

Justus-Liebig-Universität Gießen
Fachbereich Mathematik und Informatik, Physik, Geografie
I. Physikalisches Institut
Institut für Didaktik der Physik

Judo als physikalischer Kontext im Schülerlabor PiA: Fachliche und didaktische Überlegungen

Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für das
Lehramt an Gymnasien im Fach Physik

Verfasser: Jan Hofmann
Blumenstraße 6
35463 Fernwald

Gutachter: Prof. Dr. Peter J. Klar
Prof. Dr. Claudia von Aufschnaiter

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	X
1 Einleitung.....	1
2 Physikalische und biomechanische Grundlagen	4
2.1 Bewegungen.....	4
2.1.1 Translationsbewegung	4
2.1.2 Rotationsbewegung	5
2.2 Kräfte.....	5
2.2.1 Die Newtonschen Axiome	5
2.2.2 Bezeichnung spezieller Kräfte	6
2.2.3 Druck	7
2.3 Drehmoment und Trägheitsmoment.....	7
2.4 Energie.....	11
2.5 Impuls.....	13
2.6 Der Schwerpunkt.....	14
2.6.1 Lage des Schwerpunktes	15
2.6.2 Schwerpunkt und Bewegungsbeschreibung	17
2.6.3 Der Schwerpunkt des menschlichen Körpers	18
2.7 Gleichgewicht und Stabilität	26
2.7.1 Gleichgewicht	26
2.7.2 Stabilität	28
2.7.3 Gleichgewicht beim Menschen	31

3	Material und Methoden	36
3.1	Digitalkameras und Aufnahmen	36
3.2	Dynamische Mathematiksoftware.....	37
3.3	Videoanalyseprogramm	42
3.4	Kraftmessung	44
3.5	Wurfpuppe	48
4	Untersuchungen zu physikalischen Konzepten im Judo	49
4.1	Gleichgewicht	49
4.1.1	Lage des Körperschwerpunktes	49
4.1.2	Stabiler Stand	51
4.1.3	Gleichgewicht bei Würfeln.....	57
4.2	Analyse eines Wurfes	68
4.3	Fallübung.....	78
4.4	Bodentechniken	87
4.4.1	Armhebel	88
4.4.2	Befreiung aus einem Haltegriff	89
5	Konzeptionen für das Schülerlabor PiA	93
5.1	Grundlegende Überlegungen zur Thematik Schwerpunkt und Gleichgewicht im Schülerlabor	96
5.1.1	Schwerpunkt und Gleichgewicht als schulische Themen ...	96
5.1.2	Überlegungen zu Lernschwierigkeiten.....	98
5.1.3	Zielgruppe und Lernziele	100
5.1.4	Lernen an Stationen	102
5.2	Stationen für das Schülerlabor zur Thematik Schwerpunkt und Gleichgewicht.....	103
5.2.1	Einleitender Vortrag.....	106

5.2.2	Experimentelle Schwerpunktbestimmung.....	110
5.2.3	Analytische Schwerpunktbestimmung.....	112
5.2.4	Lage des Schwerpunktes und Massenverteilung	114
5.2.5	Gleichgewicht und Unterstüztungsfläche	116
5.2.6	Stabilität und Standfestigkeit	118
5.2.7	Abschlussrunde	120
5.3	Portfolio.....	121
5.4	Entwürfe für weitere Stationen	122
6	Schlussbetrachtungen	124
7	Zusammenfassung.....	127
8	Literatur	129
	Danksagung	133
	Erklärung	134

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Das Wort Judo in japanischen Schriftzeichen.....	2
Abbildung 2.1:	Ein ruhender Quader. Die Schwerkraft G und die Normalkraft F_N der Unterlage wirken auf den Quader.....	7
Abbildung 2.2:	Eine nicht am Schwerpunkt angeifende Kraft F_1 führt zu einer Translation und einer Rotation um den Schwerpunkt.....	8
Abbildung 2.3:	Darstellung des Hebelgesetzes für einen zweiarmigen Hebel.....	9
Abbildung 2.4:	Illustration zum Steinerschen Satz.....	10
Abbildung 2.5:	Die Relationen des Trägheitsmoments des Menschen bei unterschiedlichen Drehachsen und Körperhaltungen.	11
Abbildung 2.6:	Kraft-Zeit-Kurve für einen typischen Stoß.....	14
Abbildung 2.7:	Ein zweidimensionales System von drei Massenpunkten m_1 , m_2 und m_3 mit Schwerpunkt SP.....	16
Abbildung 2.8:	Bei einer aufrechten Körperhaltung liegt der KSP bei etwa 55% bis 57% der Körperhöhe.....	18
Abbildung 2.9:	Anordnung zur Ermittlung einer Koordinate des KSP.....	19
Abbildung 2.10:	Darstellung der Baslerschen Methode zur Schwerpunktbestimmung.....	20
Abbildung 2.11:	Teilschwerpunkte, Schwerpunktradien und deren Bezugspunkte nach Fischer.....	23
Abbildung 2.12:	Analytische Bestimmung des KSP mit den Werten nach Fischer.....	24
Abbildung 2.13:	Über den Schwerpunktradius b können die aus dem Gewicht des Oberschenkels herrührenden Teilgewichte von Hüft- und Kniegelenk berechnet werden.....	25
Abbildung 2.14:	Darstellung der Gleichgewichtsarten.....	26
Abbildung 2.15:	Ermittlung des Schwerpunktes durch mehrere Aufhängungen.....	27

Abbildung 2.16: Ein starrer Körper während des Kippens.....	28
Abbildung 2.17: Die drei Maße für Standfestigkeit.....	30
Abbildung 2.18: Die Unterstützungsfläche variiert in Form und Größe je nach Körperhaltung und eventuell eingesetzten Hilfsmitteln.....	32
Abbildung 2.19: Das Zustandekommen von Schwingungsbewegungen während des Stehens.....	33
Abbildung 2.20: Ausgleichsbewegungen auf dem Schwebebalken.....	35
Abbildung 3.1: Eine geöffnete Geogebra-Datei mit eingeblendetem Algebrafenster und Tabellenblatt.....	38
Abbildung 3.2: Abmessungen des menschlichen Körpers in Relation zur Körpergröße	41
Abbildung 3.3: Das Videoanalyseprogramm Vidantoo	43
Abbildung 3.4: Die als Markierungspunkte eingesetzten Pappscheiben...	44
Abbildung 3.5: Ein geöffnetes Labview-Programm mit Bedienoberfläche und Blockdiagramm	45
Abbildung 3.6: Der NXT-Stein von Lego	46
Abbildung 3.7: Eine Kraftmessplatte mit Adapter für den NXT-Stein.....	47
Abbildung 3.8: Die verwendete Wurf puppe mit einem Judoanzug.....	48
Abbildung 4.1: Experimentelle, eindimensionale Lagebestimmung des KSP.....	50
Abbildung 4.2: Bestimmung der Lage des KSP und der Kippwinkel für die Grundstellung und die Verteidigungsstellung jeweils in einer frontalen und einer seitlichen Ansicht	52
Abbildung 4.3: Ein Heben der Arme hat auf die Höhe des KSP kaum einen Einfluss	54
Abbildung 4.4: Durch eine Schrittstellung ergibt sich ein größerer Kippwinkel nach vorne.....	54
Abbildung 4.5: Die Schrittstellung ermöglicht ein höheres Maß an Stabilität	56
Abbildung 4.6: Eine Wurftechnik nach vorne wird durch Einnehmen der Verteidigungsstellung geblockt.....	57

Abbildung 4.7:	Der Ablauf eines vorwärtigen Fegens.....	59
Abbildung 4.8:	Der Ablauf eines Schulterwurfs	59
Abbildung 4.9:	Bei dem Ansatz eines Schulterwurfes kommt Uke aus dem Gleichgewicht	60
Abbildung 4.10:	Kräfte auf der hinteren und vorderen Kraftmessplatte bei dem Schulterwurf.....	60
Abbildung 4.11:	Der Ablauf einer großen Außensichel.....	62
Abbildung 4.12:	Bei dem Ansatz einer großen Außensichel bewegt sich der KSP Ukes aus einer zentralen Lage über einen Fuß	62
Abbildung 4.13:	Kräfte auf der linken und rechten Kraftmessplatte bei der großen Außensichel.....	63
Abbildung 4.14:	Der Ablauf eines Innenschenkelwurfs in seitlicher und frontaler Ansicht	64
Abbildung 4.15:	Der gemeinsame Schwerpunkt von Tori und Uke liegt beim Innenschenkelwurf sowohl neben als auch hinter der Unterstützungsfläche	65
Abbildung 4.16:	Aufgrund der Impulserhaltung gelingt es Tori wieder in ein stabiles Gleichgewicht zurückzukehren.....	66
Abbildung 4.17:	Der Ablauf einer Variante des Überkopfwurfes	66
Abbildung 4.18:	Der KSP Ukes befindet sich vor der Unterstützungsfläche der Füße	67
Abbildung 4.19:	Der Ablauf eines Schulterrades.....	67
Abbildung 4.20:	Ein korrekter Ansatz des Schulterrades mit dem Nacken auf der Höhe des KSP und ein falscher, zu hoher Ansatz ..	68
Abbildung 4.21:	Der Ablauf des analysierten beidhändigen Schulterwurfes	69
Abbildung 4.22:	Die Markierung am Gürtel ist bei einer gestreckten Körperhaltung näherungsweise identisch mit der Lage des KSP	69
Abbildung 4.23:	Das x-y-Diagramm zum beidhändigen Schulterwurf	70

Abbildung 4.24: Der Mittelpunkt der Kreisbahn der Knöchelmarkierung und die Lage von Ukes KSP zu zwei Zeitpunkten während der ersten Phase des Niederwurfs.....	71
Abbildung 4.25: Während des Wurfes entstehen durch Ukes Gewicht und Toris Zug zwei Drehmomente.....	71
Abbildung 4.26: Das Zeit-Weg-Diagramm der x-Richtung für beide Markierungspunkte.....	72
Abbildung 4.27: Während des Wurfansatzes verliert Uke sein Gleichgewicht.....	73
Abbildung 4.28: Die Geschwindigkeiten der beiden Markierungen in x-Richtung	74
Abbildung 4.29: Die Geschwindigkeiten der beiden Markierungen in y-Richtung	75
Abbildung 4.30: Die Beschleunigung in y-Richtung für den Markierungspunkt am Gürtel.....	75
Abbildung 4.31: Über eine Feder verbundene Massenpunkte während eines Aufpralls.....	76
Abbildung 4.32: Das Fallen während eines Wurfes	78
Abbildung 4.33: Eine Fallübung rückwärts.....	80
Abbildung 4.34: Der Ablauf einer Messung im dritten Durchgang.....	82
Abbildung 4.35: Eine Messung aus der ersten Messreihe	82
Abbildung 4.36: Gemessene Maximalkräfte am Oberkörper beim Aufprall	84
Abbildung 4.37: Grafische Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Kräfte auf den Oberkörper für die drei Messreihen	85
Abbildung 4.38: Die Effekte des Abschlagens sind durch die Impulserhaltung zu erklären.....	87
Abbildung 4.39: Ein Armhebel mit der Seite	88
Abbildung 4.40: Schematische Darstellung eines Streckhebels.....	89
Abbildung 4.41: Die Befreiung aus einem, auf den Knien gehaltenen seitlichen Vierpunkthaltegriff	89

Abbildung 4.42: Die Befreiung aus einem seitlichen Vierpunkthaltegriff mit gestreckten Beinen	90
Abbildung 4.43: Die Fälle für die Befreiung aus dem seitlichen Vierpunkthaltegriff mit identischen Kreiszyindern dargestellt	91
Abbildung 4.44: Die Trägheitsmomente eines Kreiszyinders mit homogener Massenverteilung für verschiedene Rotationsachsen	91
Abbildung 5.1: Die Wurfpuppe kann zur Bestimmung ihres Schwerpunktes für drei Achsen auf einer Holzlatte ausbalanciert werden	108
Abbildung 5.2: Ein falscher und ein richtiger Ansatz zu einem Schulterwurf mit der Wurfpuppe	123

