

# Neue Möglichkeiten bei der Videoanalyse am Beispiel von Sportbewegungen

Tobias Mück, Thomas Wilhelm

## 1. Videoanalyse von Sportbewegungen

Der Einsatz der digitalen Videoanalyse von Bewegungen ist heute in Lehrplänen vorgesehen. Als Messwerterfassungssystem eignet sie sich besonders, aber nicht nur für den Kinematik- und Dynamikunterricht. Immer wieder erscheinen neue Programme, die teilweise auch neue Funktionen bieten. Im Folgenden soll eine Vielzahl neuerer Möglichkeiten aufgezeigt werden. Sie sind alle mit dem Softwareprogramm „measure Dynamics“ [1-3] möglich und mit der Version 1.3f built 336 erstellt worden. Im ersten Teil werden Beispiele aus dem Sportbereich gezeigt [4+5]. Der zweite Teil gibt einen Überblick über neue Möglichkeiten der Videoanalyse.

### 1.1 Stabhochsprung

Der Stabhochsprung stellt ein Beispiel eines Energieerhaltungsprozesses dar, bei dem versucht wird, die im Anlaufvorgang erworbene kinetische Energie mithilfe eines elastischen Stabes im Idealfall komplett in potentielle Energie umzuwandeln. Eine entscheidende Bedeutung kommt dabei dem verwendeten elastischen Glasfiberstab zu. Denn dadurch, dass die Bewegungsenergie in Form von Spannenergie im Stab zwischengespeichert werden kann, kann diese wesentlich effektiver zur Überwindung einer Höhendifferenz eingesetzt werden als dies beispielsweise beim Hochsprung der Fall ist.

Analysiert wurde die Bewegung eines Markierungsklebspunktes auf Hüfthöhe, welcher vereinfachend den Körperschwerpunkt der Athletin darstellen sollte. Zunächst kann die komplette Bahnkurve des Objektes z. B. in Form von farbigen Punkten ins Video eingeblendet werden (siehe Abb. 1). Alternativ bietet das Programm die Erstellung eines Stroboskopbildes an, welches den Bewegungsablauf des Athleten zusätzlich verdeutlicht (siehe Abb. 2). Die Darstellungsmöglichkeit des Stroboskopbildes hilft vor allem bei

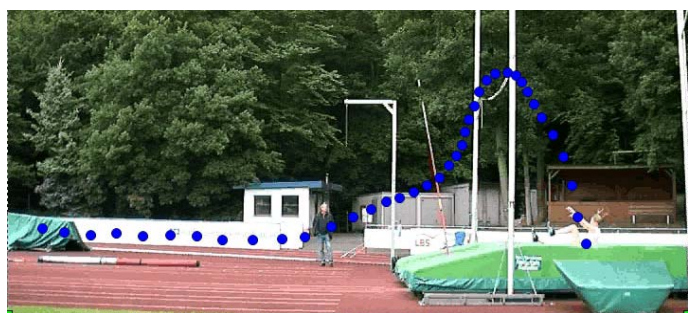


Abb. 1: Bahnkurve eines Stabhochsprunges



Abb. 2: Stroboskopbild des Sprungvorganges

technisch sehr anspruchsvollen Sportarten, wie eben dem Stabhochsprung, den Bewegungsablauf einzelner Körperteile vor allem aus sportwissenschaftlicher Sicht genauer studieren zu können. Auf diese Weise ist es möglich, technische Defizite wie etwa falsche Körperhaltungen oder Schrittfehler beim Anlaufvorgang zu minimieren, um somit den Bewegungsablauf zu optimieren.

Nach erfolgreicher Analyse gilt es nun die ermittelten Daten auszuwerten. In Abbildung 3 werden die Verläufe der kinetischen Energie ( $E_{kin}$ ), der potentiellen Energie ( $E_{pot}$ ) sowie der Summe beider Energieformen ( $E_{ges}$ ) als Funktion der Zeit veranschaulicht.

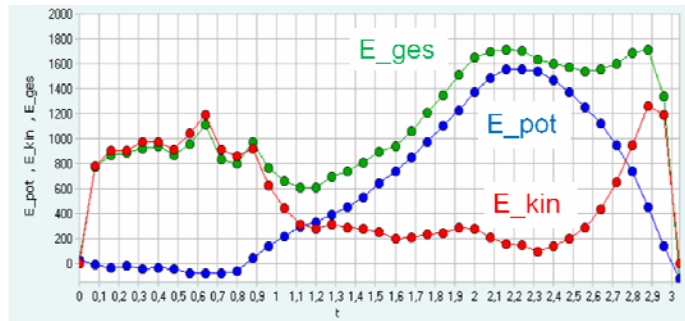


Abb. 3: Energiebeiträge beim Stabhochsprung

Der Athlet erwirbt während des Anlaufvorganges ( $t = 0,0 - 0,8$  s) zunächst kinetische Energie ( $E_{kin}$ ).

Wird die geringe vertikale Bewegung des Körperschwerpunktes vernachlässigt, so besteht die Gesamtenergie während dieser Zeit ausschließlich aus kinetischer Energie. Um beim Absprung einen hohen Energiebetrag aufzuweisen, versucht der Sportler sein Tempo bis zum Einstich konstant hoch zu halten. Daher ist es wichtig, den Stab während des Laufens ruhig zu halten, um Schwingungen des Stabes zu vermeiden, da diese zu einer Abbremsung und damit zu energetischen Verlusten führen würden.

Die Zusammensetzung der Gesamtenergie ( $E_{ges}$ ) aus beiden Energieformen ändert sich nach dem Einstich des Stabes ( $t = 0,8$  s) grundlegend. Der Springer benutzt nun den Stab, um einen möglichst großen Teil seiner vorher erworbenen Energie ( $E_{kin}$ ) in Höhenenergie ( $E_{pot}$ ) umzuwandeln. Dies erscheint auf den ersten Blick nicht der Fall zu sein, denn die Summe beider Energien  $E_{ges} = E_{kin} + E_{pot}$  nimmt von knapp 1000 Joule auf ungefähr 600 Joule ab ( $t = 0,8 - 1,2$  s). Genau jenen scheinbaren Energieverlust gilt es in der Schule zu diskutieren. Denn bei genauerem Hinsehen fällt im Video auf, dass gerade während dieser Zeit die Stabbiegung zunimmt. Dies bedeutet, dass dem Stab Spannenergie zugeführt wird. Aufgrund der Elastizität des Glasfiberstabes kann hiermit ein Großteil der Bewegungsenergie zwischengespeichert werden. Sehr schön zu erkennen ist auch, dass  $E_{ges}$  genau dann minimal ist, wenn die Stabbiegung am größten ist ( $t = 1,2$  s). Im folgenden Zeitintervall ( $t = 1,2 - 1,7$  s) gibt der Stab die gespeicherte Energie wieder an den Athleten ab. Durch die schnelle Streckung des Stabes wird der Athlet nach oben katapultiert und verzeichnet somit einen Höhengewinn. Bei vollkommen gestrecktem Stab ( $t = 1,7$  s) ist  $E_{ges}$  wieder auf den anfänglichen Wert von 1000 J angestiegen.

