filter in der Optik (siehe Abb. 9). Dazu wird weißes Licht einer Glühlampe auf einen Spalt abgebildet, der wiederum durch eine zweite Linse paralleles Licht auf ein Gitter (z. B. 570 Linien/mm) wirft. Hinter dem Gitter muss für eine höhere Auflösung der ersten Ordnung des Spektrums noch ein Fernrohr mit zwei weiteren Linsen (z. B. 300 mm und 150 mm Brennweite) aufgebaut werden. Das Bild des Fernrohrs wird mit VideoCom betrachtet (Entfernungseinstellung am Objektiv auf Unendlich).

Das Ergebnis ist in Abb. 10 zu sehen. Die wellenförmige Struktur der Intensitätsverteilung ist in der kohärenten Beleuchtung der einzelnen CCD-Pixel mit Licht unterschiedlicher, gut definierter Wellenlänge bedingt² und lässt sich hier gut für die Justierung des optischen Aufbaus "missbrauchen".

Zur Bestimmung einer Filter-Transmissionskurve wird die Intensitätsverteilung des weißen Lichts mit der Intensitätsverteilung von gefiltertem Licht verglichen - durch Division der gefilterten durch die ungefilterte Intensitätsverteilung. Die Wellen aus Abb. 10 spielen dann keine Rolle mehr (siehe Abb. 11). Sehr schön ist die unterschiedliche Qualität der verwendeten Filter zu erkennen.

Für die Kalibrierung der Messanordnung aus Abb. 9 gibt es mehrere Möglichkeiten. Im Prinzip reicht die Kenntnis der Gitterkonstante d , der Vergrößerung des Fernrohrs und des Winkels α_0 aus, um jedem Pixel der CCD einen Winkel α und damit eine Wellenlänge $\lambda = d \sin \alpha$ in der ersten Beugungsordnung des Gitters zuzuordnen. Da sich der Winkel α_0 aber nicht besonders genau ablesen lässt, bietet die Software die Möglichkeit, diesen Winkel durch die Angabe der Wellenlänge eines Pixels zu errechnen.

Alternativ kann VideoCom auch durch die Angabe zweier Wellenlängen unterschiedlicher Pixel kalibriert werden (z. B. durch zwei Quecksilberlinien).

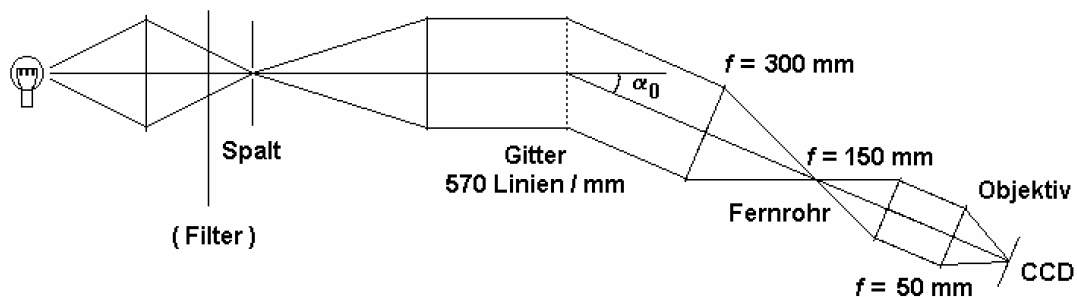


Abb. 9:

Zur Aufnahme von Filter-Transmissionskurven werden die Spektren von weißem und gefiltertem Licht miteinander verglichen. Dazu wird das Licht auf einen Spalt abgebildet, der wiederum durch eine zweite Linse paralleles Licht auf ein Gitter (z. B. 570 Linien/mm) wirft. Zwischen Gitter und Kameraobjektiv vergrößert das Fernrohr die Auflösung der Kamera.

Eine einfachere Justage des Aufbaus ergibt sich ohne Verwendung des Fernrohrs. Allerdings ist die Wellenlängenauflösung dann auch etwas schlechter.

²Vor dem Silizium der CCD liegt noch eine dünne Schicht der Dicke d , in der durch doppelte Reflexion konstruktive Interferenz bei $2d = n\lambda$ auftritt (Interferenz an einer dünnen Schicht).