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Relative Massen einzelner Gliedmaßen des menschlichen Körpers	22
Tabelle 2.2:	Relative Schwerpunktradien der Teilschwerpunkte einzelner Gliedmaßen in Bezug auf die Gliederlänge.....	23
Tabelle 2.3:	Relative Massen für die einzelnen Gelenkpunkte	25
Tabelle 3.1:	In Geogebra verwendete Abkürzungen für die Punkte bei der analytischen Schwerpunktbestimmung nach Dickwach	39
Tabelle 4.1:	Messdaten zur Lagebestimmung des KSP	50
Tabelle 4.2:	Gemessene Höhe des KSP und Größe des Kippwinkels für die Grundstellung und die Verteidigungsstellung.....	53
Tabelle 4.3:	Mittelwerte und Standardabweichungen der drei Messreihen für das Fallen	84
Tabelle 4.4:	Mittelwerte und Standardabweichungen für die von der Hand aus-geübten Kräfte	86

Abkürzungsverzeichnis

(CD xx)	In digitaler Form auf beiliegender CD. Über die zweistellige Zahl xx kann die entsprechende Datei geöffnet werden.
engl.	englisch
jap.	japanisch
KSP	Körperschwerpunkt
PiA	Physik in Aktion, Schülerlabor der Justus-Liebig-Universität Gießen
SuS	Schülerinnen und Schüler

1 Einleitung

Sport kann unter physikalischen Gesichtspunkten ein interessantes Themengebiet sein, da sich im Sport viele physikalische Konzepte ausmachen lassen. Dies fängt bei der Betrachtung einzelner Muskeln und Gelenke an und geht weiter bis hin zu Sportgeräten wie Bälle oder Fahrräder. Bewegungsabläufe im Sport richten sich nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Bei einer Pirouette im Eiskunstlauf spielt der Drehimpuls eine Rolle, während der Weitsprung mit einem schrägen Wurf verglichen werden kann (Mathelitsch & Thaller, 2008). In dieser Form ließen sich noch viele weitere Beispiele aufzählen. Darüber hinaus kann es auch von einem didaktischen Standpunkt aus interessant sein, Physik und Sport miteinander zu verbinden. So haben viele Schülerinnen und Schüler Spaß an Sport und betreiben selbst eine oder mehrere Sportarten.

In der vorliegenden Arbeit wird die Sportart Judo unter physikalischen Gesichtspunkten untersucht sowie als Kontext einer Lerneinheit für das Schülerlabor PiA (Physik in Aktion) der Justus-Liebig-Universität Gießen betrachtet. Die vielfältigen Bewegungsabläufe und Techniken im Judo bieten eine Reihe von Möglichkeiten, um in einem physikalischen Kontext analysiert zu werden. Aufgrund dessen kann Judo als ein Kontext zur Vermittlung physikalischer Sachverhalte herangezogen werden.

Im folgenden Abschnitt findet sich zunächst eine Vorstellung der Sportart Judo. Es wird kurz auf die Geschichte des Judo und seine Techniken eingegangen. Im zweiten Kapitel schließt sich eine Betrachtung der physikalischen und biomechanischen Grundlagen an. Dort wird die fachliche Basis für die vorliegende Arbeit gelegt. Neben der klassischen Mechanik wird ein besonderes Augenmerk auf den Themenbereich Schwerpunkt und Gleichgewicht gelegt. Dieser spielt sowohl bei der Betrachtung physikalischer Konzepte im Judo als auch in den Konzeptionen für das Schülerlabor eine herausragende Rolle. An die Grundlagen schließt sich ein Kapitel an, in dem die eingesetzten Geräte und Programme beschrieben werden. Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit der Sportart Judo unter fachlichen Gesichtspunkten. Bei verschiedenen Judo-Techniken werden Analysen aufgrund von Foto- oder Videoaufnahmen und

Messungen mit Kraftmessplatten durchgeführt, um auf die zugrunde liegenden physikalischen Konzepte schließen zu können. Im fünften Kapitel wird schließlich eine für diese Arbeit erstellte Lerneinheit zum Thema Schwerpunkt und Gleichgewicht vorgestellt. Zunächst werden grundlegende Überlegungen zu der in Stationen gegliederten Lerneinheit dargelegt. Daran schließt sich eine nähere Beschreibung der einzelnen Stationen an. In den abschließenden Kapiteln werden Schlussbetrachtungen aufgeführt und eine Zusammenfassung der Arbeit gegeben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mehrere digitale Dateien und Videos erstellt. Diese finden sich auf der beiliegenden CD. Ist zu einer Textstelle eine Datei auf der CD gespeichert, wird dies durch Verweise deutlich gemacht. Diese Verweise haben die Form (CDxx), wobei xx für eine zweistellige Zahl steht. Diese Zahl kann zum schnellen Öffnen der Datei im CD-Menü genutzt werden. Zum Beispiel öffnet die Eingabe von 00 die vorliegende Arbeit als PDF-Datei.

Die Sportart Judo

Judo ist eine aus Japan stammende Zweikampfsportart. Sie wurde gegen Ende des 19. Jahrhunderts von Jigoro Kano aus dem Jiu-Jitsu heraus entwickelt. Kano vereinigte in diesem Sport diejenigen Techniken, die seinem Prinzip eines möglichst wirksamen Gebrauchs von geistiger und körperlicher Energie entsprachen. Es soll nicht Kraft gegen Kraft eingesetzt werden. Vielmehr ist es das Ziel, die Kraft und Bewegung des Gegners zu nutzen. So kann auch ein stärkerer Gegner besiegt werden. Demnach ergibt sich auch der Name Judo. Er setzt sich aus den Wörtern *Ju* (,Sanftheit‘ oder ,Nachgeben‘) und *Do* (,Weg‘ oder ,Grundsatz‘) zusammen (vgl. Abbildung 1.1).



Abbildung 1.1: Das Wort Judo in japanischen Schriftzeichen (oben das Zeichen für Ju, unten für Do).

Somit kann *Judo* als der ‚sanfte Weg‘ oder ‚Kunst des Nachgebens‘ übersetzt werden. Eine die Sportart Judo betreibende Person wird entsprechend *Judoka* genannt.

Kano fasste Judo nicht nur als eine Sportart zur körperlichen Ertüchtigung auf, sondern auch als Grundlage für eine geistige Erziehung. Seit ihrer Entstehung hat sich die Sportart Judo schnell verbreitet und auch in Europa Anhänger gefunden. Seit 1964 ist Judo olympische Disziplin (Kano, 2007; Lehmann & Müller-Deck, 1989).

Die Techniken im Judo lassen sich in drei Hauptgruppen einteilen. Zunächst gibt es im Stand die Wurftechniken. Ziel eines Wurfes ist es, den Partner aus dem Stand auf den Rücken zu werfen. Neben den 40 klassischen Wurftechniken gibt es eine Vielzahl weiterer Würfe, die sich mit der Zeit entwickelt haben. Eine Gliederung der Würfe erfolgt nach den zugrunde liegenden Wurfprinzipien wie beispielsweise Hand-, Hüft- oder Fußtechniken. Eine weitere Gruppe bilden die Falltechniken. Diese werden trainiert, um ein verletzungs-freies Fallen bei den Wurftechniken zu ermöglichen. Unterschieden werden Fallübungen nach vorne, zur Seite und nach hinten. Die dritte Gruppe bilden die Bodentechniken. Diese setzen sich zusammen aus Halte-, Hebel- und Würgegriffen. Haltegriffe haben zum Ziel, den Partner auf dem Rücken liegend zu fixieren. Bei den Hebelgriffen wird eine Überstreckung des Ellenbogengelenks hervorgerufen, die den Partner zum Aufgeben zwingt. Würgegriffe zielen auf die Halsschlagadern oder die Luftröhre ab.

Die an einer Technik beteiligten Akteure werden im Judo mit den japanischen Begriffen *Tori* und *Uke* bezeichnet. *Tori* ist dabei immer derjenige, der eine Technik ausführt, und *Uke* derjenige, an dem diese Technik ausgeführt wird. In Bezug auf einen Wurf bedeutet dies, dass *Tori* derjenige ist, der *Uke* wirft.

2 Physikalische und biomechanische Grundlagen

Die im Folgenden aufgeführten physikalischen und biomechanischen Sachverhalte dienen als Grundlagen für die Untersuchungen von Judo im physikalischen Kontext. Ebenso stellen sie die Klärung fachlicher Zusammenhänge für die Lernstationen des Schülerlabors dar.

2.1 Bewegungen

2.1.1 Translationsbewegung

Ein Körper, der parallel verschoben wird, vollführt eine Translationsbewegung. Spielt die Größe des Körpers keine Rolle und ist nur die Translationsbewegung des Körpers von Interesse, kann der Körper zu einem Massenpunkt abstrahiert werden. Bei einem Massenpunkt handelt es sich um einen, mit einer Masse behafteten, mathematischen Punkt. Massenpunkte können nur Translationsbewegungen ausführen (Giancoli, 2006).

Aus der Differenz der Ortsvektoren zu zwei verschiedenen Zeitpunkten ergibt sich der zurückgelegte Weg $\Delta\vec{s}$. Die Durchschnittsgeschwindigkeit ist definiert als Quotient von $\Delta\vec{s}$ und dem Zeitintervall Δt zwischen den Zeitpunkten:

$$\vec{v}(t) = \frac{\Delta\vec{s}(t)}{\Delta t}. \quad (2.1)$$

Auf die Momentangeschwindigkeit gelangt man durch einen Grenzübergang $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{s}(t)}{dt}. \quad (2.2)$$

Aus der Änderung der Geschwindigkeit ergibt sich analog die Durchschnittsbeschleunigung

$$\vec{a}(t) = \frac{\Delta\vec{v}(t)}{\Delta t} \quad (2.3)$$

und die Momentanbeschleunigung

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt}. \quad (2.4)$$

Für eine Bewegung mit zeitlich konstanter Beschleunigung kann durch Integration über die Zeit auf den zurückgelegten Weg geschlossen werden:

$$\vec{s}(t) = \vec{s}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{1}{2} \vec{a} t^2. \quad (2.5)$$

Dabei bezeichnen \vec{s}_0 und \vec{v}_0 Integrationskonstanten, welche durch die Anfangsbedingungen festgelegt sind (Giancoli, 2006; Demtröder, 2008).

2.1.2 Rotationsbewegung

Bei einer Rotationsbewegung bewegt sich ein Körper auf einer Kreisbahn um eine Rotationsachse. Analog zur Translationsbewegung lassen sich hier die Winkelgeschwindigkeit

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.6)$$

und die Winkelbeschleunigung

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (2.7)$$

mit dem zurückgelegten Winkel φ definieren (Giancoli, 2006).

2.2 Kräfte

Ursache für die Änderung des Bewegungszustandes oder Verformungen eines Körpers sind Wechselwirkungen mit seiner Umgebung. Diese Wechselwirkungen können durch das Konzept der Kräfte beschrieben werden. Kräfte sind Vektoren und haben somit eine Größe bzw. einen Betrag sowie eine Richtung. Falls mehrere Kräfte in einem Punkt angreifen, entspricht die resultierende Kraft (auch: Nettokraft) der Vektorsumme aller in diesem Punkt angreifenden Kräfte (Demtröder, 2008; Giancoli, 2006).

2.2.1 Die Newtonschen Axiome

Der Bezug zwischen der Bewegung eines Körpers und der auf ihn einwirkenden Kraft kann durch die Newtonschen Axiome beschrieben werden (Demtröder, 2008). Das erste Newtonsche Axiom besagt, dass „jeder Körper so lange im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen, geradlinigen Bewegung verharrt, wie keine Nettokraft auf ihn wirkt“ (Giancoli, 2006, S. 107).

Das zweite Newtonsche Axiom stellt einen Bezug zwischen der Masse eines Körpers, der auf ihn wirkenden Kraft und der Beschleunigung her:

„Die Beschleunigung eines Körpers ist direkt proportional zu der auf ihn einwirkenden Nettokraft und umgekehrt proportional zu seiner Masse. Die Richtung der Beschleunigung ist die Richtung der auf den Körper wirkenden Nettokraft“ (Giancoli, 2006, S. 108). Als Gleichung lässt sich das zweite Newtonsche Axiom demnach folgendermaßen schreiben:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (2.8)$$

Hierbei ist \vec{a} die Beschleunigung, \vec{F} die Nettokraft und m die Masse des Körpers.

