

DR. MARTIN HILLEBRECHT

Biomechanik im Sporttheorieunterricht

- Geschwindigkeit und Beschleunigung -

1. EINLEITUNG

Nachdem im ersten Teil dieser Reihe die Dynamik Gegenstand der Betrachtungen war (Heft 5/96), soll in diesem Beitrag die Kinematik bearbeitet werden. Hier sind insbesondere die Begriffe Geschwindigkeit und Beschleunigung von zentraler Bedeutung. Diese Begriffe und die daraus abzuleitenden Folgerungen für sportliche Bewegungen sollen wieder durch ein experimentelles Vorgehen erarbeitet werden. Natürlich sind in den meisten Schulen nicht die apparativen Voraussetzungen gegeben, um eigene Untersuchungen mit der notwendigen Genauigkeit anzustellen. Aber wie schon bei der Behandlung des Themas "Kraft und Kraftmessung" kann durch den Einsatz einer Videokamera zumindest eine für schulische Ansprüche ausreichende Genauigkeit erreicht werden. So kann man z.B. mit Videorecordern, die über ein Jog-Shuttle verfügen, zeitliche Auflösungen von zwei Hundertstel Sekunden erfassen.

2. KINEMATIK

In den Bereich der Kinematik gehören z.B. Begriffe wie Geschwindigkeit und Beschleunigung. Was wir darunter zu verstehen haben, werden wir später noch genauer betrachten. Bevor wir mit der experimentellen Erarbeitung dieser Begriffe beginnen, müssen wir uns zunächst mit einigen theoretisch zu erarbeitenden Begriffen beschäftigen. So sind Überlegungen zum Bezugssystem, in dem gemessen wird und zu verschiedenen Bewegungsarten notwendig.

2.1 BEZUGSSYSTEM

Stellen wir uns vor, daß wir in einem Eisenbahnwaggon sitzen und die Fenster zugehängt sind. In dieser Situation wird es uns schwerfallen, die

Geschwindigkeit, mit der sich der Zug bewegt, einzuschätzen. Es fehlen die Bezugspunkte, mit deren Hilfe man aus Erfahrungswerten abgeleitet eine Geschwindigkeitsschätzung vornehmen könnte.

Eine ähnliche Situation finden wir, wenn wir uns im Zug gehend bewegen. Man selbst scheint sich innerhalb des Zuges nur langsam zu bewegen. Ein außenstehender Beobachter würde die Bewegung aber als sehr schnell empfinden, da er den schnellen Zug betrachten würde. Zum Bezugssystem „Fahrender Zug“ bewegen wir uns vielleicht mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s, der Zug selbst fährt aber zum Bezugssystem „Bahndamm“ erheblich schneller.

Schon aus diesen kleinen Beispielen ergibt sich, daß bei kinematischen Messungen immer das Bezugssystem deutlich genannt werden muß. In der Biomechanik werden daher Bezugspunkte bzw. Bezugsachsen als Koordinatensystem bezeichnet. Die X-Achse wird in der Hauptbewegungsrichtung und parallel zum Erdboden angeordnet. Die Y-Achse zeigt meist in Richtung der Erdanziehung, d.h. senkrecht zur Erdoberfläche und die Z-Achse verläuft meist quer zur Hauptbewegungsrichtung und parallel zum Erdboden. Der Anfangspunkt des Koordinatensystems läßt sich beliebig festlegen, bei den meisten Bewegungen bietet sich aber meist ein Ausgangspunkt an: So würde man z.B. beim Weitsprung den Absprungbalken und beim Skispringen den Schanzentisch als Nullpunkt des Koordinatensystems wählen.

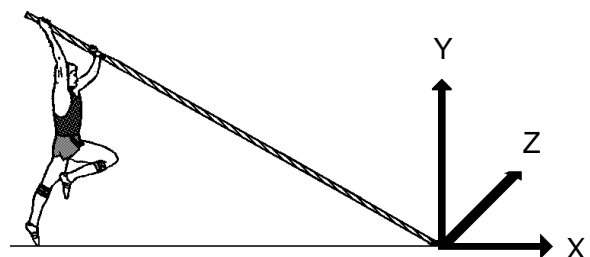


Abb. 1 Stabhochspringer in Koordinatensystem

2.2 BEWEGUNGSARTEN

Bei den Bewegungsarten werden prinzipiell zwei unterschieden:

- Translation,
- Rotation.

Sie kommen im Sport selten in ihrer reinen Form vor, sondern sind meist als Kombinationen zu finden.

2.2.1 TRANSLATION

Unter Translation oder linearer Bewegung versteht man Bewegungen, bei denen die einzelnen Körperpunkte nur parallel verschoben werden. Alle Körperpunkte legen die gleiche Distanz, in der gleichen Richtung und in der gleichen Zeit zurück.

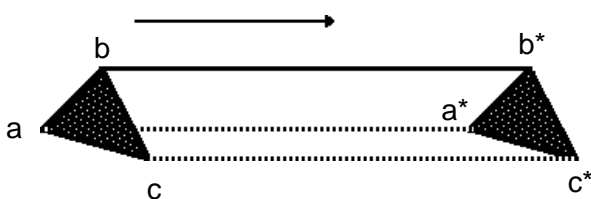


Abb. 2 Gradlinige Translation

Translationen erkennt man am einfachsten, wenn man eine Gerade zwischen zwei Gelenkpunkten anlegt und diese dann durch die Bewegungsphasen verfolgt. Bleibt die Gerade immer nur parallel verschoben, so liegt eine Translation vor. In der eben gesehenen Abbildung wurde die lineare Translation dargestellt. Wir können aber auch eine kurvenlineare Translation finden. Hier wird der Körper auf einer Kreisbahn parallel verschoben. Eine konstruierte Gerade bleibt aber auch hier immer parallel verschoben.