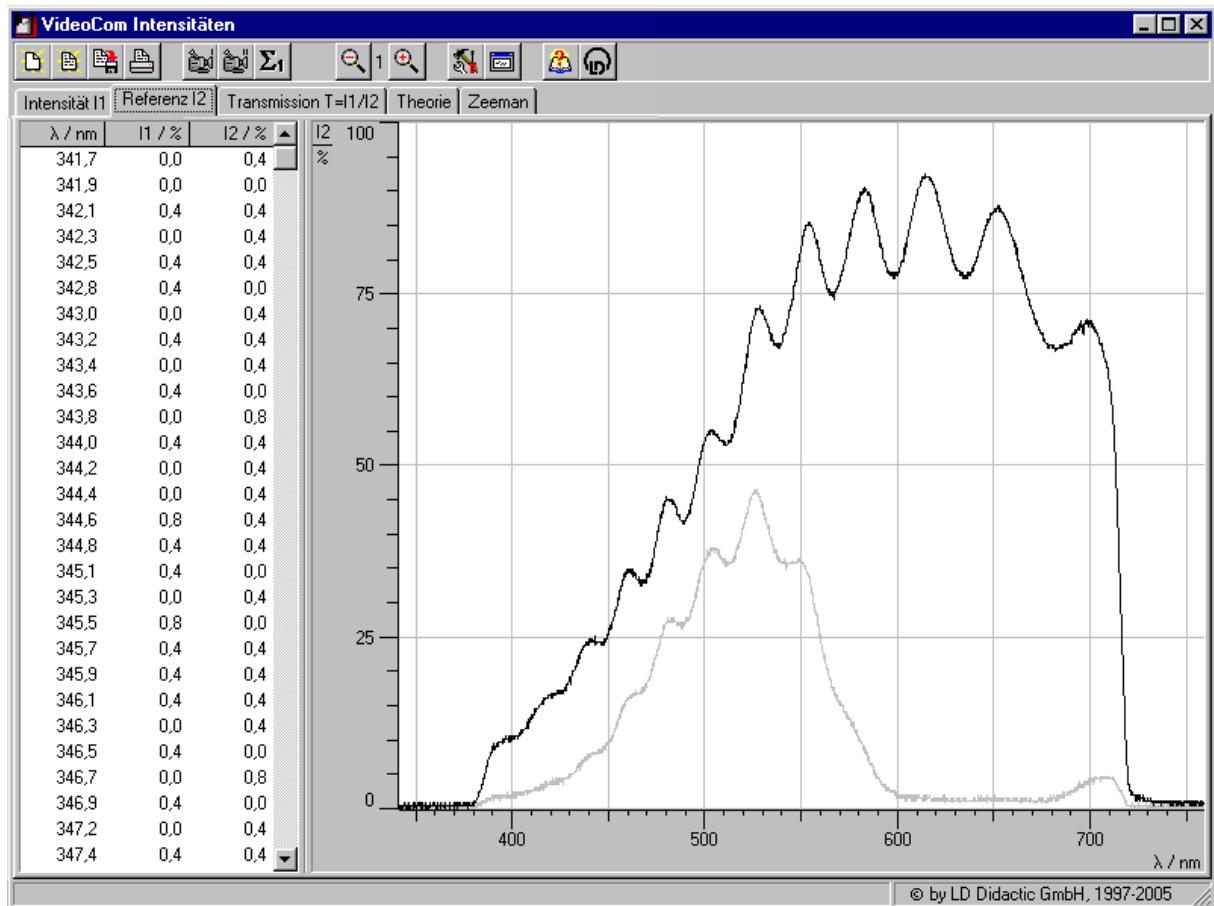


Abb. 10

Intensitätsverteilung in der ersten Beugungsordnung eines Gitters gemessen mit VideoCom. Die linke und rechte "Kante" des Spektrum rührt von der begrenzten Öffnung der beiden vorgesetzten Linsen des Fernrohrs her. Die wellenartige Struktur des Spektrums ist eine Anomalie, die in Interferenzen an der Oberfläche der CCD (doppelte Reflexion an einer dünnen Schicht) begründet ist. Die zweite Kurve ist das Spektrum nach einem grünen Filter. Durch Division beider Kurven ergibt sich die Transmissionskurve des grünen Filters (siehe Abb. 11 links oben).