Das dritte Newtonsche Axiom bezieht sich schließlich auf die Wechselwirkung zweier Körper: „Wenn ein Körper auf einen zweiten Körper eine Kraft ausübt, übt auch der zweite Körper eine gleich große, aber entgegengerichtete Kraft auf den ersten Körper aus“ (Giancoli, 2006, S. 111). Dieses Axiom lässt sich auch als

$$actio = reactio \text{ bzw. } \vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \quad (2.9)$$

formulieren. Hierbei ist zu beachten, dass die Aktionskraft und die Reaktionskraft auf verschiedene Körper wirken (Giancoli, 2006; Demtröder, 2008).

2.2.2 Bezeichnung spezieller Kräfte

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Kräfte mit einem bestimmten Begriff bezeichnet. Die Begriffe entsprechen dabei gängigen Bezeichnungen.

Das Gewicht \vec{G} eines Körpers bezeichnet die Gewichtskraft, die auf diesen Körper aufgrund der Gravitation wirkt. Es ist nicht mit der Masse des Körpers zu verwechseln (Giancoli, 2006).

Befindet sich ein Körper auf der Erde in Ruhelage, also in Kontakt zu einem zweiten Körper, wirkt gemäß dem ersten Newtonschen Axiom eine weitere Kraft, welche die Gewichtskraft ausgleicht. Diese Normalkraft ist antiparallel zur Gewichtskraft des Körpers und wird durch den zweiten Körper ausgeübt (Abbildung 2.1).

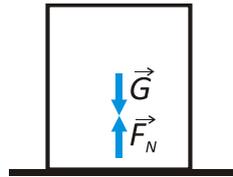


Abbildung 2.1: Ein ruhender Quader. Die Schwerkraft G und die Normalkraft F_N der Unterlage wirken auf den Quader. Die Kräfte sind antiparallel und gleich groß.

Des Weiteren findet eine Unterscheidung von internen und externen Kräften statt. Interne Kräfte werden von Körpern innerhalb des betrachteten Systems aufeinander ausgeübt. Bei internen Kräften liegen sowohl die Ursprünge als auch die Angriffspunkte innerhalb des betrachteten Systems. Interne Kräfte treten somit gemäß dem dritten Newtonschen Axiom immer paarweise auf. Externe Kräfte werden von Körpern außerhalb des Systems ausgeübt oder wirken auf diese. Ursprung, Angriffspunkt, beschleunigte Masse oder Gegenkraft gehören nicht zum System (Giancoli, 2006; Nieke, 1962).

2.2.3 Druck

Die Größe Druck ist als Kraft pro Flächeneinheit definiert. Für den Druck p gilt also:

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.10)$$

Die Kraft F wirkt dabei senkrecht zur Fläche A (Giancoli, 2006).

2.3 Drehmoment und Trägheitsmoment

Soll sich ein Körper um eine Rotationachse zu drehen beginnen, muss eine Kraft wirken. Die durch diese Kraftwirkung entstehende Winkelbeschleunigung ist proportional zur Summe aller auf den Körper wirkenden Drehmomente. Das einzelne Drehmoment \vec{D} ergibt sich durch:

$$\vec{D} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (2.11)$$

\vec{F} bezeichnet dabei die wirkende Kraft und \vec{r} den Vektor von der Rotationachse zum Angriffspunkt der Kraft. Somit trägt nur eine Teilkomponente der Kraft zum Drehmoment bei, nämlich die zu \vec{r} senkrecht stehende Kompen-

te. Der Abstand von der Rotationsachse zum Angriffspunkt der Kraft wird auch als Hebelarm oder Kraftarm bezeichnet (Giancoli, 2006).

Eine Kraft \vec{F}_1 , die nicht im Schwerpunkt (s. Abschnitt 2.6) eines Körpers angreift, bewirkt ein Drehmoment bezogen auf den Schwerpunkt und eine Beschleunigung des Schwerpunktes. Es kommt zu einer Translation und einer Drehung mit dem Schwerpunkt als Rotationsachse.

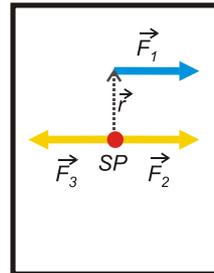


Abbildung 2.2: Eine nicht am Schwerpunkt angeifende Kraft \vec{F}_1 führt zu einer Translation und einer Rotation um den Schwerpunkt SP. Zur Begründung werden gleich große, antiparallele Kräfte \vec{F}_2 und \vec{F}_3 am Schwerpunkt addiert.

Zur Erklärung werden die Kräfte \vec{F}_2 und \vec{F}_3 am Schwerpunkt addiert. Für diese Kräfte gilt:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 = -\vec{F}_3. \quad (2.12)$$

\vec{F}_2 und \vec{F}_3 führen zu keiner Bewegungsänderung, da sie am gleichen Punkt angreifen, gleich groß und antiparallel sind. \vec{F}_1 und \vec{F}_3 greifen als Kräftepaar an zwei verschiedenen Punkten an und führen so zu einem Drehmoment

$$\vec{D} = \vec{r} \times \vec{F}_1 \quad (2.13)$$

in Bezug auf den Schwerpunkt. Da $\vec{F}_1 + \vec{F}_3 = 0$ gilt, wird durch das Kräftepaar keine Beschleunigung des Schwerpunktes hervorgerufen. Jedoch erfährt der Schwerpunkt durch die Kraft \vec{F}_2 eine Beschleunigung.

Kann der Körper nur um eine durch äußere Lager festgehaltene raumfeste Achse rotieren, kommt es zu keiner Translation. Die resultierende Kraft wird von den Achsenlagern aufgefangen (Demtröder, 2008).

Die Gewichtskraft übt auf einen Körper über alle Massenelemente betrachtet kein Drehmoment aus, falls die Rotationsachse durch den Schwerpunkt des Körpers geht (Demtröder, 2008).

Eine grundsätzliche Anwendung finden Drehmomente im Hebelgesetz (Abbildung 2.3).

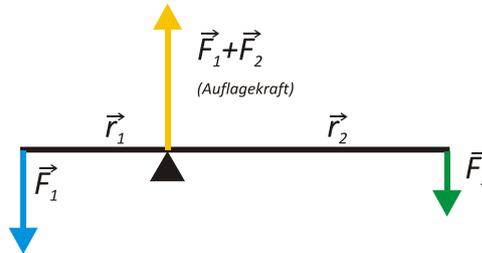


Abbildung 2.3: Darstellung des Hebelgesetzes für einen zweiarmligen Hebel.

Für den Fall des Gleichgewichts, also gleich großer Drehmomente bezüglich des Auflagepunktes, lässt sich das Hebelgesetz mit den Bezeichnungen aus Abbildung 2.3 in skalarer Schreibweise folgendermaßen formulieren:

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2 \quad (2.14)$$

oder allgemein in Worten:

$$\text{Kraft} \cdot \text{Kraftarm} = \text{Last} \cdot \text{Lastarm}.$$

Voraussetzung für diese Schreibweise ist allerdings, dass die Kräfte parallel zueinander und senkrecht zu den Hebelarmen sind. Die Kraft $\vec{F}_1 + \vec{F}_2$ am Auflagepunkt bewirkt kein Drehmoment bezüglich des Auflagepunktes (Giancoli, 2006).

Als Analogon zum zweiten Newtonschen Axiom kann das Drehmoment auch über

$$\vec{D} = J \cdot \vec{\alpha} \quad (2.15)$$

bestimmt werden (Giancoli, 2006). Hierbei steht J für das Trägheitsmoment und $\vec{\alpha}$ für die Winkelbeschleunigung. Das Trägheitsmoment entspricht dabei einem Maß für die Massenverteilung in einem ausgedehnten Körper bezüglich einer Rotationsachse (Demtröder, 2008). Für einen einzelnen Massenpunkt mit der Masse m und dem senkrechten Abstand r_{\perp} zur Rotationsachse kann das Trägheitsmoment über folgenden Zusammenhang berechnet werden:

$$J = m \cdot r_{\perp}^2 \quad (2.16)$$

Zur Bestimmung des Trägheitsmoments ausgedehnter Körper, also unendlich vieler Massenpunkte, ist eine Integration über das Volumen V des Körpers notwendig:

$$J = \int_V r_{\perp}^2 \rho dV \quad (2.17)$$

Hat die Drehbewegung eine Rotationsachse, die nicht durch den Schwerpunkt des Körpers geht, wird das Trägheitsmoment über den Steinerschen Satz ermittelt (Demtröder, 2008):

$$J_A = J_{SP} + s^2 M \quad (2.18)$$

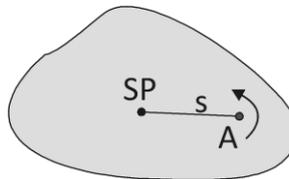


Abbildung 2.4: Illustration zum Steinerschen Satz. Gezeigt ist die Schnittebene durch den Schwerpunkt SP und senkrecht zur Drehachse A .

Das Trägheitsmoment J_B des Körpers bei Rotation um eine Achse A setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Zu dem Trägheitsmoment J_{SP} für eine Rotation um eine zu A parallele Achse durch den Schwerpunkt wird das Trägheitsmoment der Körpermasse M für eine Rotation um die Achse A im Abstand s vom Schwerpunkt addiert (Demtröder, 2008; Wick, 2005). Mithilfe des Steinerschen Satzes kann auch das gesamte Trägheitsmoment des menschlichen Körpers bestimmt werden (Wick, 2005). Abbildung 2.5 zeigt das Verhältnis der Trägheitsmomente des menschlichen Körpers für ausgewählte Rotationsachsen.

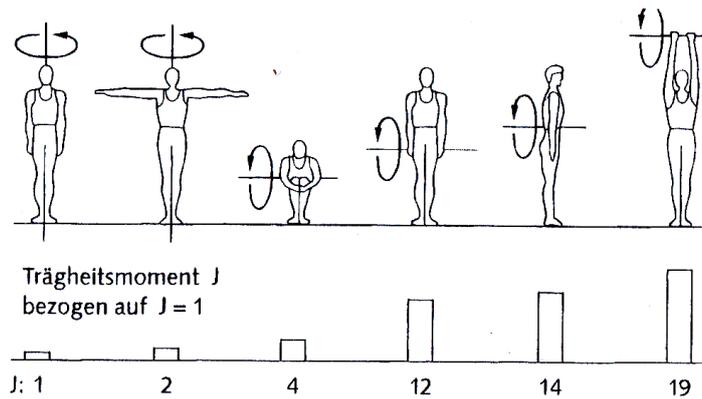


Abbildung 2.5: Die Relationen des Trägheitsmoments des Menschen bei unterschiedlichen Drehachsen und Körperhaltungen (Wick, 2005, S. 59).

2.4 Energie

Der Begriff der Energie ist eng mit dem Begriff der Arbeit verknüpft. Die an einem Körper verrichtete Arbeit ergibt sich aus einer Kraft \vec{F} entlang eines Weges \vec{s} durch Integration:

$$W = \int \vec{F} d\vec{s}. \quad (2.19)$$

Die potenzielle Energie eines Körpers hängt mit dessen Lage in einem konservativen Kraftfeld zusammen. Wird ein Körper im praktisch konstanten Gravitationsfeld nahe der Erdoberfläche in eine Höhe h über einen Bezugspunkt gehoben, so ergibt sich die erforderliche Hubarbeit aus der Gewichtskraft:

$$W = \int_0^h G ds = - \int_0^h m \cdot g ds = -m \cdot g \cdot h. \quad (2.20)$$

Diese Arbeit wird als Differenz der potenziellen Energien für die beiden Lagen des Körpers aufgefasst:

$$W = -m \cdot g \cdot h = E_{pot}(0) - E_{pot}(h). \quad (2.21)$$

Wird $E_{pot}(0) = 0$ gewählt, ergibt sich die potenzielle Energie als

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h. \quad (2.22)$$

Ein Körper mit einer potenziellen Energie hat auch die Möglichkeit, diese wieder in Arbeit zu verwandeln (Demtröder, 2008; Giancoli, 2006). $E_{pot} = 0$ wird im Folgenden für den Nullpunkt des Koordinatensystems gewählt.