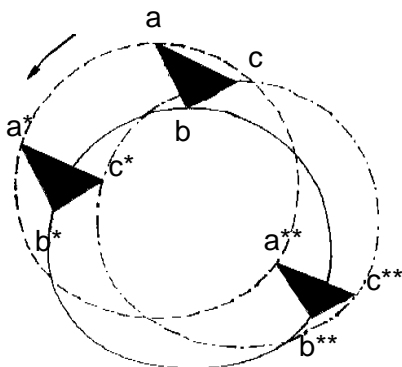


Abb. 3 Kurvenlineare Translation

2.2.2 ROTATION

Unter der Rotation versteht man eine Drehbewegung um eine Drehachse. Alle Körperpunkte beschreiben konzentrische Kreise um diese Drehachse. Die Drehachse selbst bleibt gegenüber dem Bezugssystem unverändert.

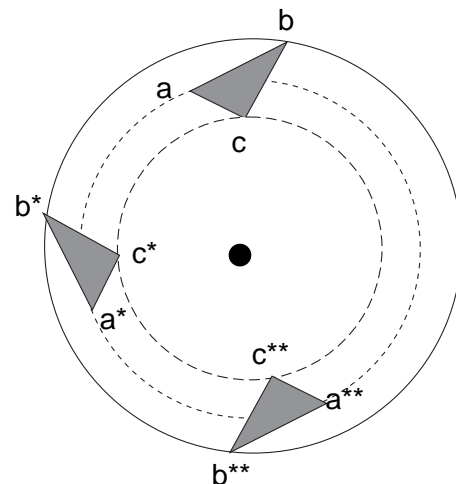


Abb. 4 Rotation

Auch die reine Form der Rotation finden wir im Sport sehr selten. Ein Beispiel kann aber die Riesenfelge am Reck sein. Hier dreht sich der Körper um eine externe, also außerhalb des Körpers gelegene, Drehachse, die durch die Reckstange dargestellt wird.

In der Sportpraxis finden wir meistens eine Kombination der beiden Bewegungsarten. Man denke hier nur an die Bewegungen eines Radfahrers, der seine Translationsbewegung durch eine Rotation der Beine und Füße erreicht. Oder an den Turmspringer, der bei einem Saltosprung auch eine Kombination von Rotation und Translation zeigt.

Doch betrachten wir in diesem Zusammenhang noch einmal die Bewegungen des Radfahrers. Durch welche Rotationen ergibt sich die Translation des Fahrrades?

Da wäre zunächst die Rotation der Oberschenkel um die Hüftachse. Durch diese Rotationsbewegung wird eine Auf- und Abwärtsbewegung des Oberschenkels möglich. Der Unterschenkel rotiert um die Kniegelenksachse und zeigt dadurch eine Vorwärts-, Rückwärtsbewegung. Ähnlich wie der Oberschenkel verhält sich der Fuß. Er rotiert um die Fußgelenksachse und wird dadurch auf und abwärts bewegt.

Die Kombination aller drei Rotationen ermöglicht

die Rotation der Pedale und damit letztendlich den Vortrieb und damit die Translation des Fahrrads. Aus dieser sehr verkürzten Betrachtung wird schon deutlich, daß die meisten Translationen des menschlichen Körpers erst durch Rotationen von Teilsegmenten möglich werden. Dadurch wird die Beschreibung dieser Bewegungen natürlich sehr erschwert.

2.3 GESCHWINDIGKEIT

Der Begriff der Geschwindigkeit ist uns vor allem durch das Fahrrad- bzw. Autofahren bekannt. Physikalisch gesehen ist die Geschwindigkeit als Quotient zwischen Wegstrecke s und der Zeit t definiert:

$$v = s/t \text{ [m/s]}$$

Die Geschwindigkeit wird in der Biomechanik in der Einheit „Meter pro Sekunde“ angegeben. Will man eine Geschwindigkeit bestimmen, benötigt man den zurückgelegten Weg und die dafür benötigte Zeit:

$$v_m = (s_2 - s_1) / (t_2 - t_1) = \Delta s / \Delta t$$

In die Betrachtung fließen die Differenzen zwischen zwei Weg- und Zeitwerten ein. Strebt die Zeitdifferenz gegen Null, erhält man die momentane Geschwindigkeit eines Objektes:

$$v = \lim \Delta s / \Delta t = \delta s / \delta t$$

Mathematisch gesehen spricht man in diesem Fall vom Differenzieren. Die Geschwindigkeit ist daher als Differentialquotient des Weges nach der Zeit zu bezeichnen.

Bei der Betrachtung von Geschwindigkeitswerten muß man einige Randbedingungen beachten. Nehmen wir einmal folgendes Fallbeispiel: Der 100m-Weltrekord von Donovan Bailey steht seit 1996 auf 9,84 s. Das entspricht einer mittleren Geschwindigkeit von 10,16 m/s. Ein Läufer, der 10,0 s läuft, erreicht eine mittlere Geschwindigkeit von 10,0 m/s. Diese Geschwindigkeitswerte ergeben in der Betrachtung allerdings noch keinen großen Erkenntnisgewinn, da sie nur aussagen, daß der eine Sprinter im Durchschnitt schneller gelaufen ist als der andere. Das wußten wir aber auch schon vorher. Interessant wäre dagegen eine Auswertung der Laufgeschwindigkeiten in 10 Meterabständen. Daraus könnten wir

dann wahrscheinlich erkennen, daß die Geschwindigkeitsentwicklung beider Sprinter äußerst unterschiedlich verlaufen ist.

