

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

# BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

## Wege in der Physikdidaktik

Band 4

ISBN 3 - 7896 - 0588 - 9

Verlag Palm & Enke, Erlangen und Jena 1998

### Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.  
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle  
genutzt werden. Auf der Homepage

[www.solstice.de](http://www.solstice.de)

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

M. Hund

## VideoCom - eine einzeilige CCD-Kamera zur hochauflösenden Bewegungsaufnahme und zur Messung von Intensitätsverteilungen

Die Aufnahme und Auswertung von Bewegungsvorgängen ist eine grundlegende Aufgabe des Physikunterrichts. Dabei spielen besonders eindimensionale Bewegungen eine große Rolle. Zur Registrierung solcher Bewegungen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten (z. B. Staubmarkenmethode, Lichtschranken, Ultraschall). Der vorliegende Beitrag stellt eine neue, einfache Methode zur Erfassung eindimensionaler Bewegungen vor. Es handelt sich um eine von der Firma LEYBOLD DIDACTIC GMBH entwickelte Kamera, mit dem Namen VideoCom, deren Möglichkeiten an einigen charakteristischen Beispielen vorgestellt werden.



Abb. 1 Beispiel für den Einsatz von VideoCom zur Aufnahme der Bewegung zweier gekoppelter Pendel. Die beiden Pendelkörper sind mit retroreflektierender Folie beklebt, so daß sie sich besser vor dem Hintergrund abheben. Sie werden durch das in VideoCom eingebaute „Blitzlicht“ (Leuchtdiodenarray) beleuchtet .

## 1 Prinzip der Kamera

Das Herzstück der Kamera ist ein Einstreifen - CCD-Chip (CCD: Charge Coupled Device), der als eindimensionaler Fotodetektor dient. Der Streifen 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  $28\ \text{mm} \times 200\ \mu\text{m}$ . Mit  $28\ \text{mm}$  ist sie also etwas kleiner als die Breite des in der Fotografie üblichen Kleinbildformats. Daher kann ein handelsübliches Fotoobjektiv der Brennweite  $f = 50\ \text{mm}$  mit manuell einstellbarer Entfernung und Blende als Abbildungsobjektiv verwendet werden. Die an jedem Pixel anstehenden Daten, Ort und der zur Beleuchtung proportionale Ladungszustand, werden über eine besondere Ausleseeinheit an einen PC übermittelt und stehen dann der Auswertung zur Verfügung.

Bei der Registrierung von Bewegungsvorgängen ist eine passende Beleuchtung notwendig. Diese wird von einem zusätzlich entwickelten „Leuchtdiodenblitz“, der um die Schlitzblende (s. Abb. 1) vor dem Objektivs angeordnet ist, gewährleistet. Die Schlitzblende ist parallel zur CCD-Zeile orientiert und läßt nur das für die Messung relevante Licht durch. Die Leuchtdioden brauchen nur solange eingeschaltet werden, wie für das Aussteuern der Pixel notwendig ist. Die „Blitzdauer“ wird im Bereich  $1/800\ \text{s}$  bis  $1/4000\ \text{s}$  über den Computer automatisch passend zu den jeweiligen Beleuchtungsverhältnissen so eingestellt, daß die für die Pixel erforderliche Belichtung gewährleistet ist. Eine kurze Belichtungszeit ist notwendig, damit die Bewegungsunschärfe möglichst klein ist. Zur Erhöhung des Kontrastes empfiehlt es sich, den bewegten Körper mit einer reflektierenden Folie zu bekleben. Hierfür eignet sich am besten eine auch für Sicherheitsmaßnahmen im Straßenverkehr vorgesehen retroreflektierende Folie. Die Kamera kann auch ohne Blitz verwendet werden.

Zur Abschätzung der Ortsauflösung sind in Abb. 2 die für Anwendungen typischen Abbildungsverhältnisse angegeben. Die CCD-Zeile hat eine Auflösung von  $0,0137\ \text{mm}/\text{Pixel}$ . Aus der Geometrie der Anordnung folgt, daß die Auflösung in diesem Fall  $0,55\ \text{mm}$  beträgt. Bei einem sich bewegenden Körper kommt noch die Bewegungsunschärfe dazu, die sich bei einer typischen Geschwindigkeit von  $1\ \text{m/s}$  und einer Belichtungszeit von  $1/800\ \text{s}$  zu  $1,25\ \text{mm}$  ergibt.