In einem konservativen Kraftfeld lässt sich über den Gradienten der potenziellen Energie auf die Kraft schließen (Demtröder, 2008):

$$\vec{F} = -\nabla E_{pot}. \quad (2.23)$$

Aus dem zweiten Newtonschen Axiom (2.8) lässt sich ein Ausdruck für die kinetische Energie eines Körpers bestimmen:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2. \quad (2.24)$$

Hierbei bezeichnet v die Geschwindigkeit des Körpers (Demtröder, 2008). Die Zunahme der kinetischen Energie eines Körpers entspricht dabei der ihm zugeführten Arbeit. Hieraus lässt sich der Energieerhaltungssatz für die Mechanik formulieren: Die Gesamtenergie eines Systems, bestehend aus der Summe der kinetischen und potenziellen Energie des Systems, bleibt bei konservativen Kräften zu jedem Zeitpunkt konstant. Für ein System, das nur aus einem Körper besteht, gilt also unter der Voraussetzung konservativer Kräfte:

$$E_{kin,1} + E_{pot,1} = E_{kin,2} + E_{pot,2}, \quad (2.25)$$

wobei die linke Seite der Gleichung einen Zeitpunkt und die rechte Seite einen zweiten Zeitpunkt darstellt (Giancoli, 2006; Demtröder, 2008).

Ein Körper, der um eine Achse rotiert, verfügt über Rotationsenergie. Für eine raumfeste Achse lässt sich die Rotationsenergie durch eine zur Gleichung der kinetischen Energie analoge Gleichung berechnen:

$$E_{Rot} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2. \quad (2.26)$$

Der Masse entspricht hier das Trägheitsmoment J und der Geschwindigkeit die Winkelgeschwindigkeit ω . Die Rotationsenergie hängt also vom Trägheitsmoment und der Winkelgeschwindigkeit ab. Dies setzt voraus, dass es sich um einen Körper handelt, bei dem sich jeder Massenpunkt des Körpers mit gleicher Winkelgeschwindigkeit bewegt (Giancoli, 2006; Machold, 2005).

Die Energieerhaltung lässt sich unter Einbeziehung aller Energieformen auch ganz allgemein formulieren: „Die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems bleibt zeitlich konstant, wobei die verschiedenen Energieformen ganz oder teilweise ineinander umgewandelt werden können“ (Demtröder, 2008, S. 135).

2.5 Impuls

Das Produkt aus der Masse m eines Körpers und dessen Geschwindigkeit \vec{v} definiert den Impuls \vec{p} des Körpers:

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (2.27)$$

Der Impuls ist somit eine vektorielle Größe und hat als Richtung die Richtung der Geschwindigkeit. Für die Änderung des Impulses eines Körpers ist eine Kraft notwendig. Die zeitliche Änderung des Impulses entspricht demnach der auf den Körper ausgeübten Nettokraft:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i \quad (2.28)$$

Der Impuls eines Systems von n Körpern ergibt sich aus der Summe der Einzelimpulse:

$$\vec{p}_{System} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i \quad (2.29)$$

Bei einem System von Körpern lassen sich innere und äußere Kräfte unterscheiden. Da die inneren Kräfte nach dem dritten Newtonschen Axiom (2.9) immer paarweise auftreten, heben sie sich gerade auf. Für den Gesamtimpuls des Systems ist also nach Gleichung (2.36):

$$\frac{d\vec{p}_{System}}{dt} = \sum_i \vec{F}_{i,ext} \quad (2.30)$$

Wenn sich nun noch die auf das System wirkenden externen Kräfte gerade aufheben, ist auch die Änderung des Gesamtimpulses null. Der Impuls des Systems ist dann konstant. Hieraus lässt sich der Impulserhaltungssatz formulieren: „Der Gesamtimpuls eines abgeschlossenen Systems von Körpern bleibt konstant“ (Giancoli, 2006, S. 280). Ein abgeschlossenes System ist dabei ein System, auf das keine äußeren Kräfte wirken (Giancoli, 2006).

Kraftstoß

Bei einem Stoß zwischen zwei Körpern wirkt auf beide Körper in einem kleinen und normalerweise scharf begrenzten Zeitintervall Δt eine große Kraft (Abbildung 2.6).

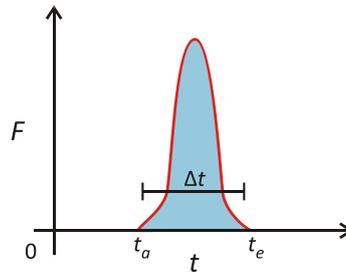


Abbildung 2.6: Kraft-Zeit-Kurve für einen typischen Stoß (mod. nach Giancoli, 2006, S. 283).

Das Integral der Kraft über das Zeitintervall, in dem sie wirkt, wird als Kraftstoß $\vec{F}\Delta t$ bezeichnet. Es ist also:

$$\vec{F}\Delta t = \int_{t_a}^{t_e} \vec{F} dt \quad (2.31)$$

Der Kraftstoß entspricht somit der Änderung des Impulses eines Körpers:

$$\Delta\vec{p} = \vec{p}_e - \vec{p}_a = \vec{F}\Delta t \quad (2.32)$$

Dabei ist \vec{F} die im Mittel auf den Körper wirkende Kraft (Giancoli, 2006).

2.6 Der Schwerpunkt

Die Gravitationskraft wirkt auf den ganzen Körper bzw. alle seine Massenpunkte. Die Summe der Gewichtskräfte aller Massenpunkte eines Körpers wirkt so, als wenn die gesamte Gewichtskraft in einem Punkt des Körpers, dem Schwerpunkt (engl.: *center of gravity*), angreifen würde. Es kann insbesondere bei der Bestimmung der Translationsbewegung eines Körpers angenommen werden, dass die Summe der Gewichtskräfte der einzelnen Massenpunkte nur im Schwerpunkt wirkt (Machold, 2005; Giancoli, 2006; McGinnis, 2005).

Der Massenmittelpunkt (engl.: *center of mass*) ist ein dem Schwerpunkt ähnlicher Punkt. Die gesamte Masse des Körpers kann als im Massenmittelpunkt konzentriert angenommen werden. Massenmittelpunkt und Schwerpunkt sind demnach imaginäre Punkte (Giancoli, 2006; McGinnis, 2005). Der Unterschied, aber auch die Ähnlichkeit zwischen Schwerpunkt und Massenmittelpunkt wird besonders in den englischsprachigen Bezeichnungen deutlich.

Massenmittelpunkt und Schwerpunkt fallen zusammen, wenn in allen Teilen des betrachteten Körpers die Fallbeschleunigung gleich groß ist (Giancoli, 2006). Da sich die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Fälle alle auf oder doch zumindest nahe an der Erdoberfläche abspielen, ist eine Unterscheidung von Schwerpunkt und Massenmittelpunkt nicht erforderlich. Daher wird im Folgenden nur noch vom Schwerpunkt die Rede sein, wenn der Ort des Massenmittelpunktes und des Schwerpunktes gemeint ist.

2.6.1 Lage des Schwerpunktes

System mehrerer Massenpunkte

Bei einem System mehrerer diskreter Massenpunkte kann der Schwerpunkt über die Lage der Massenpunkte und deren jeweilige Masse bestimmt werden. Liegen die n Massenpunkte des Systems in einem Koordinatensystem und haben die Ortsvektoren \vec{r}_i und Massen m_i , ergibt sich der Ortsvektor \vec{r}_S des Schwerpunktes folgendermaßen:

$$\vec{r}_S = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} . \quad (2.33)$$

Mit der Gesamtmasse $M = \sum_{i=1}^n m_i$ des Systems ist

$$\vec{r}_S = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i . \quad (2.34)$$

Der Ortsvektor des Schwerpunktes bezieht sich hierbei auf ein fest gewähltes Koordinatensystem. Die Lage des Schwerpunktes ist jedoch von der Wahl des Bezugssystems unabhängig (Giancoli, 2006; Demtröder, 2008). Abbildung 2.7 veranschaulicht die Lage des Schwerpunktes für ein einfaches System von Massenpunkten.

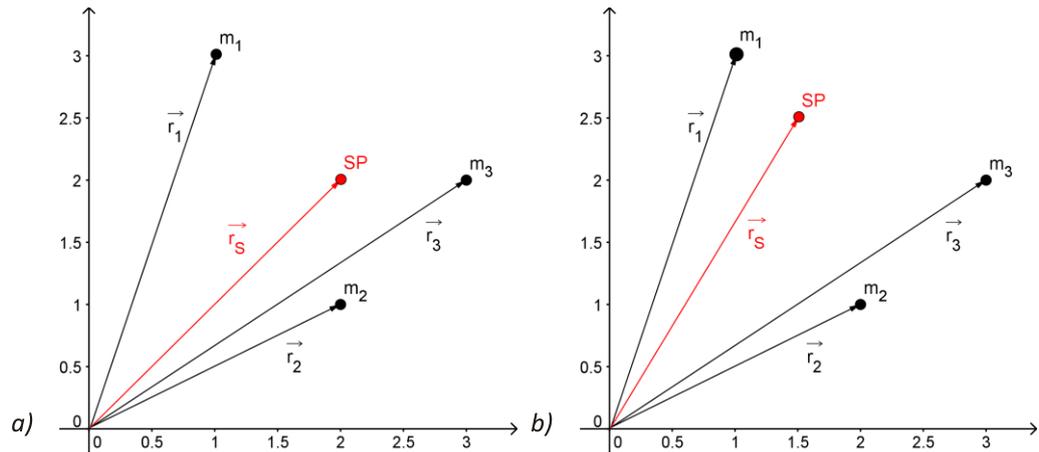


Abbildung 2.7: Ein zweidimensionales System von drei Massenpunkten m_1 , m_2 und m_3 mit Schwerpunkt SP. a) Alle drei Massen sind identisch. b) Masse m_1 ist viermal so groß wie die Massen der beiden anderen Massenpunkte. Dementsprechend verändert sich die Lage des Schwerpunktes.

Schwerpunkt eines Körpers

Die Überlegungen zur Bestimmung des Schwerpunktes eines ausgedehnten Körpers mit kontinuierlicher Massenverteilung bauen auf dem vorherigen Abschnitt auf. Ein solcher Körper besteht aus unendlich vielen Massenpunkten, sodass es zum Grenzübergang $n \rightarrow \infty$ kommt. Aus Gleichung (2.34) ergibt sich dann für den Ortsvektor \vec{r}_S des Schwerpunktes eines Körpers mit der Masse M und der Dichte ρ ein Integral:

$$\vec{r}_S = \frac{1}{M} \int_V \vec{r} dm = \frac{1}{M} \int_V \vec{r} \rho(\vec{r}) dV . \quad (2.35)$$

Hat der Körper eine homogene Massenverteilung, also $\rho = \text{const}$, vereinfacht sich dies zu:

$$\vec{r}_S = \frac{1}{V} \int_V \vec{r} dV . \quad (2.36)$$

Bei einem Körper mit symmetrischer Form liegt der Schwerpunkt somit in seinem geometrischen Mittelpunkt (Giancoli, 2006; Demtröder, 2008).