Wir dürfen also nie aus dem Blick verlieren, daß es sich hier um mittlere Geschwindigkeiten handelt, deren Auswertung bei kleineren Zeit- bzw. Wegabschnitten durchaus andere Ergebnisse liefern kann.

In der Biomechanik versucht man daher, diese Abschnitte, soweit es die Meßfehler zulassen, möglichst kurz zu wählen. Bei Sprintrennen werden deshalb meist 10 m Abschnitte betrachtet, um Aussagen über Geschwindigkeiten treffen zu können.

Experiment: Bestimmung von mittleren Geschwindigkeiten beim Sprint mit einer Videokamera

Benötigte Gerätschaften: 1 Videokamera auf Stativ, vier Fahnenstangen, einen Startblock, eine Startklappe

Durchführung: Zunächst wird eine 40 m-Strecke markiert. Bei 20 m wird in einiger Entfernung die Videokamera aufgestellt. Von diesem Standort aus kann man einen kompletten Lauf über 40 m aufnehmen. Bei 10, 20, 30 und 40 m wird jeweils eine Fahnenstange aufgestellt. Dabei muß allerdings die perspektivische Verzerrung durch das Schwenken der Videokamera ausgeglichen werden. Die Fahnenstangen werden daher nicht direkt auf den jeweiligen Marken aufgestellt, sondern dort, wo sie in der Verlängerung der Perspektive der Kamera die Markierungslinie schneiden. Am besten stellt man dazu einen Läufer auf die Markierungslinie, peilt ihn mit der Kamera an und stellt dann die Fahne auf die Stelle, die der Peilung seiner Brust entspricht.

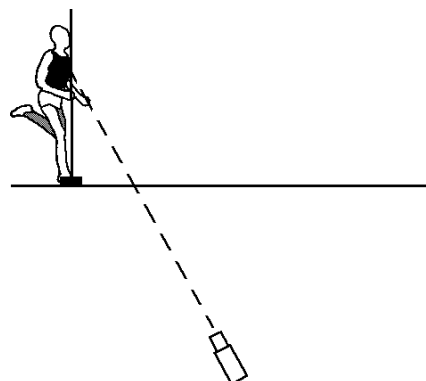


Abb. 5 Aufbau der Videokamera und Fahnenstangen

2. Kinematik

Nun laufen mindestens 3 Läufer die 40 m Strecke mit einem Start aus dem Startblock mit maximaler Intensität. Alle Läufer werden mit der Videokamera gefilmt. Wichtig ist dabei noch, daß der Starter und die Startklappe mit zu sehen sind, um später den Startzeitpunkt genau ermitteln zu können.

Auswertung: Die Auswertung erfolgt am Videomonitor. In Einzelbildschaltung wird der Startzeitpunkt des ersten Läufers ermittelt. Ab dem Moment, wo die Startklappe geschlossen ist, zählt man die Anzahl der Einzelbilder, bis der Läufer mit der Brust die erste Fahnenstange erreicht. Die Zahl der Einzelbilder wird notiert und anschließend die Zahl der Einzelbilder von Fahnenstange 1 zu Fahnenstange 2 ermittelt. Dieses Verfahren führt man weiter durch, bis der Läufer die letzte Fahne erreicht hat. Hat man alle Läufer in dieser Form ausgewertet, muß man nur noch die Zahl der Einzelbilder mit 0,02s multiplizieren und erhält damit die im jeweiligen Abschnitt gelaufene Zeit. Setzt man einen Camcorder ein, muß man die Zahl der Einzelbilder mit 0,04s multiplizieren, da Camcorder meist keine Halbbildschaltung von Einzelbildern ermöglichen.

Am Ende der Auswertung erhält man eine Tabelle, die wie die im folgenden abgebildete aussieht:

Name	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40 m
A	120	72	68	67	327 Bilder
	2,40	1,44	1,36	1,34	6,54 s
B	118	74	71	71	334 Bilder
	2,36	1,48	1,42	1,42	6,68 s
C	112	68	65	65	310 Bilder
	2,24	1,36	1,30	1,30	6,20 s

Aus dieser tabellarischen Darstellung sollen die Schüler dann die jeweiligen Geschwindigkeiten für die einzelnen Abschnitt berechnen. Dazu teilt man immer den 10 m Abschnitt durch die erzielte Laufzeit und erhält so die mittlere Geschwindigkeit für den entsprechenden Abschnitt.

Name	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40 m
A	120	72	68	67	327 Bilder
	2,40	1,44	1,36	1,34	6,54 Sekunden
	4,17	6,94	7,35	7,46	6,12 m/s
B	118	74	71	71	334 Bilder
	2,36	1,48	1,42	1,42	6,68 Sekunden
	4,24	6,76	7,04	7,04	5,99 m/s
C	112	68	65	65	310 Bilder
	2,24	1,36	1,30	1,30	6,20 Sekunden
	4,46	7,35	7,69	7,69	6,45 m/s

Im vorher beschriebenen Experiment haben wir es mit einer geradlinigen Bewegung zu tun. Wollen wir rotatorische Geschwindigkeiten bestimmen, müssen wir diese anders beschreiben. Wir unterscheiden in diesem Fall die Umfangsgeschwindigkeit u und die Winkelgeschwindigkeit ω .