Erstaunlich ist jedoch, dass die Summe beider Energiekomponenten  $E_{kin} + E_{pot}$  im nächsten Zeitabschnitt weiter ansteigt ( $t = 1,7 - 2,2$  s), was dem Energieerhaltungssatz zu widersprechen scheint. Für die beobachtete Energiezunahme ist eine nicht visualisierbare Energiezufuhr verantwortlich; dazu verrichtet der Springer mit seinen Muskeln Hubarbeit. Aus dem

Diagramm kann entnommen werden, dass dieser Beitrag mit ungefähr 700 J in Wirklichkeit einen beträchtlichen Teil der Gesamtenergie ausmacht. Die Schüler lernen so das Prinzip der Energieerhaltung kritisch anzuwenden.

Daneben gibt es zahlreiche andere physikalische Sachverhalte, die anhand des Stabhochsprunges behandelt werden können. Das System Sportler-Stab kann z. B. als Doppelpendel modelliert werden. Wie in Abbildung 4 ersichtlich, stellen die Einstichstelle des Stabes (gelb) sowie die Schulter des Sportlers (gelb) die Drehachsen der beiden Pendel dar. Durch geschickte Variation von Trägheitsmomenten einzelner Körperteile wird nach dem Einstich der Sprung optimiert.



Abb. 4: Springer-Stab als Doppelpendel

## 1.2 Weitsprung

Der Weitsprung eignet sich gut dazu, die grundlegenden Prozesse der Modellbildung und Simulation zu diskutieren, denn der Sprung kann als schiefer Wurf des Körperschwerpunkts modelliert werden. Da hierzu Elementarisierungen notwendig sind, lernen Schüler gleichzeitig die Grenzen von Modellen in der Physik und Fehlerabschätzungen kennen. Weitere mögliche Lerninhalte sind unter anderem vektorielle Betrachtungen der Anlaufgeschwindigkeit sowie die physikalische Interpretation verschiedener Sprungtechniken. Vorteil dieser Sportart ist, dass sie von den Schülern selbstständig ausgeführt werden kann, was beim Stabhochsprung nicht der Fall war. Die Messungen am eigenen Körper machen den Lernstoff dabei lebendiger und persönlicher, was positive Lerneffekte erhoffen lässt.

Um den schiefen Wurf des Körperschwerpunktes (KSP) zu verfolgen, werden den Schülern Klebepunkte etwa auf Hüfthöhe angebracht, die vereinfacht den KSP darstellen sollen. Abbildung 5 zeigt ein Stroboskopbild eines derartigen Sprunges. Zur besseren Übersicht wurde ein einfarbiger Hintergrund gewählt. Zudem kann die Bahnkurve des KSP komplett als Diagramm eingeblendet werden (siehe Abb. 6) oder vom Videoanalyseprogramm simultan mit dem Ablauf des Videos entwickelt werden.

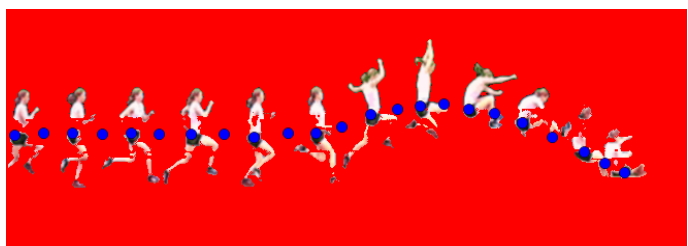


Abb. 5: Stroboskopaufnahme des Weitsprungs

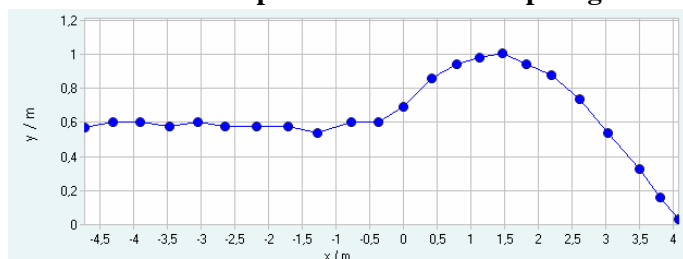
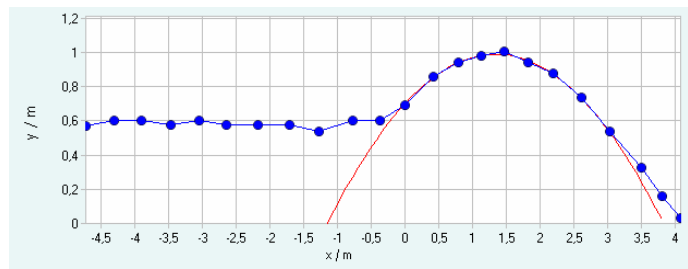


Abb. 6: Bahnkurve in Diagrammdarstellung

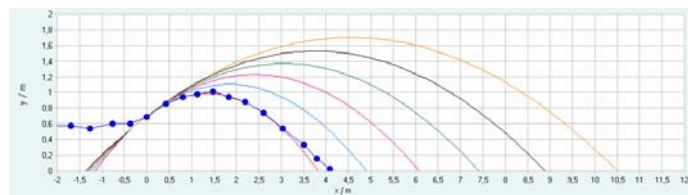
Die Fragestellungen rund um ein Weitsprungprojekt können sich von Messung von Anlauf-tempo und Sprungweite für eine Modellierung bis hin zu Auswirkungen von Variationen der Modellparameter im entwickelten Modell erstrecken. So kann z.B. in „measure Dynamics“ ein aufgenommener Sprung mit einer zugeschalteten Simulationskurve verglichen werden. Die Parameter der Simulationskurve werden dem Video mittels Messfunktionen entnommen. In diesem Fall werden Absprungtempo, Absprungwinkel und die Absprunghöhe benötigt. Daraus ergibt sich schließlich eine Simulationskurve, welche die gemessene Bahnkurve mög-

lichst gut approximieren sollte. Im vorliegenden Fall ergeben sich tatsächlich trotz des sehr simplen Modells des schiefen Wurfes erstaunlich gute Approximationen, wie in Abbildung 7 in einem x-y-Diagramm gezeigt wird. Zu erkennen ist dabei, dass sich erst kurz vor der Landung des Springers signifikante Abweichungen von Modellkurve zur real gemessenen Bewegung ergeben. Dies liegt an der Sprungtechnik des Athleten, welche später noch behandelt wird.



**Abb. 7: Vergleich Modell - reale Bewegung**

Sollen Aussagen über den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Sprungweite gemacht werden, so bietet sich die so genannte Schiebereglerfunktion an, über welche „measure Dynamics“ verfügt. Bei spezieller Eingabe der



**Abb. 8: Variation des Absprungtempos**

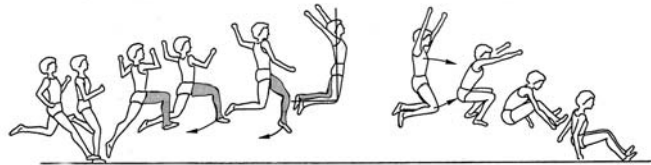
verwendeten Fitfunktionen der Simulation lassen sich sämtliche Einflussgrößen manuell regeln. Die Veränderungen der Simulationskurve, die aus der Variation der Parameter resultieren, werden instantan angezeigt. Auf diese Weise kann die Bedeutung wesentlicher Einflussfaktoren des Modells verständlich erläutert werden. Im vorliegenden Fall wurde der Einfluss des Absprungtempos auf die Sprungweite analysiert (siehe Abb. 8). Die einzelnen Simulationskurven in Abbildung 8 unterscheiden sich im Absprungtempo jeweils um 1 m/s. Deutlich sichtbar ist, dass ein hohes Absprungtempo einen entscheidenden Faktor für einen erfolgreichen Sprung darstellt. Analoge Variationen können natürlich auch für den Absprungwinkel sowie die Absprunghöhe gemacht werden.