2.6.2 Schwerpunkt und Bewegungsbeschreibung

Die auf ein System wirkende Nettokraft steht in direkter Beziehung zur Translationsbewegung des Schwerpunktes. Diese Beziehung lässt sich aus Gleichung (2.34) herleiten. Dabei wird von einer konstanten Gesamtmasse M ausgegangen. Umgestellt und zweimal nach der Zeit differenziert ergibt sich

$$M \frac{d^2 \vec{r}_S}{dt^2} = \sum_{i=1}^n m_i \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2}$$

bzw.

$$M \vec{a}_S = \sum_{i=1}^n m_i \vec{a}_i. \quad (2.37)$$

Hierbei ist \vec{a}_S die Beschleunigung des Schwerpunktes und \vec{a}_i die Beschleunigung des i -ten Massenpunktes. Mit dem zweiten Newtonschen Axiom gilt:

$$M \vec{a}_S = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i. \quad (2.38)$$

Die Summe der Kräfte setzt sich aus internen und externen Kräften zusammen. Da nach dem dritten Newtonschen Axiom die internen Kräfte paarweise auftreten und sich gegenseitig aufheben, bleiben innerhalb der Summe von Gleichung (2.38) nur die externen Kräfte übrig:

$$M \vec{a}_S = \sum_{i=1}^n \vec{F}_{i,ext}. \quad (2.39)$$

Die Summe der auf das System wirkenden externen Kräfte ist also gleich der Gesamtmasse des Systems multipliziert mit der Beschleunigung des Schwerpunktes. Diese Aussage gilt auch für ausgedehnte Körper und Systeme von Körpern. Somit folgt, dass sich der Schwerpunkt eines Körpers mit der Gesamtmasse M genauso bewegt wie ein einzelner Massenpunkt mit Masse M , auf den dieselben externen Kräfte wirken. Der Körper bewegt sich, als wenn die gesamte Masse im Schwerpunkt konzentriert wäre und alle externen Kräfte in diesem Punkt wirken würden. Die Translationsbewegung eines Körpers kann also wie die Bewegung eines einzelnen Massenpunktes behandelt werden. Insgesamt lässt sich die Bewegung eines ausgedehnten starren Körpers immer in eine Translationsbewegung des Schwerpunktes und in Rotationen

um die drei Hauptträgheitsachsen durch den Schwerpunkt zerlegen. (Giancoli, 2006; Demtröder, 2008).

2.6.3 Der Schwerpunkt des menschlichen Körpers

Der Körperschwerpunkt (KSP) liegt bei einem normal aufrecht stehenden Menschen mit hängenden Armen und paralleler Beinhaltung näherungsweise bei 55% (Frauen) bzw. 57% (Männer) der Körperhöhe. Bei jungen Kindern liegt er aufgrund des verhältnismäßig größeren Kopfes und der kürzeren Beine etwas höher (McGinnis, 2005).

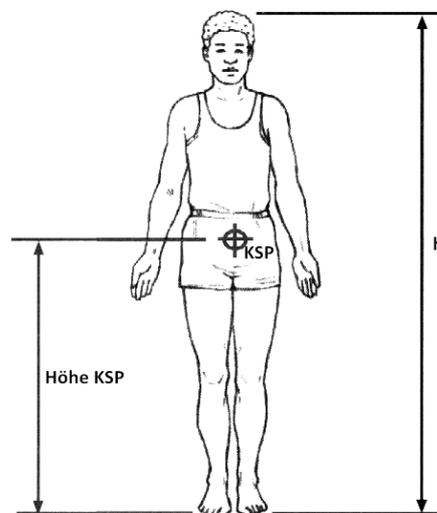


Abbildung 2.8: Bei einer aufrechten Körperhaltung liegt der KSP bei etwa 55% bis 57% der Körperhöhe (mod. nach McGinnis, 2005, S. 133).

Die genaue Lage des KSP eines Menschen lässt sich nur mit einem gewissen Aufwand bestimmen. Durch Bewegungen verändern sich die Positionen einzelner Körperteile und somit auch die Massenverteilung im Raum. Nach jeder Bewegung eines Körperteils ergibt sich somit eine veränderte Situation mit einer anderen Lage des KSP.

Ebenso hat der gesamte Körper wie auch jedes Körperteil für sich aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung aus Knochen, Muskelmasse u. a. eine inhomogene Massenverteilung. Folglich liegen weder der KSP noch die einzelnen Teilschwerpunkte der Gliedmaßen im geometrischen Zentrum des Körpers bzw. in den geometrischen Zentren der Gliedmaßen.

Grundsätzlich lassen sich zwei Klassen von Methoden zur Schwerpunktbestimmung unterscheiden: Zum einen die experimentelle Methode und zum anderen die analytische Methode (Hochmuth, 1981).

Eine recht einfache experimentelle Bestimmung einer Schwerpunktkoordinate lässt sich über das Hebelgesetz (2.14) durchführen. Der Aufbau stellt sich wie in Abbildung 2.9 angedeutet dar. Eine harte Unterlage wird drehbar an einer Wand befestigt. Hierfür eignet sich beispielsweise eine Langbank und eine Sprossenwand. Der freie Teil der Unterlage steht auf einer Kraftmessplatte. Auf die Unterlage legt sich nun die Person, deren Schwerpunkt bestimmt werden soll.

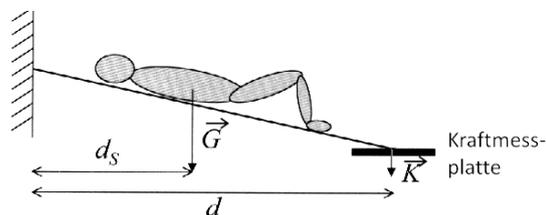


Abbildung 2.9: Anordnung zur Ermittlung einer Koordinate des KSP (mod. nach Duenbostl, Mathelitsch, Oudin, & Thaller, 2010, S. 15).

Aus der Anzeige der Kraftmessplatte kann die zusätzliche Kraft K , die durch die Person im Auflagepunkt entsteht, bestimmt werden. Die Gleichung des Hebelgesetzes (2.14) auf diesen Aufbau übertragen, lautet:

$$G \cdot d_s = K \cdot d . \quad (2.40)$$

Hierbei ist G die Gewichtskraft der Person, d der Abstand von der Wand zum Auflagepunkt der Unterlage und d_s der Abstand von der Wand zum Lotfußpunkt des Schwerpunktes. Nach Umstellen dieser Gleichung zu

$$d_s = \frac{d \cdot K}{G} \quad (2.41)$$

lässt sich eine Koordinate des Schwerpunktes für verschiedene Körperpositionen (bspw. normales Liegen, angezogene Beine, Arme über Kopf, Sitzposition,...) bestimmen (Duenbostl, Mathelitsch, Oudin, & Thaller, 2010; Mathelitsch & Thaller, 2008).

Eine weitere experimentelle Methode ist die Baslersche Methode. Sie erlaubt die Bestimmung der Lage des Schwerpunktes in zwei Dimensionen, ist aber auch in Aufbau und Auswertung komplizierter.

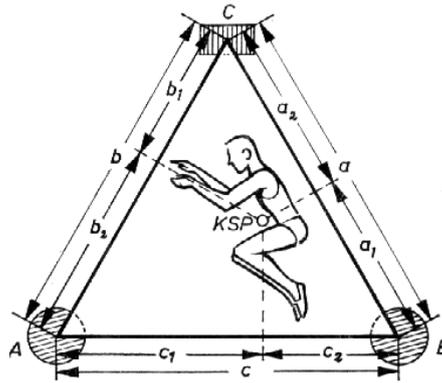


Abbildung 2.10: Darstellung der Baslerschen Methode zur Schwerpunktbestimmung (Hochmuth, 1981, S. 113).

Die Bestimmung des KSP erfolgt über Auswägen auf einer gleichseitigen Dreiecksplattform. Eine Person nimmt auf der Plattform liegend die Körperhaltung ein, für die der KSP bestimmt werden soll (siehe Abbildung 2.10). Die zwei Ecken A und B der Plattform liegen dabei auf Waagen. Die dritte Ecke C ist starr unterstützt. Das Gewicht der Person G_{ges} teilt sich je nach Körperlage auf die drei Ecken auf, so dass für die drei Teilgewichte G_A , G_B und G_C in den jeweiligen Ecken gilt:

$$G_A + G_B + G_C = G_{ges} \quad (2.42)$$

Wenn das Gesamtgewicht, zwei Teilgewichte und die Seitenlängen der Plattform bekannt sind, lässt sich der Ort des KSP bestimmen. Mit den Bezeichnungen aus Abbildung 2.10 können bezüglich der Auflagepunkte A und C die beiden folgenden Drehmomentgleichungen für Drehungen um horizontale Achsen aufgestellt werden:

$$G_{ges}c_1 - G_Bc - G_C \frac{c}{2} = 0 \quad (2.43)$$

$$G_{ges}b_1 - G_Ab - G_B \frac{b}{2} = 0 \quad (2.44)$$

Nach Umstellen und unter Berücksichtigung von (2.42) zur Ersetzung von G_C ergibt sich:

$$c_1 = \frac{(G_B - G_A + G_{ges}) \frac{c}{2}}{G_{ges}} \quad (2.45)$$

$$b_1 = \frac{G_Ab + G_B \frac{b}{2}}{G_{ges}} \quad (2.46)$$

In den Abständen c_1 und b_1 können nun auf den Dreiecksseiten Senkrechte errichtet werden. Der Schnittpunkt dieser Senkrechten ergibt den Ort des KSP (Hochmuth, 1981). Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die je nach Körperbau, Dichte und Gewebeverteilung individuell variierende Lage des KSP berücksichtigt wird. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass viele Körperpositionen nicht genau eingehalten werden können, insbesondere, wenn es sich um die Position aus einer räumlichen Bewegung handelt. Ebenso kommt es durch die Drehung des Körpers in die Horizontale zu einer Verlagerung von Weichteilen und Körperflüssigkeiten und dementsprechend zu einer Verlagerung des KSP (Baumann, 1989; Dickwach, 1967).

Eine weitere Möglichkeit zur Schwerpunktbestimmung stellen analytische Verfahren dar. Sie beruhen auf dem unter Abschnitt 2.6.1 angegebenen Vorgehen. Es werden einzelne Körperteile mit ihren Teilmassen und Teilschwerpunkten in einem Koordinatensystem betrachtet. Die Lage des Schwerpunktes ergibt sich dann nach Gleichung (2.33). Neben experimentell und mathematisch sehr aufwändigen Verfahren, um die nötigen Daten individuell zu erheben, ist auch eine näherungsweise Berechnung mittels statistischer Daten möglich. Hierfür gibt es drei Grundannahmen (Baumann, 1989; Hochmuth, 1981):

- Die Massen der einzelnen Körperteile stehen in einem bestimmten festen Verhältnis zur gesamten Körpermasse.
- Die Schwerpunkte der Körperteile liegen auf ihren Längsachsen und haben interindividuell den gleichen Abstand zu anatomischen Bezugspunkten.
- Die einzelnen Körperteile sind starr.

Tabelle 2.1 enthält eine Zusammenstellung der relativen Teilmassen einzelner Gliedmaßen. Die Angaben verstehen sich als Anteile an der Gesamtmasse des Körpers. Mit den Werten von Fischer ergibt sich beispielsweise eine Oberschenkelmasse von 11,58% der Körpermasse. Da es sich um statistische Werte handelt, liegen hier je nach Quelle unterschiedliche Daten vor.

Tabelle 2.1: Relative Massen einzelner Gliedmaßen des menschlichen Körpers.
Bezugsgröße ist jeweils die Gesamtmasse des Körpers.

Körperteil \ Quelle	Fischer, nach Hochmuth, 1981	Baumann, 1989	de Leva, 1996	
			Mann	Frau
Kopf	0,0706	0,07	0,0694	0,0668
Rumpf	0,4270	0,43	0,4346	0,4257
Oberschenkel (x2)	0,1158	0,14	0,1416	0,1478
Unterschenkel (x2)	0,0527	0,045	0,0433	0,0481
Fuß (x2)	0,0179	0,027	0,0137	0,0129
Oberarm (x2)	0,0336	/	0,0271	0,0255
Unterarm (x2)	0,0228	0,016	0,0162	0,0138
Hand (x2)	0,0084	0,007	0,0061	0,0056

Die Lage der Teilschwerpunkte wird, wie bereits erwähnt, auf den Längsachsen der einzelnen Körperteile angegeben. Der Schwerpunktradius bezeichnet dabei den Abstand des Teilschwerpunktes auf dieser Achse zu anatomischen Bezugspunkten. Die Angabe der Schwerpunktradien erfolgt in relativen Längen (vgl. Abbildung 2.11). Ein Schwerpunktradius von 0,44 für den Oberschenkel bedeutet also, dass sich der Schwerpunkt des Oberschenkels bei 44% der Länge des Oberschenkels befindet. Als Bezugspunkte der Radien werden Gelenke oder spezielle Knochen gewählt (vgl. Tabelle 2.2).