Die Umfangsgeschwindigkeit ist genauso definiert wie die zuvor behandelte Bahngeschwindigkeit v , also als Verhältnis von Weg pro Zeit. Die Winkelgeschwindigkeit dagegen ist definiert als Quotient zwischen Winkeldifferenz und Zeitdifferenz:

$$\omega = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{t_2 - t_1}$$

Sie wird in Grad/Sekunden gemessen. Die bisher getroffenen Aussagen bezüglich der mittleren Geschwindigkeit und der momentanen Geschwindigkeit gelten auch in diesem Fall. In der Biomechanik haben wir es aber meist mit der mittleren Geschwindigkeit zu tun, so daß wir uns hier eine Grenzwertbetrachtung sparen können. Die Einheit Grad/Sekunde entspricht nicht mehr den heutigen SI-Einheiten, weshalb sich in diesem Fall eine Umrechnung in rad anbietet. Ein Vollkreis mit 360 Grad wird in rad durch den Wert 2π gekennzeichnet. 270 Grad entsprechen $3/2\pi$ und 90 Grad sind dementsprechend $\pi/2$. Alle Angaben sind in der Einheit Bogenmaß. Durch eine einfache Berechnung wird auch schnell ersichtlich, daß 1 rad einem Winkel von 57.3 Grad entspricht.

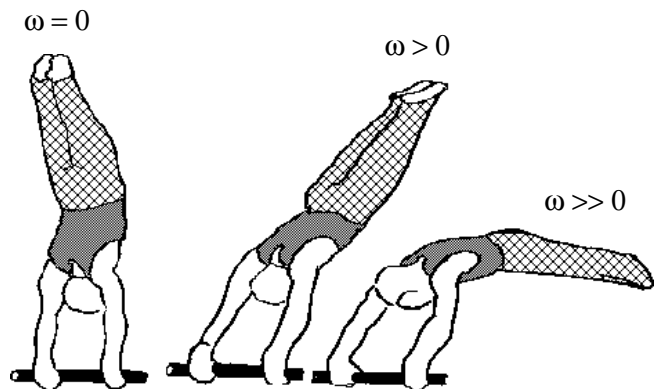


Abb. 6 Winkelgeschwindigkeit beim Reckturnen

Findet man bei einer Bewegung eine konstante Geschwindigkeit, also eine gleiche Wegstrecke in der gleichen Zeiteinheit, so spricht man von einer gleichförmigen Bewegung. Ein Auto, das mit einer konstanten Geschwindigkeit von 100 km/h fährt, bewegt sich gleichförmig.

Wenn es eine gleichförmige Bewegung gibt, so muß es natürlich auch eine ungleichförmige Bewegung geben. Hierunter versteht man eine Bewegungsform, bei der in gleichen Zeiteinheiten verschiedene Wege zurückgelegt werden. Als Beispiel kann wieder unser 100m-Lauf dienen. In der Startphase legen die Läufer einen geringeren Weg in 1 Sekunde zurück als im Bereich um 50 Meter herum. Einen ähnlichen Fall finden wir, wenn ein Auto aus dem Stand beschleunigt. Wir kommen hier in den Bereich der Beschleunigung und der Verzögerung und wollen uns deshalb mit diesen Begriffen näher beschäftigen.

2.4 BESCHLEUNIGUNG UND VERZÖGERUNG

Jeder hat schon einmal im Sport den Begriff Beschleunigung oder Beschleunigungsfähigkeit gebraucht. Sei es im Fußball beim Sprint nach dem Ball oder im Basketball beim Fast-Break. Gemeint ist damit meistens eine Veränderung der Geschwindigkeit und zwar in diesem Fall von einer kleinen Geschwindigkeit zu einer großen Geschwindigkeit. Doch wer von den Schülern könnte auf Anhieb schon eine genaue Definition des Begriffs Beschleunigung geben? Eine genaue, physikalisch richtige Definition wird den meisten schwer fallen.

Die Beschleunigung ist durch eine Geschwindigkeitsänderung in einer bestimmten Zeiteinheit definiert.

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

Sie wird wie sich aus der Formel ergibt in der Einheit Meter pro Sekunden² gemessen. Mathematisch ist die Geschwindigkeit der erste Differentialquotient des Weges nach der Zeit und die Beschleunigung der zweite Differentialquotient des Weges nach der Zeit.

Finden wir bei einer Bewegung eine Geschwindigkeitszunahme, so sprechen wir von einer Beschleunigung, kommt es dagegen zu einer Geschwindigkeitsabnahme, sprechen wir von einer Verzögerung. Der letztere Fall würde

bei einem Auto im Moment des Bremsens zu beobachten sein. Die Verzögerung ist mathematisch gesehen nur eine negative Beschleunigung. Mit den im Experiment ermittelten Geschwindigkeiten können wir jetzt auch für einzelne Abschnitte die Beschleunigungen darstellen. Man bildet die Differenz zwischen den zwei Geschwindigkeiten des zu betrachtenden Abschnittes und teilt die Differenz durch die Teilzeiten für die jeweiligen Abschnitte der Laufstrecke.

Beispiel des Abschnittes 10-20 m für Proband A:

$$v_2 - v_1 = 6,94 - 4,17 = 2,77 \text{ m/s}$$

$$a = 2,77 / 1,44 = 1,92 \text{ m/s}^2$$

Name	0-10	10-20	20-30	30-40	
A	2,40	1,44	1,36	1,34	Sekunden
	4,17	6,94	7,35	7,46	m/s
	1,74	1,92	0,28	0,08	m/s ²
B	2,36	1,48	1,42	1,42	Sekunden
	4,24	6,76	7,04	7,04	m/s
	1,80	1,70	0,20	0	m/s ²
C	2,24	1,36	1,30	1,30	Sekunden
	4,46	7,35	7,69	7,69	m/s
	1,99	2,13	0,26	0	m/s ²

Zur weiteren Auswertung der Ergebnisse sollten die Schüler diese grafisch darstellen. Anhand dieser Grafiken können dann die Ergebnisse besser diskutiert werden. Am obigen Beispiel wird deutlich, daß nach ca. 40 Metern keine weitere Geschwindigkeitssteigerungen mehr erfolgen (vgl. Abb. 12). Ähnliche Ergebnisse wird man bei den Schülern ebenso finden.