Aber nicht nur für den Physiker ist die Auswertung des Weitsprungs per Videoanalyse sinnvoll. Gerade Sportwissenschaftler nutzen vielfach diese Arbeitsmethode aus, um verschiedene technische Details zu optimieren, um dadurch größere Sprungweiten zu erzielen. Alle Technikmethoden nutzen physikalische Gesetzmäßigkeiten aus, was kurz anhand der Hangsprungtechnik, deren Bezeichnung sich aus der Haltung des Athleten während der Flugphase ableitet, diskutiert wird. Der beim Hangsprung erzielte Weitengewinn kann mithilfe der Newtonschen Axiomatik begründet werden. Betrachtet wird das Gesamtdrehmoment des Springers

nach dem Absprung. Auf den Sportler wirkt unter Vernachlässigung von Reibungskräften während des Fluges lediglich die Gewichtskraft in Folge der Erdbeschleunigung, wodurch jedoch keine zusätzlichen Drehmomente erzeugt werden. Es gilt damit Drehimpulserhaltung. Trotzdem ist es möglich, durch Änderung von Massenträgheitsmomenten einzelner Körperteile dort Drehmomente zu induzieren. Gemäß der Erhaltung des Drehimpulses muss dabei jedes so erzeugte Dreh-



**Abb. 9: Stroboskopbild eines Hangsprunges**

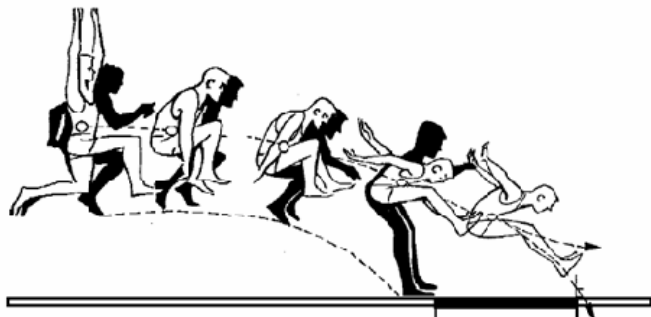


**Abb. 10: Schematischer Ablauf des Hangsprunges (aus [6])**

moment ein gegenläufiges hervorrufen. Genau dieser Sachverhalt tritt beim Hangsprung auf. Nachstehende Abbildungen zeigen einerseits ein mit „measure Dynamics“ erstelltes Stroboskopbild eines Hangsprungs (siehe Abb. 9), andererseits zum Vergleich einen technisch korrekten Sprungablauf nach sportwissenschaftlichen Überlegungen (siehe Abb. 10).

Der Athlet kann zwar nach Absprung die Flugbahn seines Gesamtkörperschwerpunktes nicht mehr beeinflussen, jedoch die Bahn verschiedener Körperteilschwerpunkte schon. Beim Hangsprung wird dies in Form einer Art „Klappbewegung“, die der eines Klappmessers ähnelt, realisiert. Dazu streckt der Sportler den Kopf samt Oberkörper nach vorne. Die Arme rotieren gleichzeitig dazu im Uhrzeigersinn nach unten, wodurch ein Drehmoment bezüglich der Hüfte als Drehachse induziert wird. Dieses Drehmoment muss durch ein gegenläufiges egalisiert werden, damit der Gesamtdrehimpuls erhalten bleibt. Jene Ausgleichsbewegung wird durch die Beine vollzogen. Diese bewegen sich in entgegengesetzter Drehrichtung, also nach vorne oben. Der Anfangsdrehimpuls bleibt somit erhalten. Welche Auswirkung diese

Anhebung der Beine letztlich auf die Landung bzw. die Sprungweite hat, wird in Abbildung 11 ersichtlich. Schwarz gezeichnet ist ein Sprung ohne Anwendung einer speziellen Technik, weiß hingegen der Hangweit-sprung. Es wird deutlich, dass der schwarz hinterlegte Sportler eine wesentlich geringere Weite zu verzeichnen hat als der weiße aufgrund der deutlich niedrigeren Flugbahn der Beine.



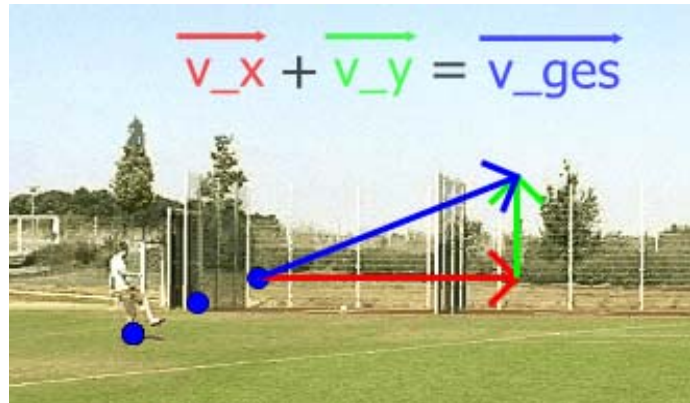
**Abb. 11: Optimierung der Sprungweite durch die Hangsprungstechnik (aus [7])**

Im Einzelnen wird der Körperschwerpunkt der Arme um etwa 60 cm nach unten verschoben. Damit ergibt sich gemäß der Definition des Gesamtkörperschwerpunktes, dessen Bahnkurve

nach dem Absprung nicht mehr beeinflusst werden kann, eine Verschiebung der anderen Körperteile nach oben, sodass sich der Gesamtschwerpunkt nicht ändert. Insgesamt resultiert durch eine Verschiebung der Beine um circa 8 cm nach oben.

### 1.3 Fußball

Eine weitere Sportart, die sich für eine Behandlung im Physikunterricht gut eignet, ist Fußball. Zunächst können die Richtungen und Zusammenhänge zwischen verschiedenen Vektorgrößen veranschaulicht werden. Auswertungsgrundlage bildet eine Fußballflanke. Im folgenden Beispiel (siehe auch Abb. 12) sind manuell Geschwindigkeitsvektoren für die Einzelkomponenten in x- bzw. y-Richtung sowie für die Gesamtgeschwindigkeit zugeschaltet,

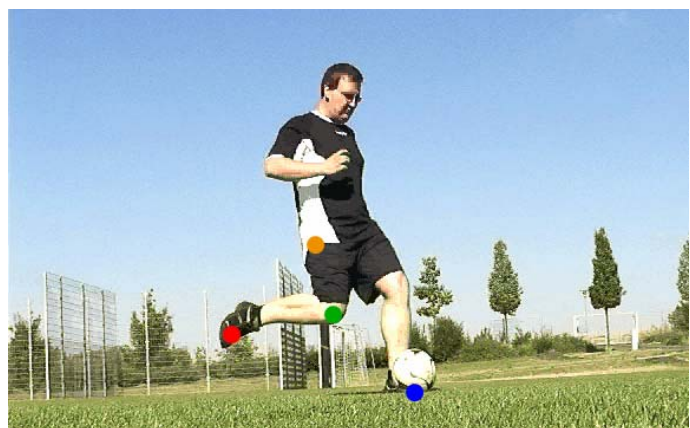


**Abb. 12: Vektoraddition am Beispiel Fußballflanke**

um einerseits den Vektorcharakter der Geschwindigkeit zu unterstreichen, andererseits aber auch das Unabhängigkeitsprinzip von überlagerten Bewegungen zu thematisieren. In gleicher Art kann die Beschleunigung komponentenweise eingeblendet werden.