Mit dem VideoCom-System können bis zu 80 Bilder pro Sekunde aufgenommen werden.

## 2 Anwendungsbeispiele

Zur Steuerung der Kamera, des Experiments und der Datenaufnahme und zur Auswertung sind zur Zeit zwei Computer-Programme vorgesehen. Zu beiden Programmen werden im Folgenden einige repräsentative Beispiele vorgestellt. Das erste Programm dient zur Untersuchung unterschiedlicher Bewegungsvorgänge, das zweite Programm zur Erfassung von Intensitätsverteilungen in Lichtbündeln, wie sie z.B. bei der Untersuchung von optischen Spektren notwendig ist. Die Programme sind sowohl unter Windows 95 als auch unter Windows NT lauffähig.

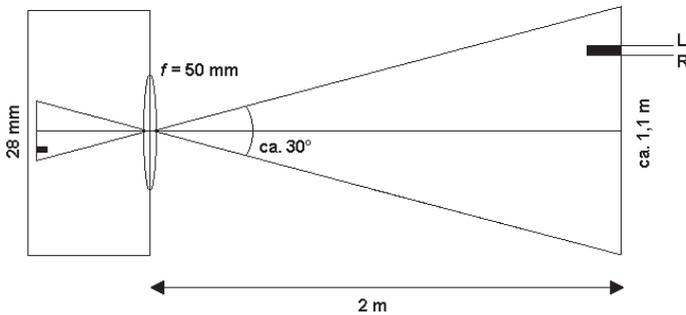


Abb.2: Skizze zur Abschätzung der Ortsauflösung durch VideoCom. Die CCD-Zeile hat eine Auflösung von  $0,0137 \text{ mm/Pixel}$ . Damit ist die Orstauflösung bei dem gewählten Abstand von 2m und der Objektivbrennweite von  $f = 50 \text{ mm}$  ca.  $0,55 \text{ mm}$ . Bei einer Messung wird die Ortskoordinate der linken und der rechten Kante eines Reflexes gemessen und daraus die Koordinaten des Mittelpunktes des Streifens berechnet.

## 2.1 Gekoppelte Pendel

Zur Untersuchung der Schwingung gekoppelter Pendel wird der in Abb. 1 dargestellte Versuchsaufbau verwendet. Die Pendel sind mit retroreflektierender Folie beklebt. Vor der Messung müssen die Entfernung eingestellt, die Belichtungsbedingungen angepaßt und der Abstand der beiden Pendel dem Programm über die Tastatur mitgeteilt werden. Das Ergebnis einer Messung mit anschließender Auswertung durch das Computerprogramm ist in Abb. 3 dargestellt. Im Bild sind drei verschiedene Darstellungsmöglichkeiten zu erkennen: die direkte Bewegung der Pendel bei der Aufnahme, die Meßwerttabelle und das zugehörige Diagramm. Die Ortsauflösung ist so gut, daß noch interessierende Teilbereiche der Kurve vergrößert (Zoomfunktion) im Diagramm dargestellt werden können. Das Programm erlaubt auch die Fourieranalyse der gemessenen Weg-Zeit-Abhängigkeit z.B. von  $s(t)$ . Das Ergebnis ist in Abb. 4 dargestellt. Aufgetragen ist die relative Amplitude als Funktion der Frequenz - links in Tabellenform und rechts als Grafik. Man kann hieraus sofort die Frequenz der beiden Grundschwingungen der Pendel ablesen.