Beschleunigungen können natürlich auch im Zusammenhang mit Rotationen auftreten. Man spricht dann von der Winkelbeschleunigung, die durch die Zunahme der Winkelgeschwindigkeit pro Zeiteinheit definiert ist.

$$\alpha = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1}$$

Ihre Einheit ist Rad/s².

Sowohl die Beschleunigung als auch die Verzögerung können wieder gleichmäßig oder ungleichmäßig erfolgen. Bei einer gleichmäßigen Beschleunigung haben wir eine gleiche Geschwindigkeitszunahme pro Zeiteinheit. Entsprechendes gilt für die anderen Fälle.

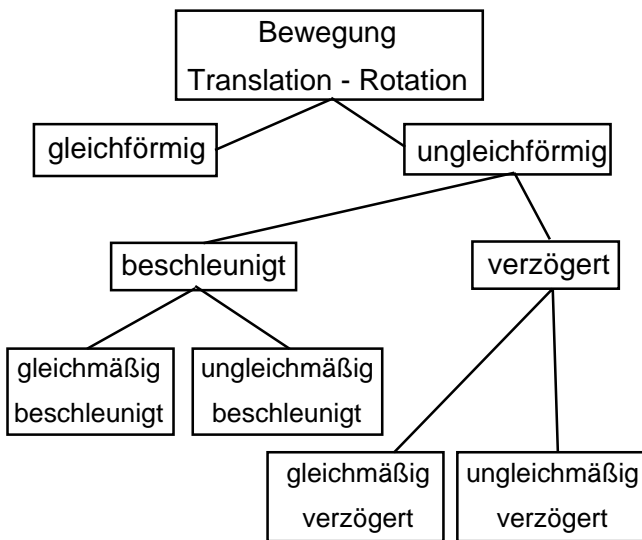


Abb. 7 Strukturierung von Bewegungsformen

2.5 BEWEGUNGSGESETZE

Im folgenden wollen wir drei Sonderfälle bezüglich der Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsentwicklung betrachten. Die Schüler sollten jeweils zuerst aufgefordert werden, den zu erörternden Fall in drei Diagrammen zu beschreiben. Darzustellen sind ein Weg-Zeit-, ein Geschwindigkeits-Zeit- und ein Beschleunigungs-Zeit-Diagramm. Zunächst kommen wir zum einfachsten Fall einer gleichförmigen Bewegung. Die Beschleunigung ist in diesem Fall gleich Null. Zeichnen wir für jeden Parameter ein Diagramm gegen die Zeit, so kommen wir zu folgendem Ergebnis:

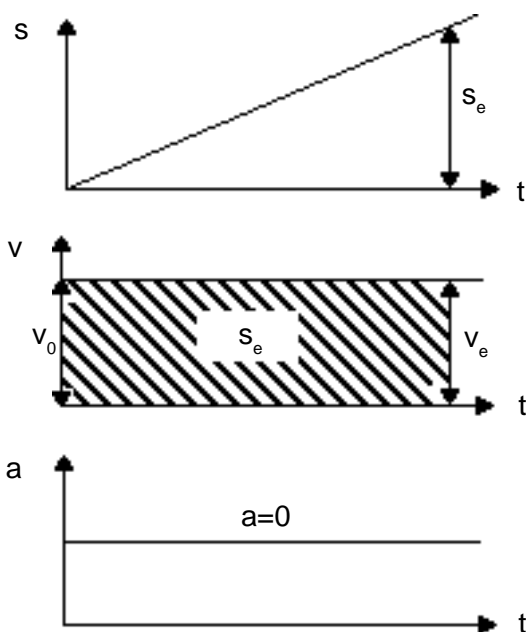


Abb. 8 Gleichförmige Bewegung

Nun wollen wir uns eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ansehen. Wir finden hier einen gleichmäßigen Geschwindigkeitsanstieg und eine immer konstante Beschleunigung. Das Weg-Zeit-Diagramm zeigt einen quadratischen Verlauf. Alle drei Diagramme zeigen also folgendes Bild:

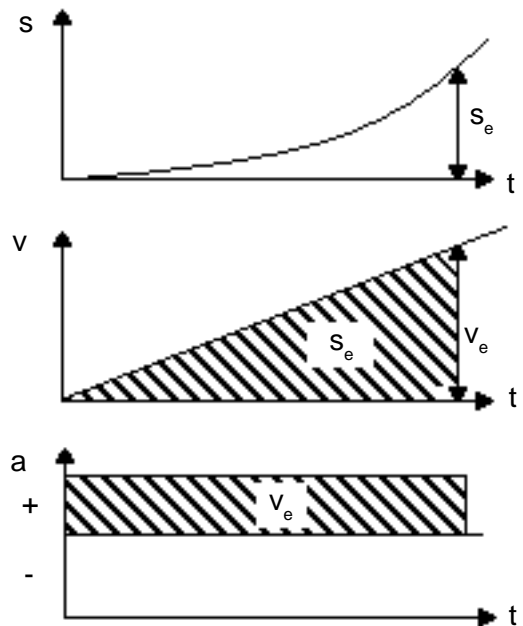


Abb. 9 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Ähnliche Kurvenverläufe finden wir bei gleichmäßig verzögerten Bewegungen. Der Geschwindigkeits-Zeitverlauf zeigt allerdings eine negative Steigung, was gleichzeitig bedeutet, daß das Beschleunigungs-Zeitdiagramm im negativen Bereich verlaufen muß:

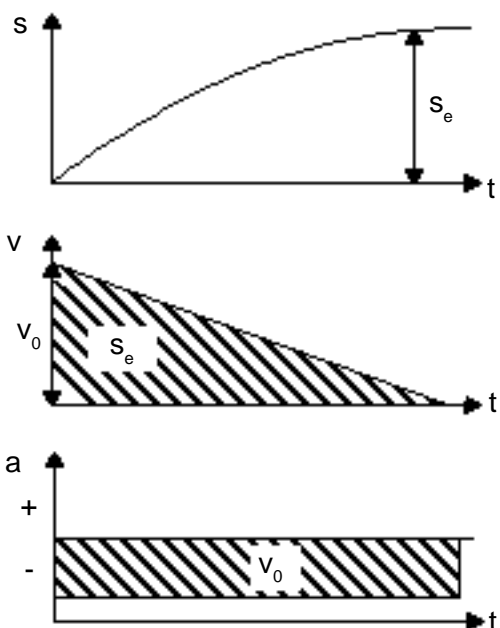


Abb. 10 Gleichmäßig verzögerte Bewegung

Kurvenverläufe in der eben skizzierten Form finden wir im Bereich des Sports nur sehr selten. Funktionale Zusammenhänge lassen sich bei sportlichen Bewegungen bezüglich der Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Zeit- und Beschleunigungs-Zeitparameter nur schwer identifizieren. Aus diesem Grund finden wir im Sport meist keine lückenlosen mathematischen Betrachtungen, sondern nur die Auswertung einiger besonderer Punkte eines Kurvenverlaufs.

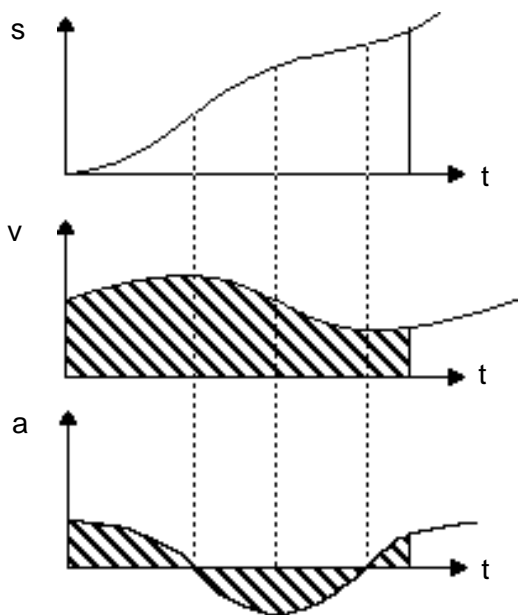


Abb. 11 Reale sportliche Bewegung mit positiver und negativer Beschleunigung

LITERATUR:

BALLREICH, R./KUHLOW, A. (Hrsg.): Biomechanik der Leichtathletik. Stuttgart 1986.

BAUMANN, W.: Mechanische und biologische Grundlagen. In: WILLIMCZIK, K.: Biomechanik der Sportarten, Reinbek 1989, 57-100.

HILLEBRECHT, M.: Biomechanik im Sporttheorieunterricht. In: Betrifft Sport 5/96, 20-34.

HOCHMUTH, G.: Biomechanik sportlicher Bewegungen. Berlin 1982.

WILLIMCZIK, K.: Biomechanik der Sportarten. Reinbek 1989.

Geschwindigkeitsverlauf

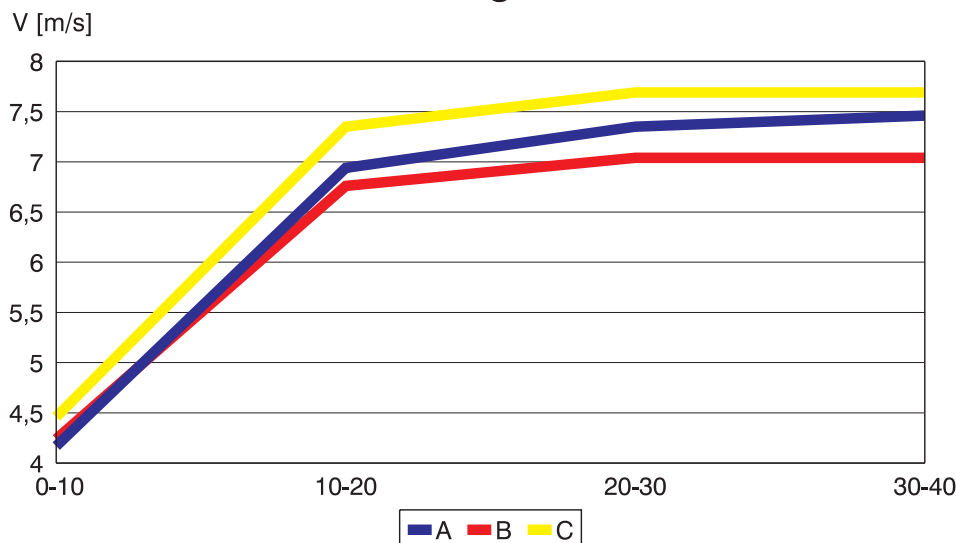
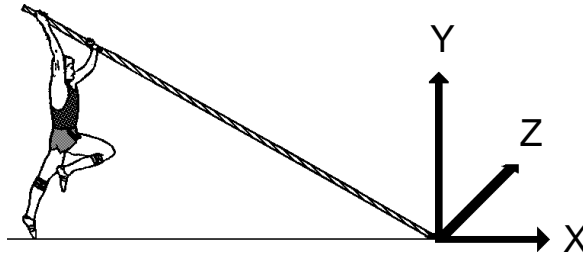
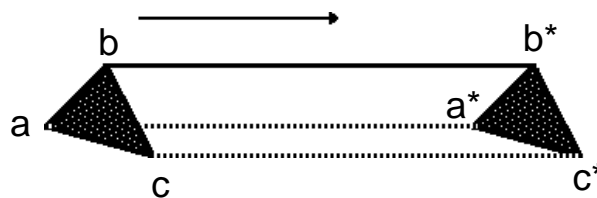