Natürlich besteht auch die Möglichkeit, den schiefen Wurf anhand einer Flanke zu behandeln. Dabei ist jedoch zu beachten, dass ab einem gewissen Schusstempo die Reibungskräfte nicht mehr zu vernachlässigen sind. Gerade für die Beschreibung der Flugbahn spielen sie eine wichtige Rolle. Außerdem tritt in diesem Zusammenhang der Magnuseffekt auf, der eine Kraftwirkung auf rotierende Körper in der Luft beschreibt.

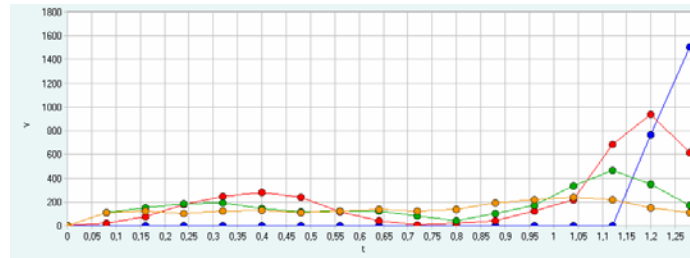
Des Weiteren kann der Schussvorgang detaillierter betrachtet werden. Um diesen physikalisch als Kraftstoß modellieren zu können, ist es sinnvoll, als Erstes den biomechanischen Bewegungsablauf des Schussbeines zu analysieren. Dazu werden verschiedene Partien des Beines verfolgt. Im Einzelnen werden die Hüfte (grau), das Knie (schwarz), der Fußspann (gelb) sowie der Ball (hellgelb) ausgewertet, was die Abbildung 13 veranschaulicht.



**Abb. 13: Bewegungsanalyse einzelner Komponenten des Schussbeines**

Um eine möglichst große Beschleunigung des Balls zu erreichen, ist es nach biomechanischen Vorstellungen besonders wichtig, die einzelnen Teile des Beines in ihrer Bewegung aufzu-

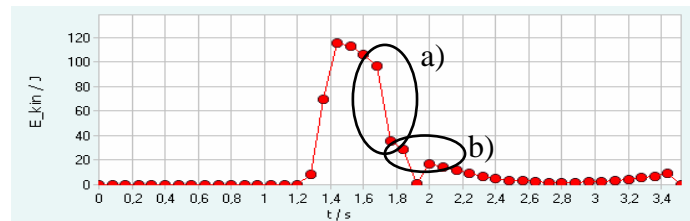
einander abzustimmen. Ziel ist ein möglichst hoher Impulsübertrag vom Fuß auf den Ball. Dies ist nur möglich, wenn die Teilimpulse der einzelnen Körperteile in optimaler Weise koordiniert werden, was durch zeitlich kurz versetzte maximale Beschleunigungen von Hüfte, Oberschenkel und Unterschenkel umgesetzt wird. Deshalb erreichen die Beinpartien auch erst nacheinander Maximalgeschwindigkeit. Diesen Sachverhalt zeigt Abbildung 14.



**Abb. 14: Geschwindigkeitsverläufe einzelner Beinpartien (grau: Hüfte, schwarz: Knie, gelb: Fußspann, hellgelb: Fußball)**

Man hätte vermuten können, dass es am geschicktesten ist, die Beschleunigung des Beines gleichzeitig zu maximieren und das Tempo bis unmittelbar zum Stoß zu erhöhen, um somit einen möglichst hohen Impulsübertrag des Fußes auf den Ball zu gewährleisten. Diese Vorstellungen sind eben nur teils richtig, da zwar ein hohes Fußtempo angestrebt wird, der gesamte Beinapparat jedoch bereits Sekundenbruchteile vor dem eigentlichen Ballkontakt abgebremst wird. Das liegt daran, dass durch Muskelkraft alle Beinpartien angespannt werden, wodurch der Fuß insgesamt steifer und damit stabiler wird. Bei diesem Anspannvorgang wird das Bein schon vor dem Zusammenstoß abgebremst und büßt auf diese Weise Tempo ein. Dieser bewusste Tempoverlust wird jedoch dadurch überkompensiert, dass auf den Fußball letztlich eine sehr viel höhere Stoßmasse wirkt, welche einen größeren Impulsübertrag impliziert.

Aufbauend auf diesen Überlegungen ist es denkbar, beispielsweise den Verlauf der beim Stoßvorgang erworbenen kinetischen Energie zu untersuchen. Am Beispiel eines gewöhnlichen Schusses oder einer Flanke können so Reibungseffekte quantisiert werden.



**Abb. 15: Energieverluste des Fußballs beim Stoß mit a) der Latte b) dem Boden**

Faszinierender ist aber der Verlauf der Bewegungsenergie eines Lattentreffers. Der Ball erfährt wie beim gewöhnlichen Schuss einen Kraftstoß durch das Schussbein. Des Weiteren kommt es beim Aufprall auf die Latte zu einem weiteren Stoßvorgang, durch welchen der Ball stark deformiert wird und daher Energie an die Metalllatte abgibt. Wie sich dieser Energieübertrag im Diagramm bemerkbar macht, veranschaulicht Abbildung 15. Die Energieverluste des Balls sind also bei derart inelastischen Stößen enorm hoch.

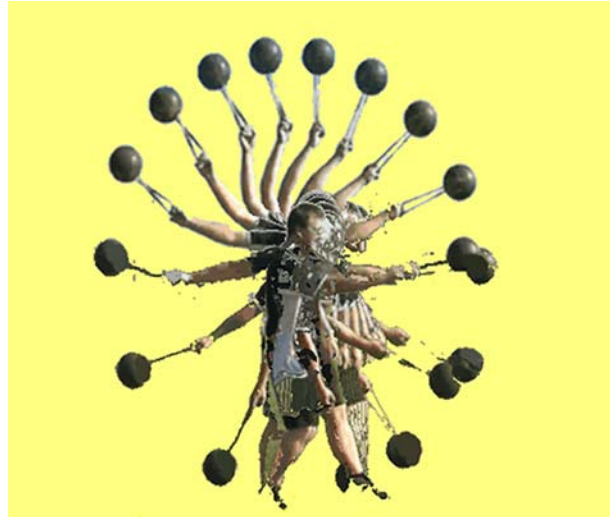
### 1.4 Drehwurfbewegungen

Drehbewegungen finden sich in vielen leichtathletischen Grunddisziplinen wie z. B. Hammerwurf, Diskuswurf oder auch Schleuderball wieder. Generell dienen die Drehbewegungen bei all diesen Sportarten dazu, das jeweilige Sportgerät auf begrenztem Raum auf möglichst hohes Tempo zu bringen. Im Schulunterricht können nachfolgende Beispielsportarten zur Einführung von Drehbewegung und der damit verbundenen physikalischen Größen eingesetzt werden. Aber auch vertiefende Betrachtungen zu auftretenden Kräften und damit verbundenen Energien bilden Problemstellungen einer Unterrichtseinheit. Viele Schüler sehen bekanntermaßen Kreisbewegungen als ungezwungene, natürliche Bewegung und damit als kräftefrei an.