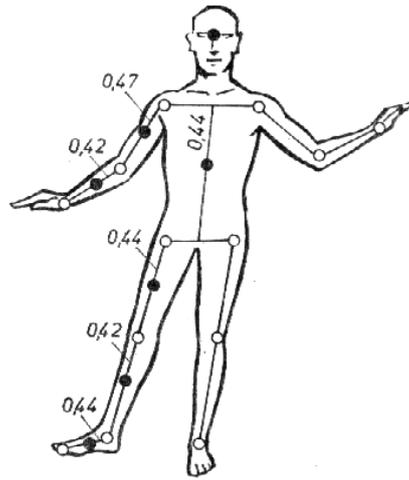


Abbildung 2.11: Teilschwerpunkte (schwarz), Schwerpunktradien und deren Bezugspunkte (weiß) nach Fischer (Hochmuth, 1981, S. 117)

Tabelle 2.2: Relative Schwerpunktradien der Teilschwerpunkte einzelner Gliedmaßen in Bezug auf die Gliederlänge.

Quelle Körperteil	Fischer, nach Hochmuth, 1981		de Leva, 1996		
	relativer Radius	Bezugspunkt	relativer Radius		Startpunkt/ Endpunkt
			Mann	Frau	
Kopf	/	Hinter Türkensattel des Keilbeins	0,5976	0,5894	Vertex / Gonionquerachse
Rumpf	0,44	Schultergelenkquerachse	0,5138	0,4964	7. Halswirbel/ Hüftgelenkquerachse
Oberschenkel	0,44	Hüftgelenkquerachse	0,4095	0,3612	Hüftgelenkzentrum/ Kniegelenkzentrum
Unterschenkel	0,42	Kniegelenk	0,4459	0,4416	Kniegelenkzentrum/ Außenknöchel
Fuß	0,44	Fußgelenk	0,4415	0,4014	Ferse/ längste Zehenspitze
Oberarm	0,47	Schultergelenk	0,5772	0,5754	Schultergelenkzentrum/ Ellenbogengelenkzentrum
Unterarm	0,42	Ellenbogengelenk	0,4574	0,4559	Ellenbogengelenkzentrum/ Handgelenkzentrum
Hand	/	Mitte	0,3624	0,3427	Handgelenkzentrum/ Spitze Mittelfinger

Die Daten von de Leva (1996) für Teilmassen und Schwerpunktradien tragen auch zur Erklärung der eingangs erwähnten unterschiedlichen Lagen des KSP bei Männern und Frauen bei.

Mittels der Daten für die Teilmassen und Teilschwerpunkte lässt sich nun die Lage des KSP für verschiedene Körperhaltungen bestimmen. Beispielhaft ist dies in Abbildung 2.12 mit den Werten nach Fischer geschehen.

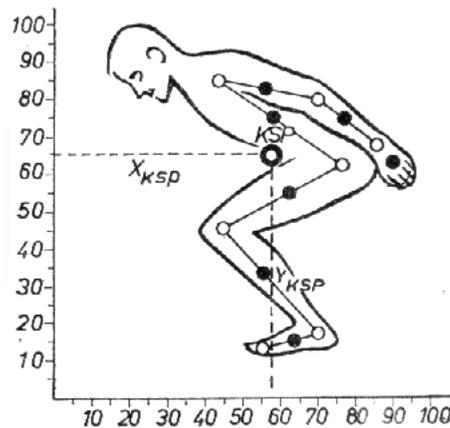


Abbildung 2.12: Analytische Bestimmung des KSP mit den Werten nach Fischer. Die schwarzen Punkte bezeichnen die Teilschwerpunkte der Gliedmaßen (Hochmuth, 1981, S. 117).

In einer Variante des analytischen Verfahrens nach Dickwach (1967) wird nicht die Lage der Teilschwerpunkte, sondern die leichter zu bestimmende Lage der Gelenke verwendet. Dazu werden die anteiligen relativen Massen für die Gelenkpunkte benötigt. Diese können mit den Werten aus Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 bestimmt werden. Dazu wird die im Schwerpunkt des Körperteils angreifende Kraft durch zwei in den Gelenkmittelpunkten angreifende Kräfte ersetzt (vgl. Abbildung 2.13). Aus den Teilkräften der angrenzenden Körperteile kann dann für jedes Gelenk auf die relative Masse des Gelenkpunktes geschlossen werden. Im Folgenden werden die Berechnungen beispielhaft am Oberschenkel mit den Werten nach Fischer durchgeführt.

Das Gewicht des Oberschenkels wird entsprechend dem durch den Schwerpunktradius gegebenen Teilungsverhältnis auf Knie- und Hüftgelenk aufgeteilt (Hebelgesetz): Für die Gewichte von Hüftgelenk $G_{OS,H}$ und Kniegelenk $G_{OS,K}$, die aus dem Gewicht des Oberschenkels G_{OS} resultieren, gilt (vgl. Abbildung 2.13):

$$G_{OS,H} = G_{OS} \cdot \frac{a}{l} \approx 0,12 G \cdot 0,56 \approx 0,07 G$$

$$G_{OS,K} = G_{OS} \cdot \frac{b}{l} \approx 0,12 G \cdot 0,44 \approx 0,05 G$$

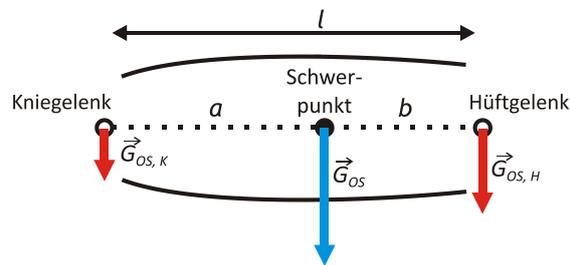


Abbildung 2.13: Über den Schwerpunktradius b können die aus dem Gewicht des Oberschenkels herrührenden Teilgewichte von Hüft- und Kniegelenk berechnet werden.

Somit sind die relativen Massen, die als Anteil des Oberschenkels im Hüftgelenk und im Kniegelenk angenommen werden können, $m_{rel,OS/H} = 0,067$ und $m_{rel,OS/K} = 0,053$. Hinzu kommt jeweils noch die anteilige relative Masse des Rumpfes bzw. des Unterschenkels. Die sich schließlich ergebenden relativen Massen an den Gelenkpunkten sind in Tabelle 2.3 dargestellt. Bei Kopf, Füßen und Händen werden die relativen Massen weiterhin den jeweiligen Schwerpunkten zugeordnet (Dickwach, 1967; Willimczik, 1989; Hochmuth, 1981).

Tabelle 2.3: Relative Massen für die einzelnen Gelenkpunkte. Die Werte beruhen auf den Daten nach Fischer (mod. nach Dickwach, 1967, S. 1110).

Gelenk	Relative Masse	Gelenk	Relative Masse
Kopf	0,07	Hüftgelenk	0,162
Hand	0,01	Kniegelenk	0,082
Handgelenk	0,008	Fußgelenk	0,021
Ellenbogengelenk	0,026	Fuß	0,02
Schultergelenk	0,136		

Für die analytische Methode lassen sich mehrere Vorteile anführen. Zum einen muss der Proband nicht zur Verfügung stehen und der Arbeitsaufwand ist geringer. Weiterhin können auch Körperhaltungen, die nur unzureichend nachzustellen sind, ausgewertet werden. Schließlich ist dieses Verfahren effizienter, wenn eine größere Anzahl von Körperhaltungen, beispielsweise bei Bewegungsabläufen, untersucht werden sollen. Nachteilig wirkt sich die Un-

genauigkeit der Methode aufgrund der nicht individuellen und sportartunspezifischen Daten aus (Baumann, 1989; Dickwach, 1967).

2.7 Gleichgewicht und Stabilität

2.7.1 Gleichgewicht

Ein starrer Körper befindet sich im statischen Gleichgewicht, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind. Zum einen muss die Summe aller auf den Körper wirkenden Kräfte null ergeben:

$$\sum_i \vec{F}_i = 0 \quad (2.47)$$

Zum anderen muss die Summe der auf den Körper wirkenden Drehmomente ebenfalls null ergeben:

$$\sum_i \vec{D}_i = 0 \quad (2.48)$$

Diese beiden Bedingungen sind zusammen sowohl notwendig als auch hinreichend (Machold, 2005).

Es lassen sich drei Arten des Gleichgewichts von starren Körpern unterscheiden: das stabile Gleichgewicht, das labile Gleichgewicht und das indifferente Gleichgewicht. Die Unterscheidung bezieht sich auf das Verhalten des Körpers, wenn er geringfügig aus der Gleichgewichtslage ausgelenkt wird (Giancoli, 2006; Wick, 2005). In Abbildung 2.14 werden die Gleichgewichtsarten beispielhaft für verschiedene Lagen einer Kugel dargestellt. Auf die Kugeln wirkt die senkrecht nach unten gerichtete Gewichtskraft ein.

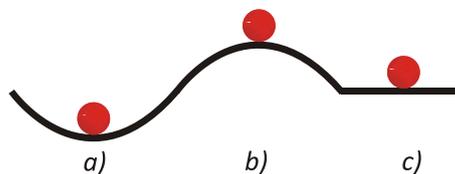


Abbildung 2.14: Darstellung der Gleichgewichtsarten. Alle drei Kugeln befinden sich in einer Gleichgewichtslage. Kugel a) befindet sich im stabilen Gleichgewicht, Kugel b) im labilen Gleichgewicht und Kugel c) im indifferenten Gleichgewicht.

Im stabilen Gleichgewicht kehrt der Körper nach einer leichten Auslenkung in die Ausgangslage zurück. Im Beispiel mit den Kugeln bedeutet dies, dass Kugel a) nach einer geringen Auslenkung wieder an die tiefste Position rollen wird. Eine Auslenkung bewirkt hier eine Erhöhung des Schwerpunktes der Kugel. Durch die Zunahme ihrer potenziellen Energie ergibt sich nach Gleichung (2.23) eine rückstellende Kraft, welche die Kugel zurück zum Minimum der potenziellen Energie bewegt.

Im labilen Gleichgewicht bewegt sich ein Körper nach einer Auslenkung nicht in die Ausgangslage zurück, sondern entfernt sich noch weiter von dieser. Egal, ob im Beispiel die Kugel b) nach links oder rechts ausgelenkt wird, wird ihr Schwerpunkt erniedrigt. Ihre potenzielle Energie verringert sich. Nach Gleichung (2.23) ergibt sich eine Kraft, welche die Kugel weiter von ihrer Ausgangslage weg bewegt.

Im indifferenten Gleichgewicht wird das Gleichgewicht beibehalten und der Körper verharrt am neuen Ort. Für Kugel c) ergibt sich bei einer kleinen Auslenkung keine Kraft wie für die Kugeln a) und b). Sie wird am neuen Ort liegen bleiben bzw. unter Vernachlässigung der Reibung weiter rollen (Giancoli, 2006; Mathelitsch & Thaller, 2008; Wick, 2005).

Auf Grundlage dieser Überlegungen lässt sich eine weitere experimentelle Methode zur Bestimmung des Schwerpunktes eines Körpers angeben. Dazu wird der Körper wie in Abbildung 2.15 an einem Punkt aufgehängt. Der Körper wird ein stabiles Gleichgewicht einnehmen.

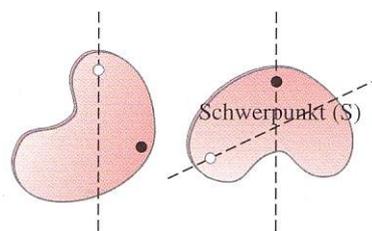


Abbildung 2.15: Ermittlung des Schwerpunktes durch mehrere Aufhängungen (Giancoli, 2006, S. 300).

Dabei befindet sich der Schwerpunkt des Körpers in der tiefst möglichen Lage, also vertikal unter der Aufhängung. Zeichnet man diese vertikalen Linien bzw. Lote für mehrere Aufhängepunkte, deren Lote nicht in einer Ebene liegen, ein,

so zeigt der Schnittpunkt dieser Linien den Schwerpunkt an. Bei einem Körper mit einer Symmetrieebene wie in der Abbildung genügen zur Schwerpunktbestimmung zwei Aufhängungen, ansonsten sind mindestens drei Aufhängungen notwendig (Giancoli, 2006; Machold, 2005).

2.7.2 Stabilität

Ein starrer Körper, dessen Schwerpunkt unterhalb seiner Auflagepunkte ist, befindet sich in der Regel in einem stabilen Gleichgewicht (Mathelitsch, 1994; Giancoli, 2006). Liegt der Schwerpunkt eines starren Körpers oberhalb seiner Auflagepunkte, ist eine differenziertere Betrachtung notwendig.