Im Vergleich zur bisher üblichen punkweisen Aufnahme einer Transmissionskurve bietet VideoCom hier den gewaltigen Vorteil der parallelen Aufzeichnung einer Transmissionskurve für das gesamte Spektrum des sichtbaren Lichts. Nach der Aufnahme und Diskussion einer einzelnen Transmissionskurve lässt sich die Erfahrung und das erarbeitete Verständnis leicht³ auf viele Transmissionskurven unterschiedlicher Filter erweitern. Durch den Vergleich unterschiedlicher Transmissionskurven können Fragen nach der Güte und Durchlässigkeit einzelner Filter (und der Ursachen dafür) viel anschaulicher diskutiert werden.

³Der zusätzliche Aufwand beschränkt sich lediglich auf das Auswechseln eines Filters.

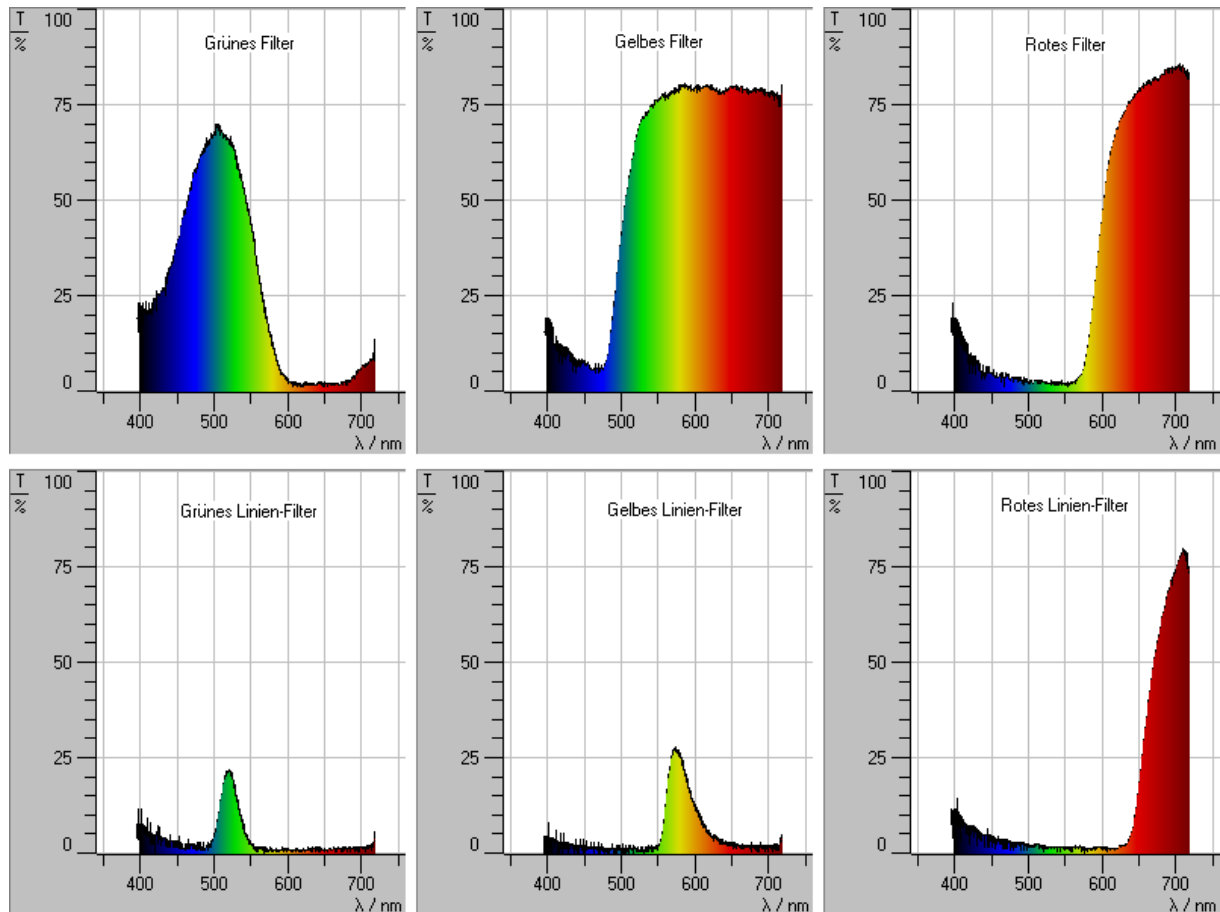


Abb. 11

Für die Aufnahme von Transmissionskurven verschiedener Filter braucht nur das gefilterte Spektrum durch das ungefilterte Spektrum dividiert zu werden. Dann spielen auch die "Wellen" aus Abb. 10 keine Rolle mehr.