## 2.2 Bewegungen bei konstanter Beschleunigung

Bei diesem Standardexperiment des Physikunterrichts wird auf einer Luftkissenfahrbahn ein Gleiter durch unterschiedliche Kräfte  $F$  beschleunigt. Der Gleiter wird über einen Magneten gehalten. Mit Hilfe von VideoCom wird zum Start der Messung der Strom durch den Haltemagnet abgeschaltet, so daß der Gleiter zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$  startet. Anschließend wird das entsprechende  $s(t)$ -Diagramm

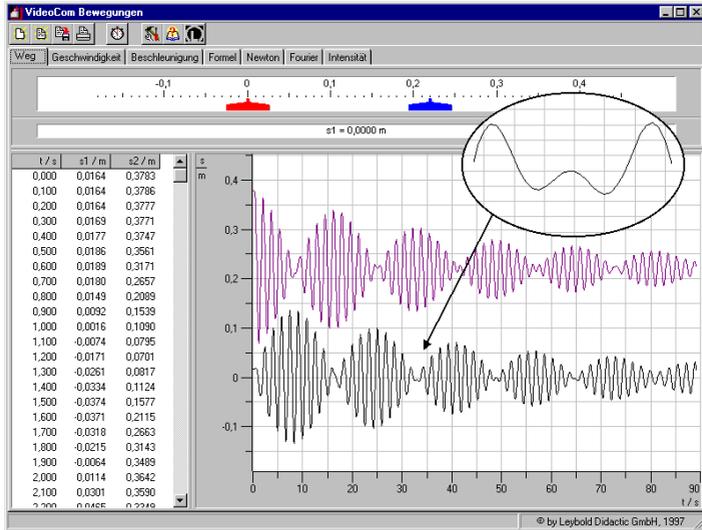


Abb. 3: Pendelauslenkung als Funktion der Zeit für die gekoppelte Schwingung. Die Auflösung der Ortsmessung ist so groß, daß eine vergrößerte Darstellung (Zoomfunktion im Programm) interessanter Teilbereiche noch möglich ist - hier der Bereich des Phasensprungs.

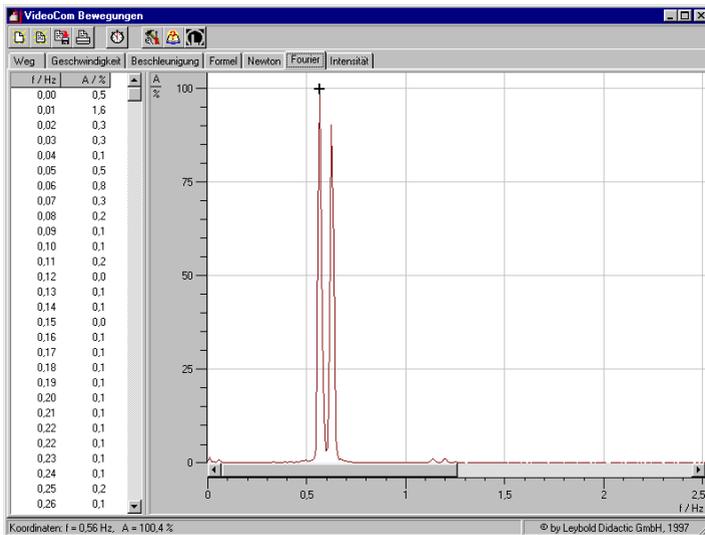


Abb. 4: Frequenzspektrum der in Abb. 3 gezeigten Schwingung. Es zeigt, daß die beiden Grundschwingungen nicht gleich waren. Die niedrigere Frequenz wird über die Mausposition (+) in der Fußzeile angezeigt (f = 0,56 Hz).

aufgenommen. Abb. 5 zeigt für vier unterschiedliche Messungen die aus den Meßwerten mit dem Programm berechneten  $s(t)$ -,  $v(t)$ - und  $a(t)$ -Kurven. In einem vierten Diagramm wird die jeweilige beschleunigende Kraft gegen die aus den vier Messungen bestimmten Beschleunigungen aufgetragen. Man erkennt insgesamt, daß die erwarteten Gesetzmäßigkeiten gut bestätigt werden, was eine direkte Abschätzung der Güte des neuen Meß- und Auswertverfahrens erlaubt.