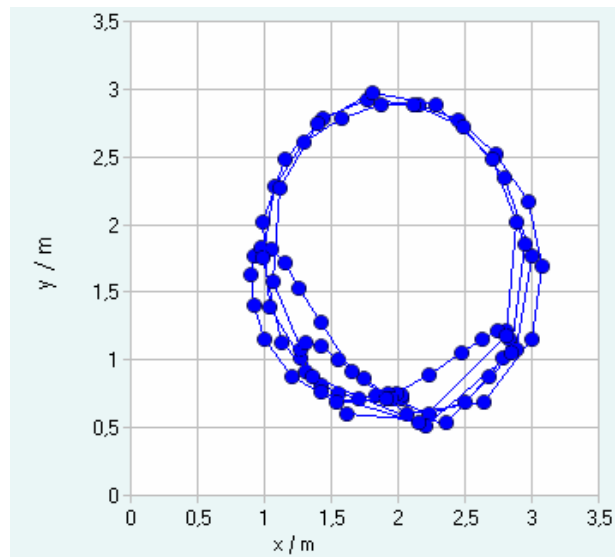
Der Bewegungsablauf beim Schleuderballwurf lässt sich mit der Stroboskopbildfunktion veranschaulichen, wobei wieder ein einfarbiger Hintergrund verwendet wurde (siehe Abb. 16). Auffallend ist die elliptische Abweichung von einer Kreisbewegung, die auch in der Bahnkurve im  $y(x)$ -Diagramm zusätzlich deutlich wird (siehe Abb. 17). Diese entsteht durch die Auf- und Abwärtsbewegung der Schulter.

Zur Diskussion der bei der Drehung wirkenden Kräfte können Vektoren ins Video zuschaltet werden. Durch Einblendung der Beschleunigung wird diese beim Werfen des Schleuderballes sichtbar (siehe Abb. 18).

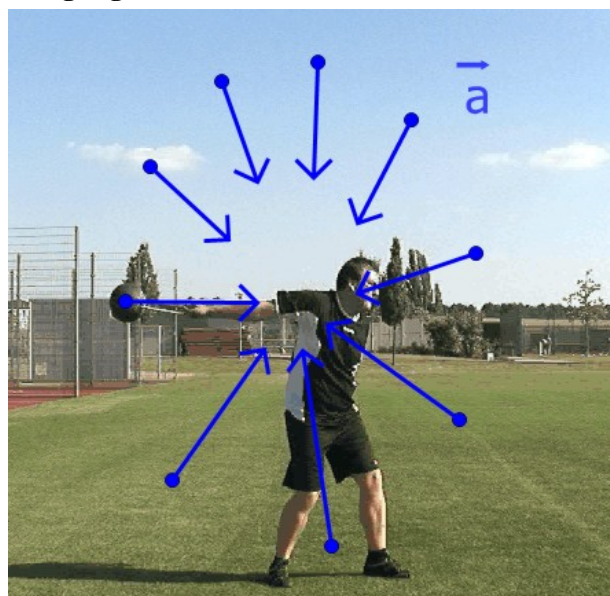
Aus der Messtabelle des Videoanalyseprogramms können quantitative Informationen gewonnen werden. So werden verschiedene Überschlagsrechnungen und Abschätzungen hinsichtlich der Wurfweite des Schleuder-



**Abb. 16: Stroboskopbild zur Visualisierung der Bewegung beim Schleuderball**



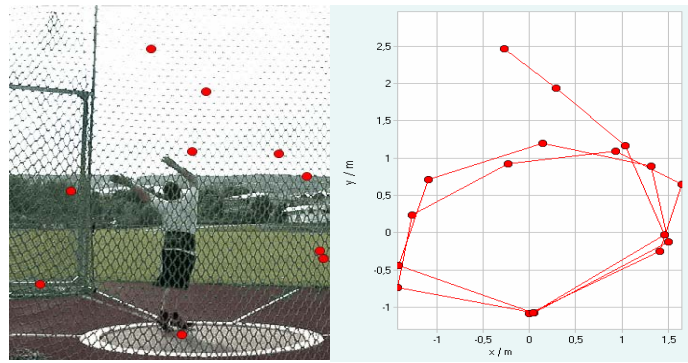
**Abb. 17: Bahnkurve einer Schleuderballbewegung**



**Abb. 18: Darstellung der Zentripetalbeschleunigung**



balls möglich, die allesamt ähnlich denen eines schiefen Wurfes durchgeführt werden können. Thema einer vertiefenden Einheit zu Drehbewegungen bietet der Vergleich der Weltrekorde von Kugelstoß und Hammerwurf. Trotz gleicher Wurfmassen unterscheiden sich beide Rekorde mit 23,12 m (Kugelstoß) und 86,74 m (Hammerwurf) doch beträchtlich. Wie der Schleuderballwurf eignet sich auch der Hammerwurf, um physikalische Modellbildung zu betreiben. Zunächst wird die Bahnkurve eines Hammerwurfes sowohl im Video als auch im Diagramm (siehe Abb. 19) dargestellt. Die Auswertung kann nach ähnlichen Gesichtspunkten wie beim Schleuderball erfolgen, da sich die Sportarten hinsichtlich des Bewegungsablaufes ähneln.



**Abb. 19: Bahnkurven im Video und im Diagramm**

Zunächst wird die Bahnkurve eines Hammerwurfes sowohl im Video als auch im Diagramm (siehe Abb. 19) dargestellt. Die Auswertung kann nach ähnlichen Gesichtspunkten wie beim Schleuderball erfolgen, da sich die Sportarten hinsichtlich des Bewegungsablaufes ähneln.

Der Unterschied zum Schleuderball ist, dass der Hammer aufgrund seiner Masse idealerweise schräg zum Boden beschleunigt werden muss. Der Grund hierfür ist, dass bei anderer Orientierung der Drehbewegung der Sportler nicht mehr in der Lage wäre, den Hammer durch Einsatz seiner Gewichtskraft festzuhalten bzw. festen Bodenkontakt zu behalten. Bei der Berechnung der auftretenden Zentripetalkräfte wird dies schließlich bestätigt. So treten bei Spitzensportlern betragsmäßig Kräfte von bis zu 3000 N auf, was bedeutet, dass der Hammer kurz vor Abwurf am Athleten zieht, als hätte er eine Masse von 300 kg. Erstaunlich ist hier, welche enorme Kraft also letztlich auf den Hammer wirken muss, um ihn auf seine kreisähnliche Bahn zu „zwingen“. Dass die enorme Wurfweite mit dem Hammer nur durch die hinzugeführte Rotationsenergie erreicht wird, sollte den Schülern nach Behandlung von Drehbewegungen klar geworden sein.