2.6 Beugung an einer Halbebene

Anstelle des Transmissionsverhaltens von Filtern kann auch der Einfluss einer Halbebene (Kante) auf die Intensitätsverteilung auf der CCD untersucht werden. Dazu belichtet aufgeweitetes paralleles Laserlicht VideoCom direkt (ohne Kameraobjektiv, siehe Abb. 12). Zum Abblenden des Laserlichts wird ein Polarisationsfilter verwendet. Das weitere Vorgehen gestaltet sich völlig analog zu den Filter-Transmissionskurven aus Abschnitt 2.5. Die durch die Halbebene gebeugte Intensitätsverteilung wird durch die ungebeugte Intensitätsverteilung dividiert.

Das Ergebnis in Abb. 13 eignet sich auch sehr schön für eine quantitative Analyse und einen Vergleich mit der Theorie. Nach der geometrischen Schattengrenze der Halbebene bei einem Intensitätswert von 25 % sind die Bereiche mit Intensitäten über und unter 100 % deutlich zu erkennen.

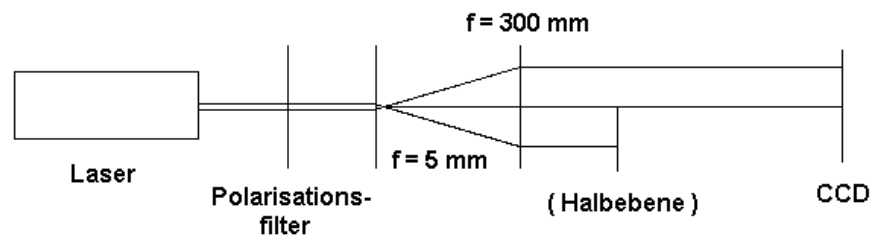


Abb. 12

Trifft aufgeweitetes Laserlicht auf eine Halbebene, so wird es an dieser gebeugt. Das Polarisationsfilter optimiert lediglich die Beleuchtungsstärke auf der CCD.