Abb. 12 Beispiel einer grafischen Auswertung der Geschwindigkeitsverläufe von Schüler A, B und C

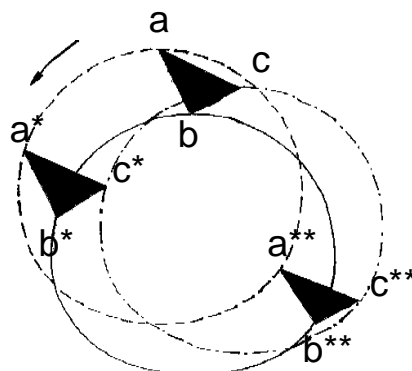
Koordinatensystem bei Bewegungsanalyse



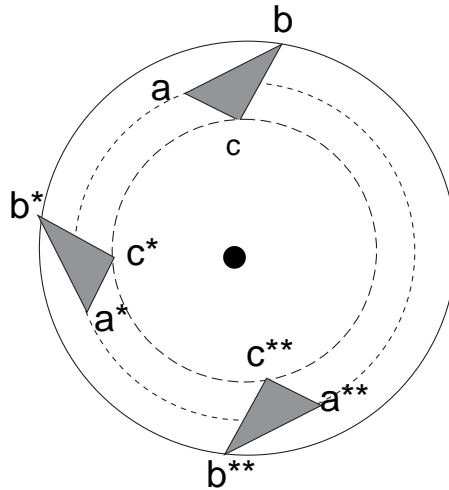
Translation



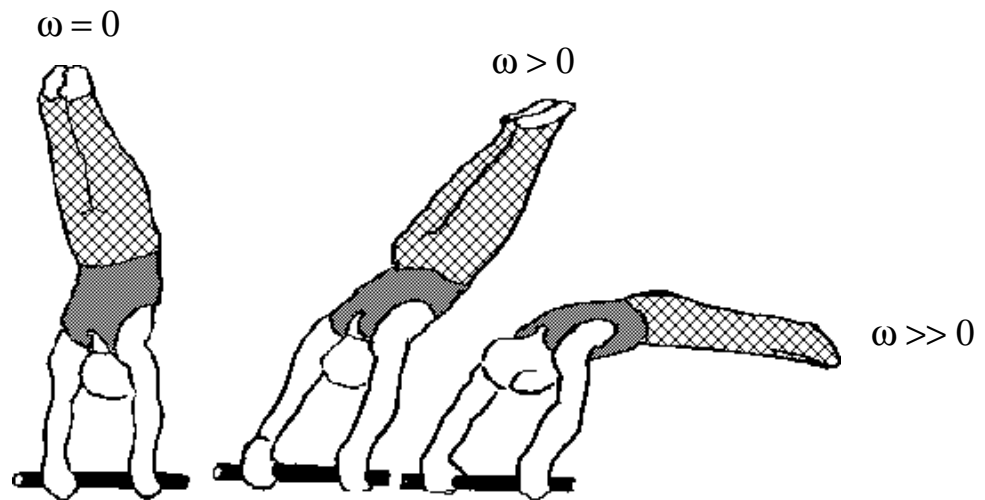
Kurvenlineare Translation



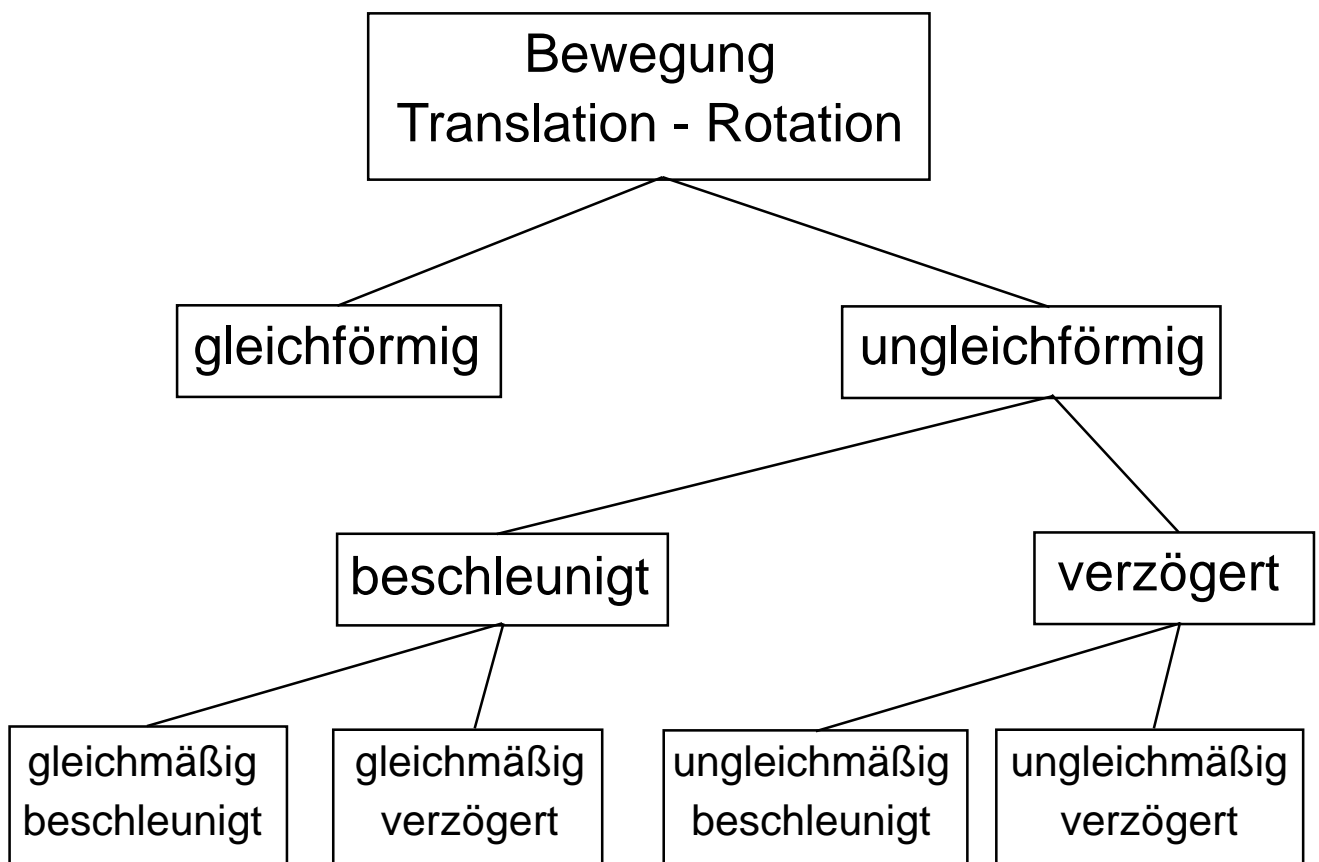
Rotation