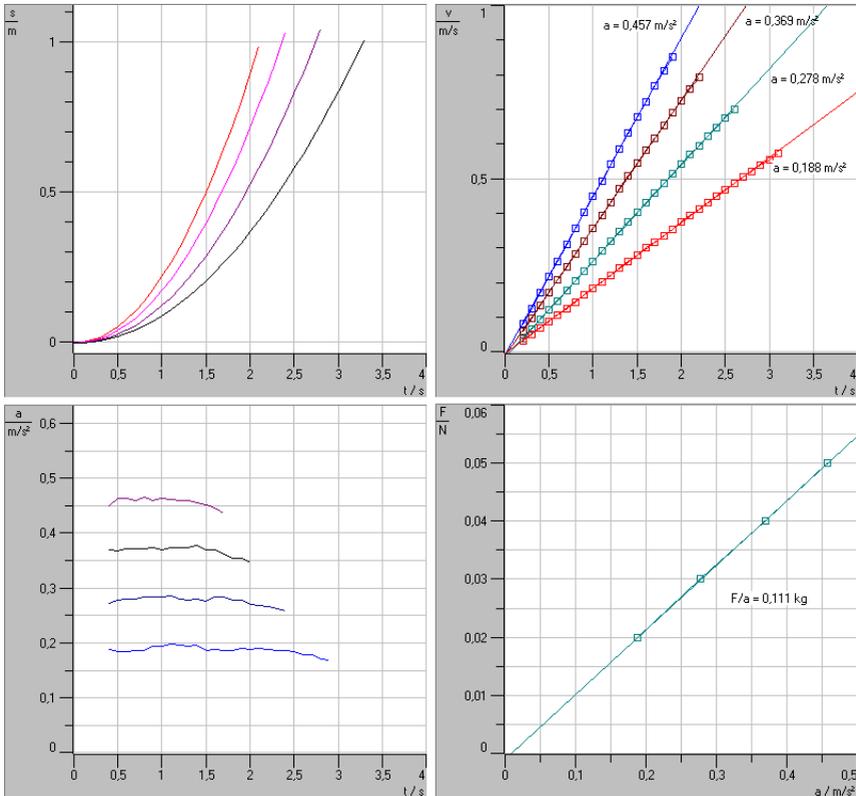


Abb. 5: Zusammenstellung der Ergebnisse der Fahrbahnversuche: Dargestellt sind für vier beschleunigende Ergebnisse die zugehörigen  $s(t)$ -  $v(t)$ -  $a(t)$ - Diagramme. Im  $v(t)$ -Diagramm sind zusätzlich die vom Programm gelieferten Ausgleichsgeraden eingezeichnet. Im vierten Diagramm sind die beschleunigenden Kräfte gegen die aus der Messung ermittelten Beschleunigungen aufgetragen. Die gute Bestätigung der erwarteten Abhängigkeiten gibt einen direkten Hinweis auf die Güte des neuen Meß- und Auswertverfahrens.

### 2.3 Stoß zweier Gleiter

Die große Zahl der pro Sekunde aufnehmbaren Bilder (80 Bilder/s) macht es möglich, auch schnell ablaufende Stoßvorgänge zwischen Gleitern (Stauchern und Dehnen einer Feder) einer Luftkissenfahrbahn zeitlich aufzulösen und zu untersuchen. Wichtig ist nur, daß die Stoßdauer so gewählt wird, daß während des Stoßes noch einige Aufnahmen (Positionsbestimmungen) gemacht werden können. Bei den von uns gewählten Bedingungen beträgt die Stoßdauer ca. 90 ms, bei der der Stoßvorgang noch mit VideoCom registriert (8 Aufnahmen) und ausgewertet werden kann. In Abb. 6 ist die entsprechende Auswertung dargestellt. Aus den Meßwerten können praktisch in Echtzeit die Geschwindigkeiten und