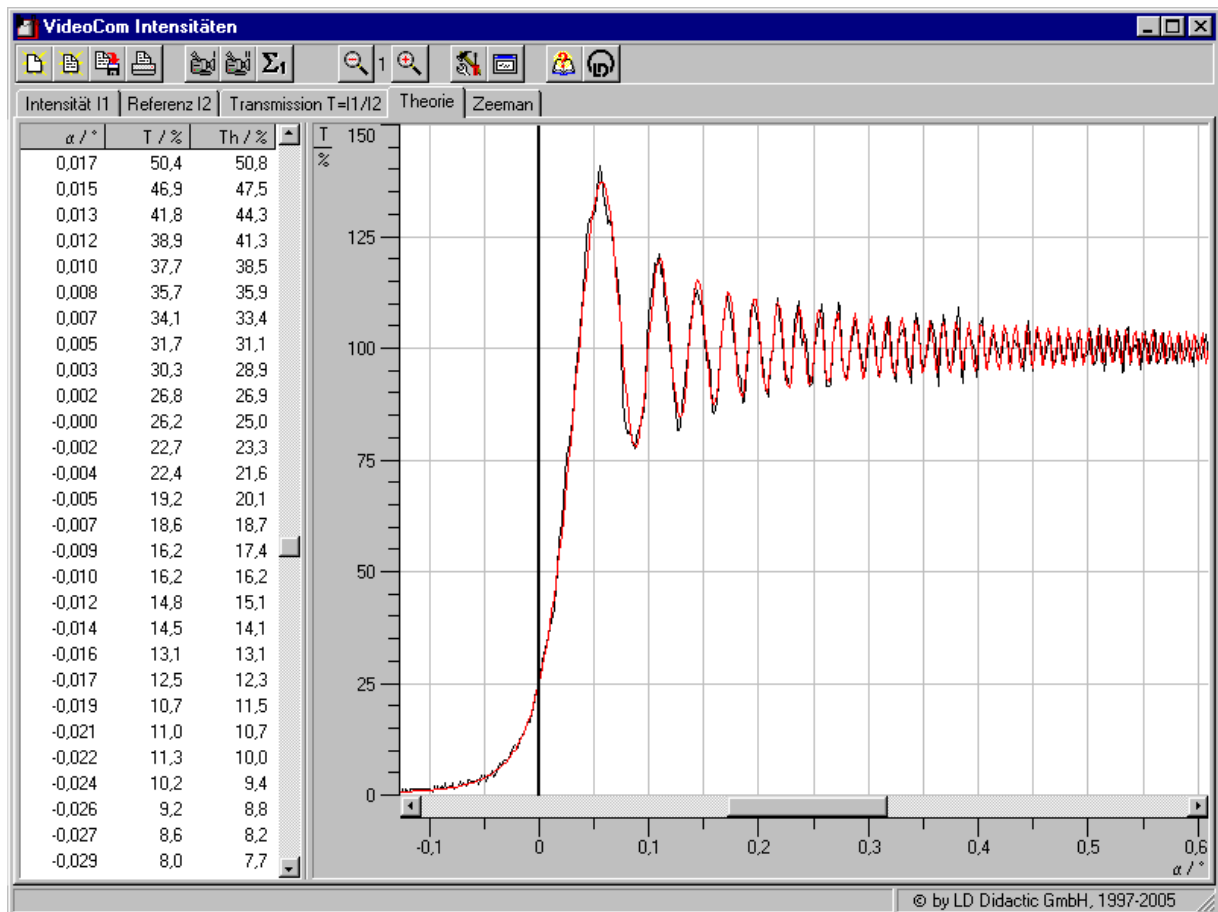


Abb. 13

Intensitätsverteilung auf der CCD in der Umgebung der geometrischen Schattengrenze einer Halbebene. Sehr schön zeigt das Experiment die Bereiche mit Intensitäten über und unter 100 % bevor schließlich die normale Intensität von 100 % erreicht wird. Die rote theoretische Kurve bestätigt die Theorie des Experiments.

2.7 Beugung am Mehrfachspalt

Im Gegensatz zum Beispiel in Abschnitt 2.5 kann man mit VideoCom natürlich auch mehrere Beugungsordnungen gleichzeitig beobachten. Abb. 14 zeigt die Beugungsfigur eines 4-fach-Spalts, wie sie durch einer Linse der Brennweite $f=500$ mm auf die CCD von VideoCom abgebildet wurde.

Hier stellt sich aber ein wichtiger Unterschied zwischen der Kamera und dem menschlichen Auge heraus. Während das menschliche Auge noch problemlos viele der höheren Ordnungen erkennen kann, ist der Dynamikumfang der Kamera sehr beschränkt. Die höheren Ordnungen verschwinden schnell im schwarzen Untergrund (siehe Abb. 14).

An diesem Beispiel sind dann schließlich doch die Grenzen von VideoCom sichtbar. Trotzdem steht mit VideoCom ein insgesamt sehr leistungsfähiges Messgerät für die computerunterstützte Aufnahme von Bewegungen und relativen Intensitäten zur Verfügung. Die Software tut ihr übriges, um dem Benutzer alle Möglichkeiten der Kamera auf einfache Art und Weise zu erschließen.

Insgesamt konnte durch die dargestellten Beispiele dieses Artikels auf besonders eindrucksvolle Weise der Beweis erbracht werden, dass ein computerunterstütztes Physiklernen mit VideoCom in der Lage ist, das klassische Repertoire der Wissens- und Fertigkeitenvermittlung um eine bedeutsame Komponente zu erweitern. Sie betrifft die Physik sozusagen querdurch: die physikalischen Sachverhalte ebenso wie die theoretischen Konzepte. Überzeugend konnte dies an der klassischen Mechanik und der Optik demonstriert werden.