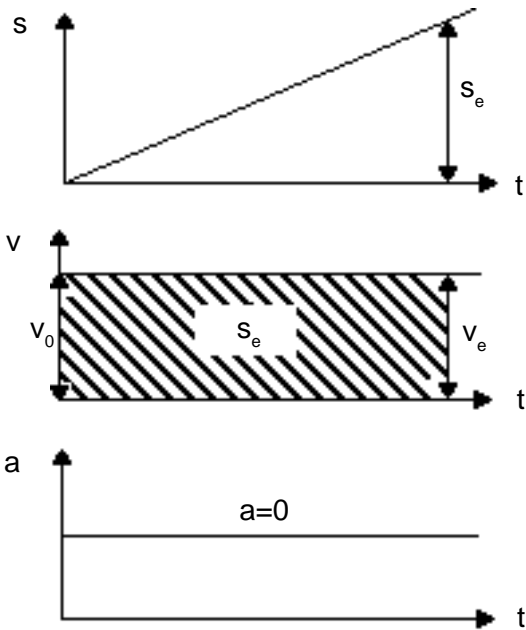
Winkelgeschwindigkeit



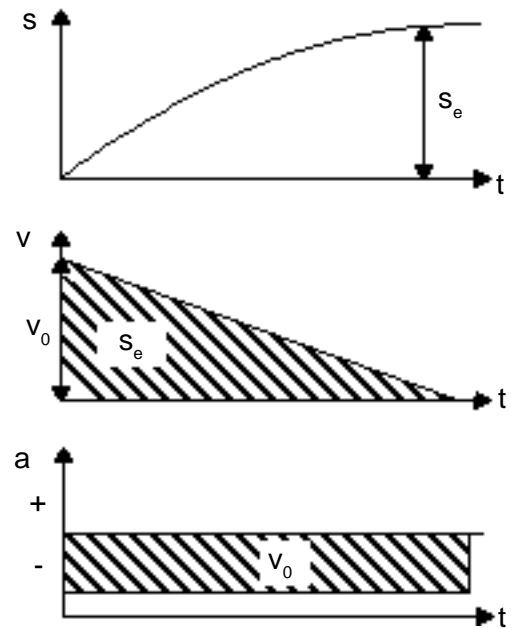
Charakteristika von Bewegung



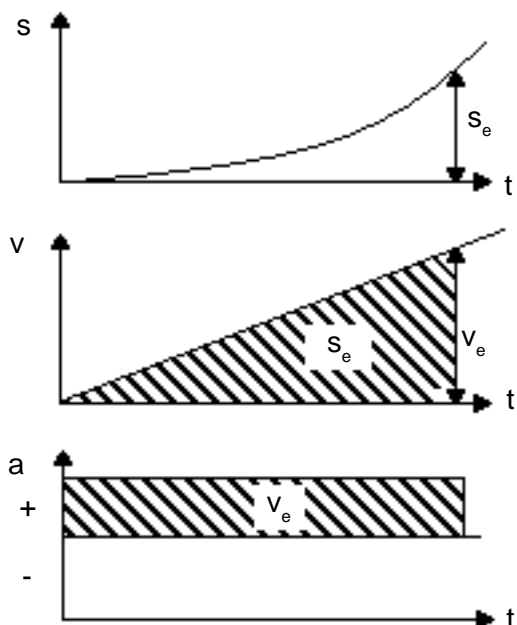
Gleichförmige Bewegung
 $a=0$



Gleichmäßig verzögerte Bewegung
 $a=\text{const} (-)$



Gleichmäßig beschleunigte Bewegung
 $a=\text{const} (+)$



Reale sportliche Bewegung
 $a=\text{veränderlich}$