## 2. Neue Möglichkeiten mit „measure Dynamics“

### 2.1 Automatische Analyse

Eine deutliche Verbesserung gegenüber den bisherigen Programmen stellt die automatische Analyse dar, die neben der manuellen Analyse möglich ist. Diese automatische Analyse war bei den deutschen Videoanalyseprogrammen für den Physikunterricht bisher nur bei „AVA“ [8], „Viana“ [9] und „Coach 6“ möglich. Die reine Farbanalyse von „Viana“ und „Coach 6“ führt z.T. zu schlechten Ergebnissen und erforderte eine manuelle Nachbearbeitung oder sogar eine komplette manuelle Analyse. Bei „AVA“ wurde zwar das Objekt erkannt, es durfte aber nicht rotieren, was ebenfalls zu Problemen führte. Die automatische Analyse bei „measure Dynamics“ arbeitet mit Farb- und Bewegungsanalyse. Die Software erkennt dabei die geometrische Form und die Größe des zu analysierenden Objektes, auch wenn dieses rotiert. Diese automatische Analyse stellt besonders bei längeren Videos eine erhebliche Zeiterspar-

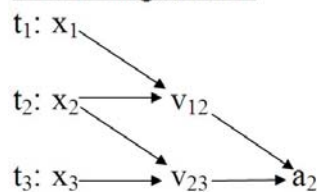
nis dar. Eine große Bildanzahl ist z.B. nötig, um die Maxwell-Verteilung als statistische Verteilung zu zeigen [10].

## 2.2 Berechnungen in Tabellen

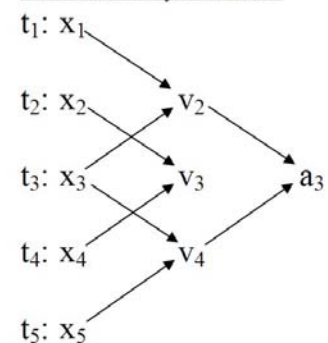
Die bei der Analyse bestimmten Werte werden zunächst wie bei den meisten Programmen in einer Tabelle dargestellt. Aus den Koordinaten, die zunächst in Pixeln bestimmt werden, werden über einen vorher definierten Maßstab die Größen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung mithilfe der bekannten Zeitintervalle jeweils in x- und y-Richtung berechnet. Sinnvollerweise können zusätzlich Tabellenspalten angelegt werden. Darin können wie in einem Tabellenkalkulationsprogramm weitere Werte, wie z.B. der Geschwindigkeitsbetrag oder die kinetische Energie berechnet werden. Darüber hinaus ist es auch sinnvoll, dass die Tabelle leicht in Excel importiert werden kann, um dort weiterführende komplexere Berechnungen, wie z.B. statistische Analysen durchzuführen [10].

Die meisten Videoanalyseprogramme berechnen aus zwei Ortswerten  $x_1$  und  $x_2$  mittels  $v=\Delta x/\Delta t$  die Geschwindigkeit eines Intervalls und ordnen sie (fälschlich) dem zweiten Ortswert, also dem Ende statt der Mitte des Intervalls zu. Dann wird aus zwei Geschwindigkeiten analog die Beschleunigung  $a=\Delta v/\Delta t$  berechnet und diese wieder dem Intervall-Ende zugeordnet, also wieder  $\Delta t/2$  zu spät. Insgesamt ist da-

Viele Programme:



measure Dynamics:



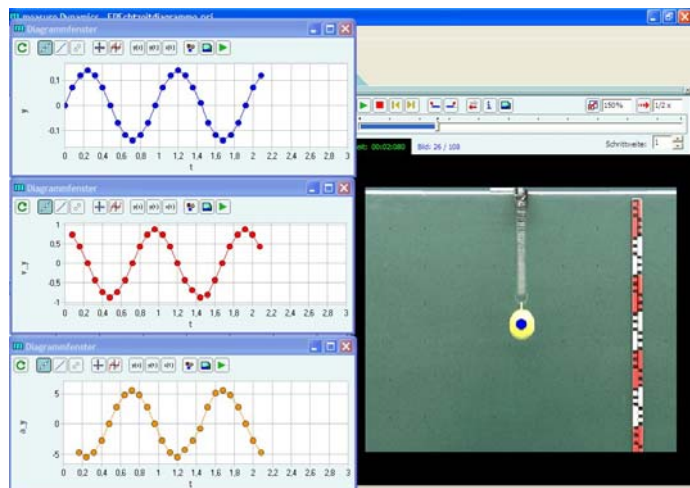
**Abb. 20: Berechnung von Geschwindigkeit und Beschleunigung durch Differenzbildung**

mit die Beschleunigung um  $\Delta t$  versetzt zugeordnet (siehe Abb. 20). Die Videoanalysesoftware DiVA macht dagegen intern einen Fit an die Ortswerte und bildet davon die Ableitungen. Dann sind die Werte zwar schön, aber deren Berechnung nicht mehr nachvollziehbar. „measure Dynamics“ berechnet dagegen die Geschwindigkeit aus einem Ortswert  $x_1$  und dem übernächsten  $x_3$  und ordnet das Ergebnis dem mittleren Ortswert  $x_2$  zu, entsprechend bei der Beschleunigung. So ergibt sich eine nachvollziehbare Berechnung mit korrekter Zeitzuordnung. Allerdings bedeutet das auch eine Mittlung über ein größeres Intervall, was häufig, aber nicht immer wünschenswert ist.

Manchmal ist es auch von Vorteil, dass man in „Coach 6“ und in „measure Dynamics“ nicht nur den Koordinatennullpunkt beliebig wählen kann, sondern auch die Orientierung des Koordinatensystems. Das heißt, man kann das Koordinatensystem drehen. So kann es beispielsweise so gelegt werden, dass eine Bewegung auf einer schiefen Ebene als eindimensionale Bewegung erscheint.

### 2.3 Darstellung von Diagrammen

Von Vorteil ist es, wenn Grafen synchron mit dem ablaufenden Experiment oder Video entstehen und nicht als Ganzes eingeblendet werden. Die Software „measure Dynamics“ bietet diese Möglichkeit der Erstellung von Diagrammen in Echtzeit (siehe Abb. 21). Entscheidend ist, dass die Ortspunkte im Diagramm synchron mit der Bewegung des Pendels im Video entstehen und auch die Diagramme für Geschwindigkeit und Beschleunigung in Echtzeit parallel zum



**Abb. 21: Simultanes Entstehen der Diagramme mit dem Ablauf des Videos**

Video erzeugt werden. So ist es einfacher zu erkennen, welche Phase im Video welchem Graphenteilstück entspricht und somit ist die Kluft zwischen der konkreten visuellen Darstellung des Bewegungsablaufes und seiner abstrakten grafischen Darstellung für den Lernenden leichter zu überbrücken.

### 2.4 Abspielfunktionen

Beim Abspielen eines Videos in „measure Dynamics“ kann mit der Funktion „Schrittweite“ eingestellt werden, dass nur jedes n-te Bild des Videos gezeigt wird. Damit erhält man eine Zeitrasterfunktion; das Video läuft in der n-fachen Geschwindigkeit ab. Dies ist insbesondere bei langsam ablaufenden Vorgängen von Nutzen. In Diagrammen werden trotzdem alle Daten der Analyse eingezeichnet, so dass man so auch schneller das gewünschte Diagramm erhalten kann. Möglich ist auch, bereits für die Analyse langsam ablaufender Vorgänge eine Schrittweite einstellen, so dass nur jedes n-te Bild analysiert wird und damit Analysezeit eingespart wird.