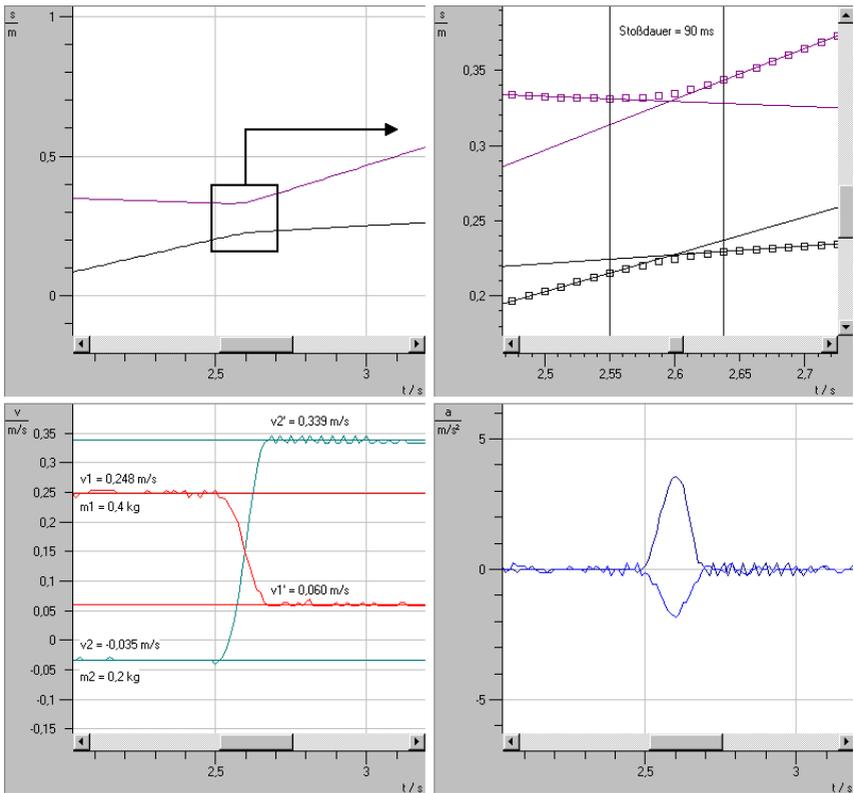


Abb. 6: Zusammenstellung der mit VideoCom erreichten Ergebnisse für den Fall der Untersuchung eines Stoßvorgangs auf einer Luftkissenfahrbahn (zwei Gleiter ( $m_1=0,2$  kg und  $m_2=0,4$  kg), an einem Gleiter ist eine Feder befestigt). Für den Stoßvorgang sind das  $s(t)$ - (mit vergrößert dargestelltem Ausschnitt), das  $v(t)$ - und  $a(t)$ -Diagramm für die beiden Gleiter dargestellt.

Beschleunigungen während des Stoßes berechnet werden. Im in Abb. 6 gezeigten Beispiel wurden die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen nach

$$v_i = (s_{i+2} - s_{i-2}) / (t_{i+2} - t_{i-2}) \quad a_i = (v_{i+2} - v_{i-2}) / (t_{i+2} - t_{i-2}) \quad (1)$$

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 für die Auswertung genügend Werte übrig, um eine physikalisch sinnvolle Aussage treffen zu können.

Für die Bestätigung der Impulserhaltung gibt es 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. Zusätzlich zu  $a(t)$  kann auch  $F = ma(t)$  berechnet werden. Man erkennt, daß zu jedem Zeitpunkt die beiden so erhaltenen Kräfte gegengleich sind. Die Fläche unter jeder Kurve beschreibt den Kraftstoß und damit den Impulsübertrag. Die Gleichheit der Flächen zu jedem Zeitpunkt ist ein Hinweis auf die Impulserhaltung.