Hierbei spielt der Begriff der Unterstützungsfläche eine wichtige Rolle. Die Unterstützungsfläche bezeichnet die Fläche, welche von den äußeren Auflagepunkten des Körpers begrenzt wird (McGinnis, 2005).

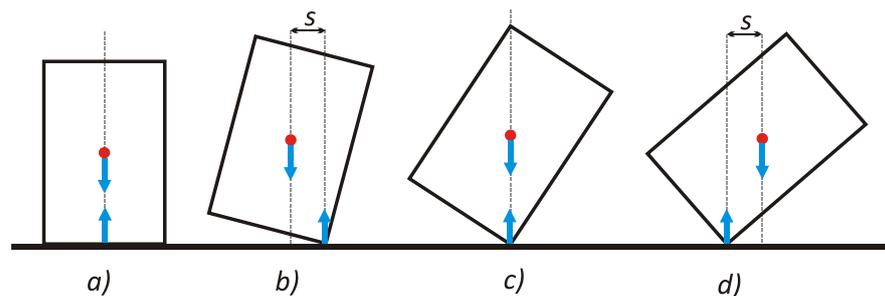


Abbildung 2.16: Ein starrer Körper während des Kippens. a) Der Körper befindet sich im stabilen Gleichgewicht. b) Durch leichtes Kippen entsteht ein Drehmoment. Der Körper wird in seine Ausgangslage zurückfallen (metastabiles Gleichgewicht). c) Der Schwerpunkt liegt lotrecht über der Kippkante. Der Körper befindet sich in einem labilen Gleichgewicht. d) Aufgrund eines Drehmoments wird der Körper umkippen.

Damit sich ein ruhender Körper im stabilen Gleichgewicht befindet, muss sich sein Schwerpunkt lotrecht über der Unterstützungsfläche mit Ausnahme der Kanten befinden. Der Vektor der Gewichtskraft verläuft dann durch die Unterstützungsfläche. Nur innerhalb der Unterstützungsfläche wird eine nach oben wirkende Normalkraft, welche die Gewichtskraft ausgleicht, auf den Körper

ausgeübt. Wird der Körper gekippt, liegt das Lot des Schwerpunktes außerhalb der Unterstützungsfläche und es kommt zu einem Drehmoment:

$$D = G \cdot s \quad (2.49)$$

G bezeichnet die Gewichtskraft des Körpers und s den horizontalen Abstand vom Schwerpunkt zur Kippkante. Je nachdem auf welcher Seite der Kippkante sich das Lot des Schwerpunktes befindet, wird der Körper in seine Ausgangslage zurückkippen oder umkippen. Ist der Schwerpunkt genau über der Kante, liegt ein labiles Gleichgewicht vor. Bei einem geringen Anstoß kippt der Körper zu einer Seite in ein stabiles Gleichgewicht (Hochmuth, 1981; Donskoi, 1975; Giancoli, 2006).

Nach Donskoi (1975) können die Zustände des Körpers, für die ein Drehmoment den Körper in seine Ausgangslage zurückkippen lässt (Abbildung 2.16, c), als ein metastabiles Gleichgewicht bezeichnet werden. Der Körper befindet sich nicht in einem stabilen Gleichgewicht, wird aber ohne weitere Einwirkungen in dieses zurückkippen.

Um die Standfestigkeit eines Körpers zu beurteilen, muss also die Größe der Unterstützungsfläche betrachtet werden. Neben der Entfernung des Schwerpunktes zum Rand der Unterstützungsfläche spielt auch die Höhe des Schwerpunktes über der Unterstützungsfläche eine Rolle (Wick, 2005).

Für die Standfestigkeit lassen sich nach Hochmuth (1981) drei verschiedene Maße angeben:

- das geometrische Maß
- das energetische Maß
- das dynamische Maß

Diese werden in Abbildung 2.17 veranschaulicht.

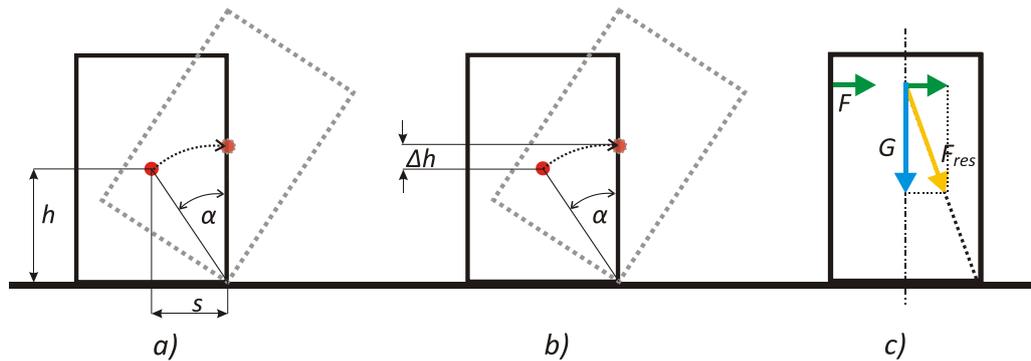


Abbildung 2.17: Die drei Maße für Standfestigkeit. a) Für das geometrische Maß ist der Kippwinkel maßgeblich. b) Das energetische Maß richtet sich nach der Höhendifferenz der Schwerpunktlagen. c) Für das dynamische Maß wird die resultierende Kraft betrachtet (mod. nach Wick, 2005, S. 66f).

Unter dem geometrischen Maß ist der Winkel zu verstehen, um den der Körper gekippt werden muss, bis sich sein Schwerpunkt lotrecht über der Kippkante befindet. Dieser Winkel wird als Kippwinkel bezeichnet. Der Kippwinkel bezeichnet also genau die Position des labilen Gleichgewichts. Bestimmt werden kann der Kippwinkel mithilfe der senkrechten Schwerpunkthöhe h und dem waagrechten Abstand s zur Kippkante:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{s}{h}\right) \quad (2.50)$$

Ein großer Kippwinkel bedeutet eine hohe Standfestigkeit. Diese ergibt sich folglich durch einen großen Abstand zur Kippkante und eine tiefe Schwerpunktlage.

Das energetische Maß bezieht sich auf die Hubhöhe des Schwerpunktes. Die Hubhöhe wird dabei von der Ausgangslage des Schwerpunktes bis zum Erreichen des Kippwinkels gemessen. Je größer die Höhendifferenz ist, desto mehr Arbeit muss zum Kippen des Körpers aufgewendet werden und umso standfester ist der Körper. Liegt der Schwerpunkt über der Grenze der Unterstützungsfläche, liegt beim Kippen die maximale Höhendifferenz und somit die maximale potenzielle Energie des Schwerpunktes vor.

Wirkt auf den Körper eine seitliche Kraft F , ergibt sich mit der Gewichtskraft G des Körpers eine resultierende Kraft F_{res} . Nach dem dynamischen Maß bleibt der Körper solange im Gleichgewicht, wie die resultierende Kraft durch die

Unterstützungsfläche geht. Ein Körper kippt also umso eher bei einer bestimmten seitlichen Krafteinwirkung, je höher der Angriffspunkt der Kraft liegt, je kleiner die Unterstützungsfläche ist und je geringer seine Masse ist (Hochmuth, 1981; Wick, 2005).

2.7.3 Gleichgewicht beim Menschen

Für das Gleichgewicht des Menschen gelten prinzipiell die zuvor dargelegten Zusammenhänge. Es muss jedoch bedacht werden, dass der Mensch kein starrer Körper ist. Der Mensch kann sein Gleichgewicht nicht nur beibehalten, sondern es selbst aktiv durch Gelenkbewegungen und Haltungsänderungen wiederherstellen. Insbesondere in den Grenzlagen des Gleichgewichts kommt es durch Haltungsänderungen zu wesentlichen Unterschieden zu einem starren Körper (Donskoi, 1975). „Der Unterschied des Gleichgewichts biomechanischer Systeme zum Gleichgewicht fester physikalischer Körper besteht nicht im Vorhandensein besonderer Gesetze der Mechanik für lebende Systeme, sondern in ihrer komplizierten Nutzung aufgrund der Besonderheiten der lebenden Systeme“ (Donskoi, 1975, S. 193).

Auch beim Menschen muss sich der KSP lotrecht über der Unterstützungsfläche befinden, damit er sich in einem stabilen Gleichgewicht befindet (Wick, 2005). Die Unterstützungsfläche stellt sich je nach Körperhaltung und dem Einsatz zusätzlicher Stützen unterschiedlich dar (s. Abbildung 2.18).

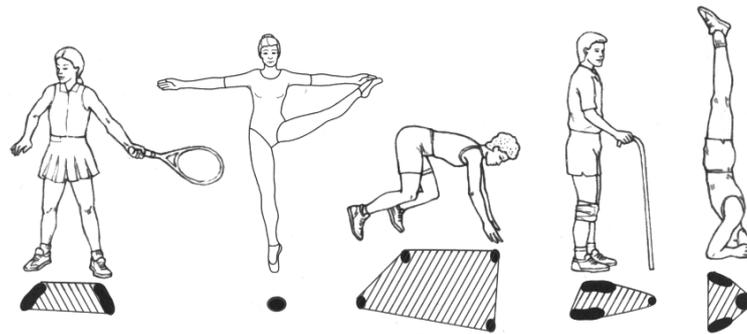


Abbildung 2.18: Die Unterstützungsfläche (schraffiert) variiert in Form und Größe je nach Körperhaltung und eventuell eingesetzten Hilfsmitteln (mod. nach McGinnis, 2005, S. 138).

Durch einen Stock kann die Unterstützungsfläche gegenüber dem normalen Stand schon vergrößert werden. Werden zusätzlich die Hände als Stütze verwendet, ergibt sich eine große Unterstützungsfläche. Der Stand auf einem Bein bietet als Unterstützungsfläche praktisch nur die Auflagefläche des Fußes. Je nach Größe der Unterstützungsfläche variiert die Stabilität der jeweiligen Körperhaltung. In die Richtung, in die die Unterstützungsfläche vergrößert bzw. verkleinert wird, vergrößert bzw. verkleinert sich auch die Stabilität der Körperhaltung. Der KSP muss eine längere bzw. kürzere Strecke zurücklegen, bis er sich nicht mehr lotrecht über der Unterstützungsfläche befindet (McGinnis, 2005). Dies steht mit den zuvor dargelegten Ausführungen zur Standfestigkeit im Einklang. Durch die Veränderung dieser Strecke wird der Kippwinkel, also das geometrische Maß der Standfestigkeit, entsprechend verändert.

Bei der Betrachtung der Unterstützungsfläche muss berücksichtigt werden, dass nicht zwangsläufig die gesamte Auflagefläche zur Unterstützungsfläche gezählt werden kann. Weiches Gewebe oder schwache Glieder wie die Fußzehen können in der Regel nicht zur Unterstützungsfläche gezählt werden, da sie Belastungen nicht ausgleichen können. Die effektive Unterstützungsfläche ist also für den Menschen kleiner als die durch die Auflagepunkte begrenzte Fläche (Donskoi, 1975).

Wie zuvor erwähnt, kann der Mensch sein Gleichgewicht bei Störungen bis zu einem gewissen Grad selbst wiederherstellen. Durch die Bewegung von Körpergliedern können gleichgewichtsstörende Kräfte ausgeglichen werden. Die-

se Wiederherstellungsbewegungen bringen entweder den KSP über die Unterstü­tzungsfläche, die Unterstü­tzungsfläche unter den KSP oder beides zugleich. Der Erfolg von Wiederherstellungsbewegungen wird auch vom kör­perlichen Trainingszustand beeinflusst. Eine Wiederherstellungsbewegung ruft häufig auch eine entgegengesetzte Abweichung hervor. Solche Hyperkorrekturen erfordern eine erneute Wiederherstellung der Gleichgewichtslage. Diese Korrekturen können wiederum auch einer Korrektur bedürfen. Eine sol­che Reihe von abklingenden Schwankungen führt zum Balancieren (Donskoi, 1975).