Für die Analyse des Bewegungsvorgangs im Klassengespräch ist es ein großer Vorteil, dass jeder Zeitpunkt schnell angesprungen werden kann, indem man in der Tabelle auf die entsprechende Zeile klickt. Dann wird das entsprechende Bild des Videos angezeigt und alle Diagramme bis zu diesem Zeitpunkt eingezeichnet. Ab da können nun das Video und alle Darstellungen auch schrittweise weiter angezeigt werden, indem man mit der Cursortaste in der Tabelle weiter nach unten läuft oder in der neueren Version den Knopf für schrittweises Weiterschalten nutzt. Damit kann in selbst gewähltem Tempo schrittweise im Bewegungsablauf weiter gegangen werden.

Läuft man mit der Cursortaste in der Tabelle dagegen nach oben, läuft das Video rückwärts ab. Dies ist auch mit der Funktion „Rückwärts“ möglich, bei der Videos vom letzten zum ers-

ten Bild rückwärts ablaufen, was genutzt werden kann, um das Thema Irreversibilität zu erarbeiten [11].

## 2.5 Dynamisch ikonische Repräsentationen

Dynamisch ikonische Repräsentationen sind bildhafte Darstellungen physikalischer Größen, die sich entsprechend der Größe dynamisch verändern [12]. Dazu gehören Säulen und Flächen, deren Flächeninhalt den Betrag einer physikalischen Größe repräsentiert, oder Balken, Pfeile und Linien, deren Länge oder Breite den Betrag einer Größe darstellt und deren Richtung die Richtung der Größe darstellt. Animationen sind ebenso bildhafte Repräsentationen, die sich dynamisch ändern; aber sie müssen nicht unbedingt etwas über physikalische Größen aussagen. Wenn sie sich jedoch physikalischen Größen entsprechend bewegen, kann man sie auch zu den dynamisch ikonischen Repräsentationen rechnen.

Das Programm „measure Dynamics“ erlaubt mit wenig Aufwand die Darstellung dynamisch ikonischer Repräsentation von physikalischen Größen in Form von Säulen oder Vektorpfeilen [13+14]. Abbildung 12 zeigt ein Beispiel zum Fußball, bei dem die Geschwindigkeitspfeile jeweils an das bewegte Objekt geheftet sind. Alternativ könnte man in das Video die Pfeile für die Größen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung ortsfest einfügen, die sich entsprechend der Bewegung ändern. Dies erleichtert den Vergleich der dargestellten Größen untereinander.

Auf diese Weise werden im Video Größen visualisiert, die normalerweise mit dem Auge nicht sichtbar sind, wie z.B. Geschwindigkeit, Impuls, Beschleunigung oder Kraft und ihr vektorieller Charakter wird durch die Darstellung von bewegten Pfeilen betont. Viele Studien haben bereits gezeigt, dass es für ein Verständnis der Mechanik nötig ist, die Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung als gerichtete Größen an zweidimensionalen Bewegungen einzuführen [15]. Dieser zweidimensionale Einstieg in die Mechanik kann durch den Einsatz von Videoanalyse erleichtert und veranschaulicht werden.

## 2.6 Serienbilder und Streifenbilder

Des Weiteren können mit der Software Serienbilder erstellt werden. Dabei werden die verschiedenen Bilder eines Videos bzw. Ausschnitte automatisch nacheinander in eine Tabelle gesetzt und insgesamt als ein einziges Bild ausgegeben (siehe Abb. 22).

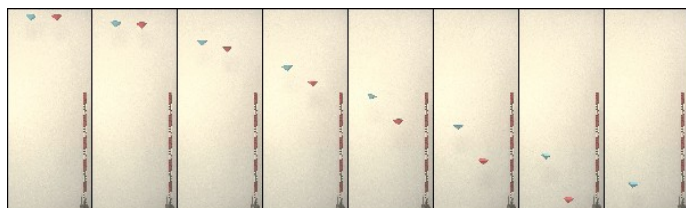
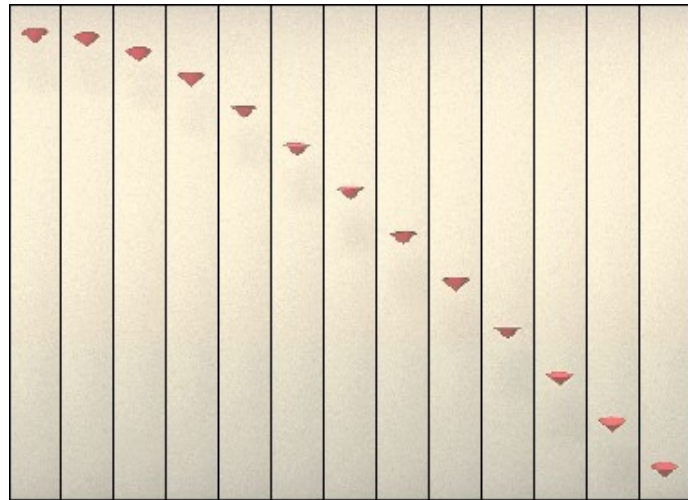


Abb. 22: Serienbild zweier fallender Fallkegel

So kann man leicht Arbeitsblätter für Schüler erstellen, mit denen diese eine Videoanalyse auf dem Papier durchführen. Man braucht dazu nur die Zeitdifferenz zwischen zwei Bildern und eine Referenzlänge. Somit lässt sich das Serienbild nicht nur qualitativ nutzen, sondern auch quantitativ auswerten.

Wählt man beim Serienbild zusätzlich den für die Erstellung verwendeten Bildausschnittes geschickt, nämlich als schmalen Streifen, kann damit auch ein Zeit-Ort-Diagramm erzeugt werden. In der Abbildung 23 ist ein solches Serienbild als „Streifenbild“ zu sehen, das aus einem Video zu Bahrdtschen Fallkegeln erstellt wurde. Macht man ein Serienbild nur von den ortsfesten Pfeilen, z.B. von den Geschwindigkeitspfeilen, erhält man sogar ein t-v-Diagramm (siehe Abb. 24).



**Abb. 23: Serienbild mit sehr schmalen Streifen (Streifenbild) ergibt ein t-y-Diagramm**



**Abb. 24: Ein Streifenbild eines Geschwindigkeitsvektors ergibt ein t-v-Diagramm**

## 2.7 Stroboskopbilder

In zahlreichen Schulbüchern zum Physikunterricht sind Stroboskopbilder zu finden. Sie dienen zur Veranschaulichung von Bewegungsabläufen oder zur Darstellung beschleunigter Bewegungen. Bisher gab es aber keine einfache Möglichkeit für Lehrer, ein Stroboskopbild eines Versuchsablaufs zu erstellen. Aus einem in „measure Dynamics“ geladenen Video kann aber leicht mit wenigen Mausklicks ein Stroboskopbild erstellt werden (siehe Abb. 2) [16].