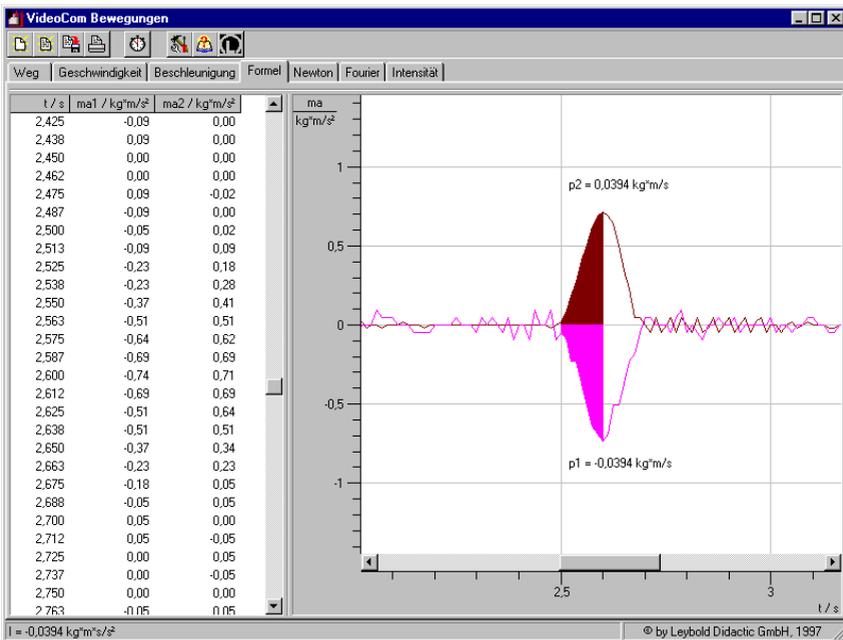


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Kräfte während des Stoßes; berechnet mit den Daten aus Abb. 6. Diese Darstellung erlaubt den direkten Nachweis des 3. Newtonschen Axioms und der Impulserhaltung. Der nach der halben Stoßzeit übertragene Impuls beträgt 0,04kgm/s.

## 2.4 Freier Fall

Ein weiteres Anwendungsbeispiel, durch das die hohe Aufnahmegeschwindigkeit und Auflösung von VideoCom dokumentiert wird, ist die Untersuchung des freien Falls eines Körpers. Hierbei geht man ähnlich vor, wie bei den Fahrbahnversuchen. Der Körper wird mit einem Streifen retroreflektierender Folie beklebt. Er wird bis zum Start der Messung durch einen Magneten gehalten. Der Start, die Aufzeichnung und die Auswertung werden wieder von VideoCom mit dem Computerprogramm gesteuert. Abb. 8 zeigt das so erhaltene  $s(t)$ - und  $a(t)$ -Diagramm für den Fall einer Kunststoffplatte.

Der im  $a(t)$ -Diagramm angegebene Fehler ist rein statistisch und wurde aus der Streuung der einzelnen Meßpunkte berechnet.

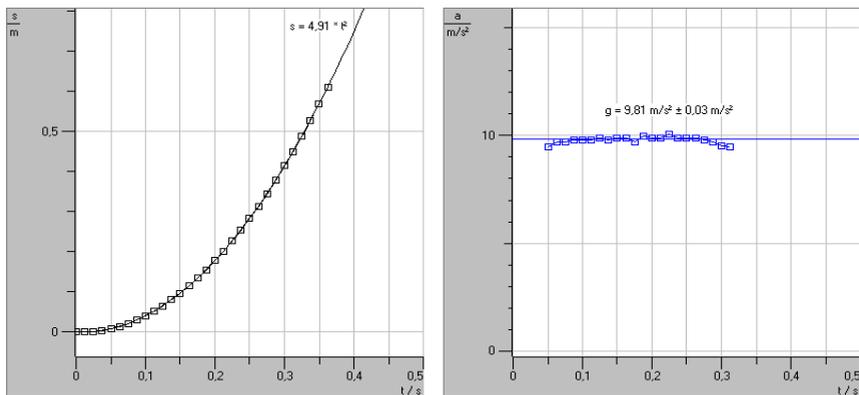


Abb. 8: Beispiel einer Messung für den freien Fall eines Körpers. Auch hiermit wird die hohe Aufnahmegeschwindigkeit mit bis zu 80 Bildern pro Sekunde dokumentiert. Die durchgezogenen Linien stellen die an die Meßwerte angepaßten Kurven dar. Aus dem  $a(t)$ -Diagramm kann direkt die Erdbeschleunigung abgelesen werden.