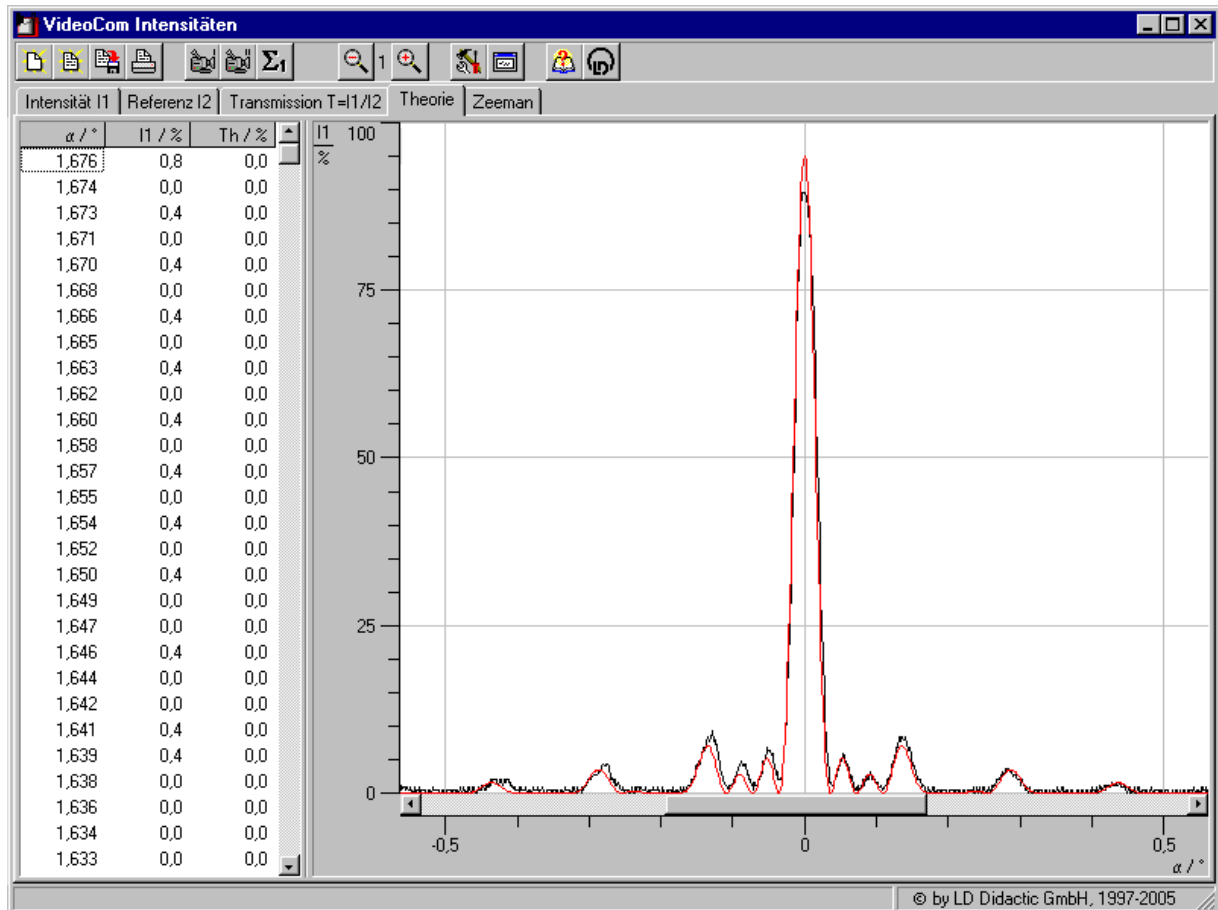


Abb. 14

Zur Untersuchung der Beugung am Spalt (hier 4-fach-Spalt) ist die Kamera nur beschränkt geeignet. Die Intensitäten werden nur mit 8 Bit aufgelöst (256 Stufen). Deshalb verschwinden die höheren Beugungsordnungen schnell im schwarzen Untergrund. Der Vergleich mit der Theorie fällt dagegen sehr überzeugend aus. Die rote theoretische Kurve ist von der gemessenen Beugungsfigur kaum noch zu unterscheiden.

Grundausstattung VideoCom

VideoCom (inkl. Software)	337 47
Steckernetzgerät 230 V / 12 V ~	562 791
Kamerastativ, z. B.	300 59
Haltemagnet, z. B.	336 21
Falkkörper zu VideoCom	337 472
Computer mit	
Windows 95 oder Windows NT	

Besuchen Sie uns auch auf unserem Internetserver <http://www.ld-didactic.de>.