Zusätzlich können zahlreiche Einstellungen vorgenommen werden. Da das Programm das ganze Objekt vom Hintergrund trennt, ist es z.B. möglich, einen einfarbigen Hintergrund zu wählen (siehe Abb. 5+9+16). Um die Entstehung des Stroboskopbildes aus den einzelnen Frames (=Einzelbilder) des Videos besser erklären zu können, ist es zudem möglich, farbige Blitzlichter zu verwenden (bis zu 64 verschiedene Farben).

Zusätzlich können zahlreiche Einstellungen vorgenommen werden. Da das Programm das ganze Objekt vom Hintergrund trennt, ist es z.B. möglich, einen einfarbigen Hintergrund zu wählen (siehe Abb. 5+9+16). Um die Entstehung des Stroboskopbildes aus den einzelnen Frames (=Einzelbilder) des Videos besser erklären zu können, ist es zudem möglich, farbige Blitzlichter zu verwenden (bis zu 64 verschiedene Farben).

## 2.8 Fitkurven

Zusätzlich zu den gemessenen Kurven können berechnete Kurven zum Vergleich eingeblendet werden (siehe Abb. 7). Solche berechneten Kurven werden immer als Ganzes für alle Zeiten eingeblendet, während die Messkurven mit dem Ablauf des Videos entstehen. Dabei kann man dann vergleichen, inwieweit die gemessene Kurve der erwarteten Kurve entspricht.

Möglich ist auch, in der Funktionsgleichung Variablen und jeweils mögliche Bereiche anzugeben. Mit Hilfe von Schieberegler können dann verschiedene Werte für die Variablen eingestellt werden und so die berechnete Kurve so lange verändert werden, bis sie der Messkurve entspricht (siehe Abb. 8). So kann ein Kurvenfit durchgeführt werden.

## 2.9 Unterschiedlicher methodischer Einsatz

Alle Daten, Darstellungen und Einstellungen, die in der Tabelle oder am Video vorgenommen werden, können in „measure Dynamics“ als so genanntes „Projekt“ gespeichert werden. Diese Dateisammlung kann dann über eine entsprechende Datei mit der Endung „prj“ aufgerufen werden. Dann kann die Software ohne erneute Analyse das Video gleich mit allen voreingestellten Darstellungen präsentieren.

Die Tabellen, Bilder und sogar die bearbeiteten Videos können aber auch exportiert werden und dann unabhängig von der Software verwendet werden. Besonders interessant ist, das Video mit den dynamisch ikonischen Repräsentationen wie z.B. Vektorpfeilen als avi-Datei zu exportieren, so dass es ohne die Originalsoftware verwendet und als Lehrvideo gezeigt werden kann.

Die Videos mit den dynamischen Darstellungen können also mit der Software recht unterschiedlich in Unterricht eingesetzt werden. Ein Video kann im Unterricht mit der Software manuell oder automatisch analysiert werden. Anschließend können die gewünschten Darstellungen („Filter“) selbst erstellt oder einfacher aus einer geladenen Liste zugeschaltet werden. Für weitere Beispielen kann im Unterricht auch einfach ein abgespeichertes Projekt geöffnet werden oder ein exportiertes Video gezeigt werden.

## 3. Fazit

Die Analyse von Sportbewegungen im Physikunterricht liefert zahlreiche Ansatzpunkte, um den Unterrichtsverlauf interessant und motivierend zu gestalten. Die alltagsnahen Thematiken verbunden mit den Realisierungsmöglichkeiten von „measure Dynamics“ bieten somit die Möglichkeit, physikalische Sachverhalte auf eine alternative und anschauliche Weise darzustellen, wobei vor allem die bildhafte Darstellung hilft, die Physik dahinter verständlicher zu machen.

### Literatur

- [1] <http://www.phywe.de/framenav.php?nav1=60&nav2=7&csscol=son&ref=nav>
- [2] Benz, M.; Wilhelm, T.: measure Dynamics – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse – In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin, 2008, ISBN 978-3-86541-317-8
- [3] Benz, Michael: Digitale Videoanalyse von Bewegungen, Staatsexamensarbeit, [www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/Videoanalyse2.htm](http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/Videoanalyse2.htm)
- [4] Mück, T.; Wilhelm, T.: Physik und Sport - Fächerverbindender Unterricht mit moderner Videoanalyse - In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Bochum 2009, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2009
- [5] Mück, T.: Physik und Sport - Fächerverbindender Unterricht mit moderner Videoanalyse, Staatsexamensarbeit, [www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/sport.htm](http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/sport.htm)
- [6] Haberkorn, C.; Plaß, R.; Baumann, H. (Hrsg.) (1992): Leichtathletik Band 2: Sprung, Wurf, Stoß, Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt am Main
- [7] Willimczik, K. (1989): Biomechanik der Sportarten, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek
- [8] Suleder, M.; Heuer, D.: Automatische Videoanalyse –In: Nordmeier, V. (Hrsg.): Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG - Leipzig 2002, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2002, ISBN 3-936427-11-9
- [9] <http://didaktik.physik.uni-essen.de/viana/>

- [10] *Geßner, T.; Benz, M.; Wilhelm, T.*: Einstein, Maxwell und Co. auf der Spur - Auswertung von Modellgasen mittels Videoanalyse – In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule PhyDid 1/8, www.phydid.de, 2009, S. 1 – 10
- [11] *Langsch, S.; Kersting, T.*: Nutzung rückwärts laufender Filme zur Erarbeitung von Irreversibilität - In: Nordmeier, V.; Oberländer, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung Düsseldorf 2004, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2004, ISBN 3-86541-066-9
- [12] *Heuer, D.*: Konzepte für Systemsoftware zum Physikverstehen - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 45, Nr. 4, 1996, S. 2 – 11
- [13] *Michel, C.; Wilhelm, T.*: Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen – In: Nordmeier, V.; Grötzebauch (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin, 2008, ISBN 978-3-86541-317-8
- [14] *Michel, C.*: Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen im Physikunterricht, Staatsexamensarbeit, www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/Videoanalyse1.htm
- [15] *Wilhelm, T.*: Mechanik - Zweidimensional und multimedial – In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin, 2008, ISBN 978-3-86541-317-8
- [16] *Suleder, M.*: Stroboskopbilder – lehrreich und leicht gemacht – In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 62, Nr. 5, 2009, S. 285 – 287

#### **Anschrift der Verfasser:**

*Tobias Mück*, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Tobias.Mueck@gmx.net

AR Dr. *Thomas Wilhelm*, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de, www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm

#### **Kurzfassung**

Mithilfe des neuartigen Videoanalyseprogramms „measure Dynamics“ werden Möglichkeiten für fächerverbindenden Unterricht zwischen Physik und Sport aufgezeigt. Die Beispiele umfassen den Stabhochsprung, den Weitsprung, Fußball sowie Drehwurfbewegungen. Die auf Kontrast und Bewegung basierende automatische Analyse der Software trägt dabei zu einer leichteren Umsetzung im Unterricht bei. Durch verschiedene neuartige Darstellungsmöglichkeiten wie Einblenden von Vektoren, Serienbilder oder Stroboskopbilder werden manche Betrachtungen erst möglich. Mithilfe berechneter Fitfunktionen kann die real gemessene Bewegung außerdem mit dem zugrunde gelegten physikalischen Modell verglichen werden.