## 2.5 Transmissionskurven für optische Filter

Die Erfassung des Ortes eines Reflexpunktes erfolgt dadurch, daß für ein Pixel abgefragt wird, ob Licht auffällt oder nicht. Als digitale Kamera kann VideoCom auch die Intensität des auf ein Pixel fallenden Lichts erfassen und als Zahlenwert verschlüsselt zum Computer übertragen. Diese Option eignet sich insbesondere für Meßaufgaben in der Optik, z.B. zum Ausmessen eines Spektrums, bei dem der sichtbare Bereich gerade den Pixelstreifen ausfüllt. Will man die Intensitätsinformation für alle 2048 Pixel übertragen, so dauert dies wegen des hohen Datenaufkommens etwa 2 s. Das ist jedoch für viele optische Versuche nicht weiter störend.

Eine Anwendung der Untersuchung eines Spektrums ist die Ausmessung der Transmissionskurve für ein Filter. Dazu wird ein einfacher Gitterspektalapparat aus

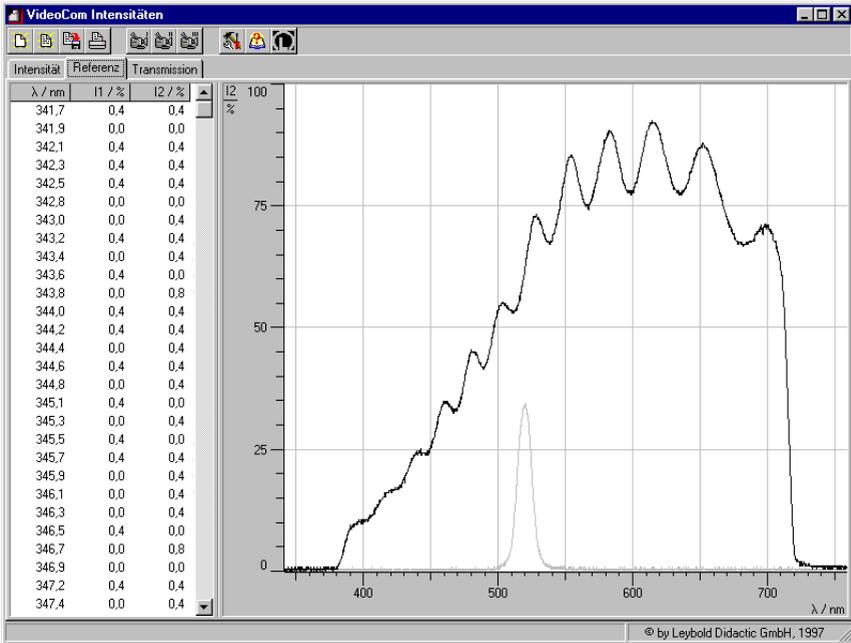


Abb. 9 Intensitätsverteilung innerhalb eines kontinuierlichen Spektrums einer Glühlichtquelle gemessen in in der ersten Beugungsordnung. Die linke und rechte „Kante“ der Kurve sind auf die Strahlbegrenzung zurückzuführen. Die wellenartige Struktur des Spektrums läßt sich durch Interferenz an der dünnen Schutzschicht, mit der die Pixel versehen sind, erklären. Die zweite Kurve mit dem Maximum bei 520nm ergibt sich bei einem zusätzlich in den Strahlengang gebrachten, grünen Interferenzfilter (Halbwertsbreite:  $\Delta\lambda=11,5$  nm). Die Kalibrierung kann mit Filtern unterschiedlicher Zentralwellenlängen oder mit den bekannten Linien z.B. einer Hg-Dampfampe durchgeführt werden..

Aufbauteilen der Sammlung in bekannter Weise zusammgebaut. Das Spektrum wird mit der Digitalkamera betrachtet (Entfernungseinstellung am Objektiv auf Unendlich). Das Ergebnis einer Messung ist in Abb. 9 zu sehen. Zunächst ist das kontinuierliche Spektrum einer Glühlichtlampe aufgezeichnet. Zusätzlich ist noch das Spektrum eines schmalbandigen Filters gezeigt, das bei 520 nm sein Maximum hat. Letzteres dient zur Kalibrierung der Anordnung, d.h. zur Zuordnung der Pixelnummer zur jeweiligen Wellenlänge. Die wellenförmige Struktur der Intensitätsverteilung wird durch einen Interferenzeffekt verursacht, der durch eine dünne Schutzschicht (Dicke  $d$ , Brechzahl  $n$ ) über den Pixeln verursacht wird. Beim Durchgang des Lichts durch diese Schicht tritt eine Strahlteilung auf. Das eine Bündel ist das direkt die Schicht durchlaufende Licht, das andere ist dasjenige Licht, das innerhalb der Schicht zunächst an der unteren, dann an der oberen

Grenzschicht reflektiert wird, um dann die untere Grenzschicht zu durchdringen. Beide Bündel verlaufen parallel und haben für kleine Einfallswinkel annähernd die Phasenverschiebung  $2dn$ . Die Intensität des zweiten Bündels ist allerdings - bedingt durch die Verluste bei den zwei Reflexionen - wesentlich kleiner, so daß die zusätzliche Modulation durch die Interferenz nur im Prozentbereich liegt.

Zur Bestimmung der Transmissionskurve für ein Filter bringt man dieses in den Strahlengang, zeichnet die Intensitätsverteilung für das ungefilterte und das gefilterte Licht mit VideoCom auf und berechnet daraus die relative Verteilung. Durch die Quotientenbildung verschwinden die Modulationen. In Abb. 10 sind für einige Filter die gemessenen Transmissionskurven angegeben.

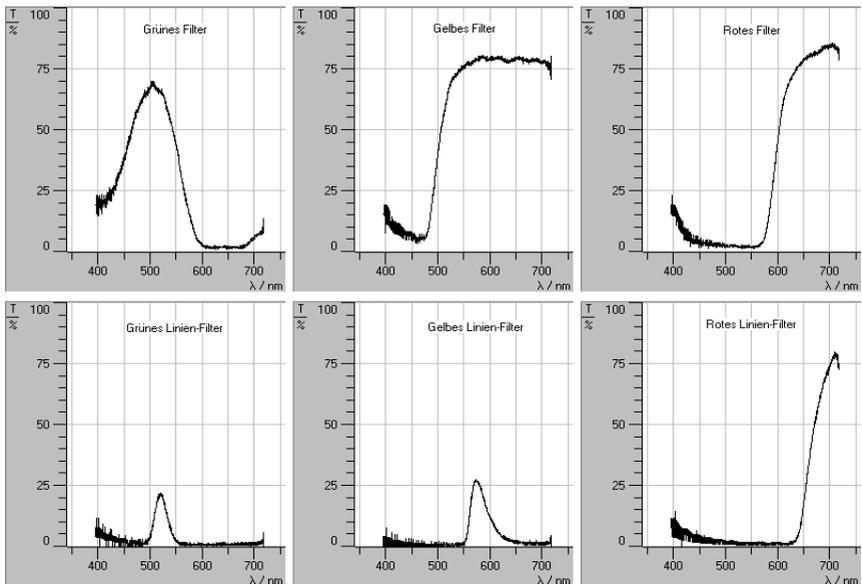


Abb. 10: Gemessene Transmissionskurven für verschiedene Filter.

### 3 Schlußbemerkung

VideoCom stellt ein leistungsfähiges, modernes Meßverfahren dar, das für den Physikunterricht geeignet ist. Neben den Vorzügen einer schnellen und einfachen Erfassung und Auswertung von Meßwerten kann VideoCom zusätzlich für den Unterricht interessant sein, weil es moderne elektronische Komponenten miteinander verbindet und zugänglich macht. Für viele Schülerinnen und Schüler mag es besonders motivierend sein, wenn man im Unterricht näher auf die Funktionsweise und die Grenzen von VideoCom eingeht. Die angeführten Beispiele sollten exemplarisch die Möglichkeiten des Meßsystems erläutern. Für den Anwender besteht natürlich die Freiheit, nach weiteren, für seinen Unterricht passende Anwendungen zu suchen.