Schon beim Stand handelt es sich nicht um einen statischen Zustand. Der Stand ist von ständigen Schwingungen des Körpers begleitet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Stand nach vorne und hinten labil ist. Da das gesamte Körpergewicht im Fußgelenk gehalten wird, ist der Mensch in dieser Hal­tung mit einem invertierten Pendel vergleichbar (Rodewald, 1992).

Abbildung 2.19 veranschaulicht den Ablauf von Ausgleichsbewegungen wäh­rend des aufrechten Standes.

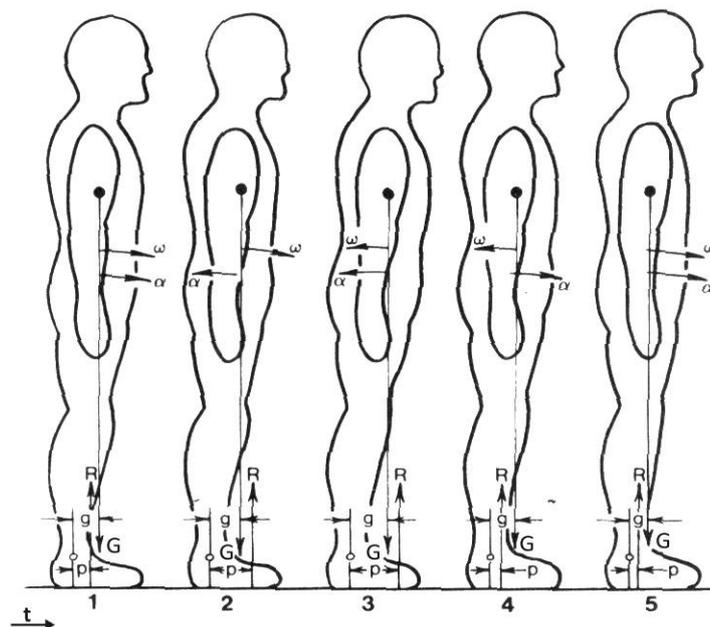


Abbildung 2.19: Das Zustandekommen von Schwingungsbewegungen während des Stehens (mod. nach Winter, S. 107).

Der Druckmittelpunkt bezeichnet den Angriffspunkt der vertikalen Bodenreaktionskraft. Er stellt einen gewichteten Mittelpunkt aller Drücke, die in der Auf-

lagefläche wirken. Seine Lage ist unabhängig von der auf den Boden projizierten Lage des KSP. Die Lage hängt von der Fußhaltung und der Muskelsteuerung im Fußgelenk ab. Aus einer seitlichen Sichtweise kann der Druckmittelpunkt also vor oder hinter der Projektion des KSP liegen. In Abbildung 2.19 ist die Gewichtskraft G und die Bodenreaktionskraft R dargestellt. Beide sind vom Betrag her gleich. Die Pfeile in der Abbildung sind nicht als Vektoren zu verstehen. Zu Zeitpunkt 1 der Abbildung 2.19 ist zu erkennen, dass der KSP rechts vor dem Druckmittelpunkt liegt. Der KSP hat einen horizontalen Abstand zum Fußgelenk von g und der Druckmittelpunkt von p . Somit entstehen zwei unterschiedlich große Drehmomente: $G \cdot g > R \cdot p$. Es kommt zu einer Winkelbeschleunigung α im Uhrzeigersinn und einer entsprechenden Winkelgeschwindigkeit ω . Als Ausgleichsbewegung erfolgt eine Bewegung im Fußgelenk, die ein Drücken der Fußballen nach unten bewirkt. Dabei wandert jedoch der Druckmittelpunkt vor das Lot des KSP, so dass gilt: $G \cdot g < R \cdot p$. Es entsteht eine Winkelbeschleunigung entgegen dem Uhrzeigersinn, die zur Abnahme der Winkelgeschwindigkeit und schließlich zu einer entgegengesetzten Winkelgeschwindigkeit führt (Zeitpunkte 2 und 3). Die Bewegung im Fußgelenk wird zurück genommen. Die Relation der Drehmomente wechselt wieder (Zeitpunkt 4) und es kommt zu einem beständigen Schwanken (Winter, 2005; Winter, 1995).

Weitere Konzepte von Ausgleichsbewegungen werden besonders beim Balancieren auf einem Schwebebalken deutlich.

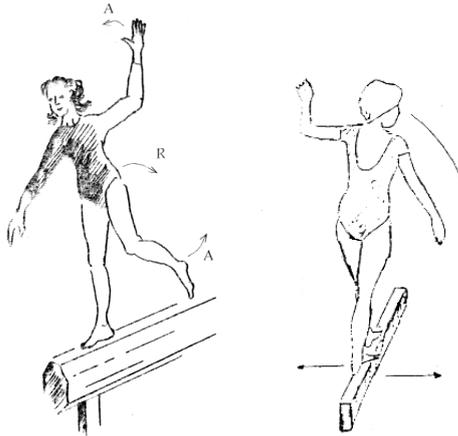


Abbildung 2.20: Ausgleichsbewegungen auf dem Schwebebalken (links: Rodewald, 1992, S. 24; rechts: Mathelitsch, 1994, S. 29).

Droht beim Balancieren auf dem Schwebebalken ein Fallen nach rechts, wird das linke Bein gestreckt nach oben bewegt. Eventuell wird diese Bewegung auch noch durch den linken Arm unterstützt. Aufgrund der Kontraktion der Muskeln zwischen Oberschenkel und Hüfte entsteht am Körper eine Kraft, die nach links wirkt und so den Körper stabilisiert (Abbildung 2.20, links). Eine weitere mögliche Ausgleichsbewegung bei Verlust des Gleichgewichts nach rechts besteht darin, den Oberkörper nach rechts zu bewegen. Da der Gesamtdrehimpuls erhalten bleibt, müsste sich der untere Teil des Körpers ebenfalls nach rechts bewegen. Der Balken verhindert dies und übt eine horizontale Reaktionskraft nach links aus. Diese Kraft kann über eine möglichst steife Bein- und Hüftpartie zum Aufrichten des Körpers genutzt werden (Abbildung 2.20, rechts). Auch beim normalen Gehen kommt es ständig zu ähnlichen Ausgleichsbewegungen. Die Bewegungen der Beine erzeugen Störungen, die durch andere Körperbewegungen ausgeglichen werden. Hierbei spielen ebenfalls die Arme und Schultern eine große Rolle (Rodewald, 1992; Mathelitsch, 1994).

3 Material und Methoden

Für die Untersuchung physikalischer Konzepte, die im Kontext Judo Anwendung finden, wurden verschiedene Geräte und Computerprogramme eingesetzt. Neben Digitalkameras für Foto- und Videoaufnahmen kamen auch Kraftmessplatten zum Einsatz. Ebenso wurden verschiedene Programme zur Auswertung genutzt. Ein Teil dieser Programme soll auch im Schülerlabor zum Einsatz kommen. Für das Schülerlabor wurden zusätzlich verschiedene Simulationen erstellt. Im Folgenden werden die verwendeten Geräte und Programme vorgestellt sowie die erstellten Dateien beschrieben.

3.1 Digitalkameras und Aufnahmen

Zur Aufnahme der Fotografien und Videos kommen zwei verschiedene Digitalkameras zum Einsatz. Bei der einen Kamera handelt es sich um eine Ixus 50 von Canon. Diese Kamera nimmt Videos in einer Auflösung von 640×480 Pixeln und mit 30 Bildern in der Sekunde auf. Die zweite Kamera ist eine Casio Exilim FX1. Sie ermöglicht Videoaufnahmen mit einer identischen Auflösung und Bildrate. Die FX1 kann jedoch auch Videos mit 300 Bildern in der Sekunde, aber einer geringeren Auflösung von 512×384 Pixeln, aufnehmen. Mit der größeren Bildrate können auch schnelle Bewegungen deutlich dargestellt werden. In Verbindung mit Videoanalyse und Datenerfassung ist diese Bildrate weniger geeignet. In der Auswertung werden durch Abweichungen von wenigen Pixeln schon deutlich zu große Werte für Geschwindigkeiten und Beschleunigungen erzielt. Auch in Kombination mit der Erfassung von Messdaten ist diese Bildrate nicht notwendig, da die Daten der Sensoren mit den eingesetzten Programmen nur mit einer deutlich geringeren Rate ausgelesen werden können.

Um für eine spätere Auswertung gut geeignete Aufnahmen zu erhalten, müssen mehrere Punkte beachtet werden. Neben einem möglichst detailarmen Hintergrund, der einen ausreichenden Kontrast zu den abgebildeten Motiven bietet, sollte auf eine gleichmäßige, helle Ausleuchtung geachtet werden.

Auch sollte sich ein Gegenstand auf dem Bild befinden, der als Maßstab zur Umrechnung der Längen dienen kann. Bei einer späteren Streckenbestimmung können Fehler durch Verzerrungen auftreten. Um diese zu minimieren ist es erforderlich, dass sich die aufgenommenen Bewegungen senkrecht und möglichst mittig zur optischen Achse des Beobachters abspielen. Aus dem gleichen Grund ist ein Kompromiss zwischen der Größe des Motivs und der Kameraentfernung zu finden. Weiterhin hilft die Markierung der zu beobachtenden Motive bei der Auswertung. Als Markierungsfarben eignen sich besonders gut Neonfarben. Selbstverständlich sollte die Kamera, insbesondere bei Videoaufnahmen, still stehen und nicht der Bewegung folgen. Es empfiehlt sich die Verwendung eines Stativs (Benz, 2008; Nordmeier, 2002).

Bei den folgenden Auswertungen der Foto- und Videoaufnahmen zeigt die positive x-Achse in der Bildebene nach rechts und die y-Achse nach oben. Die Aufnahmen sind so gewählt, dass die Blick- bzw. Bewegungsrichtung, soweit sinnvoll, in positiver x-Richtung verläuft. Falls es nicht anders angegeben ist, wird als Koordinatenursprung die linke, untere Bildecke gewählt.

3.2 Dynamische Mathematiksoftware

Im Rahmen dieser Arbeit wird an mehreren Stellen auf eine dynamische Mathematiksoftware zurückgegriffen. Bei der Software handelt es sich um Geogebra in der Version 3.2.44.0. Die von Markus Hohewarter entwickelte Software kann in der aktuellen Version kostenlos für nicht kommerzielle Zwecke von der Internetseite <http://www.geogebra.org/cms/de/installers> (Stand: 14.09.2010) heruntergeladen werden.

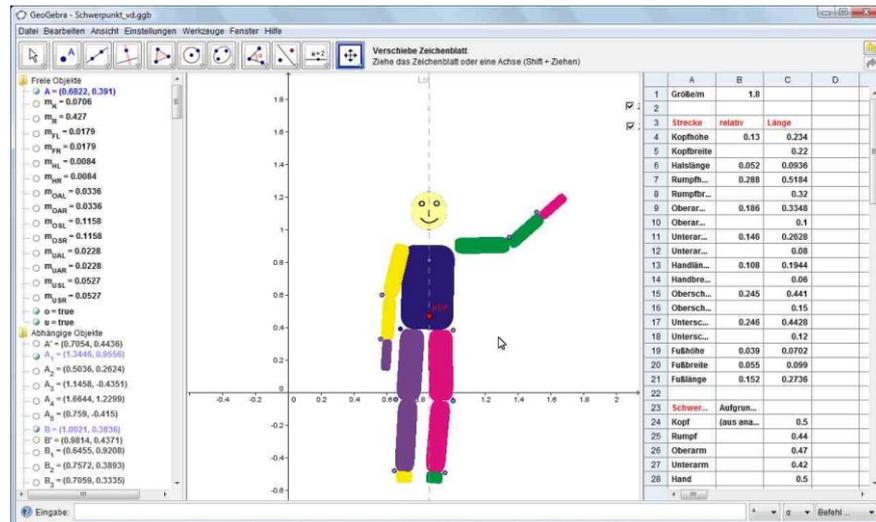


Abbildung 3.1: Eine geöffnete Geogebra-Datei mit eingeblendetem Algebrafenster (links) und Tabellenblatt (rechts).

Geogebra verknüpft Geometrie, Algebra und Analysis in einem Programm. Es können Objekte sowohl über geometrische Konstruktionen als auch über algebraische bzw. analytische Eingaben erstellt werden. Diese beiden Eingabetypen sind dabei dynamisch miteinander verknüpft. Eine Änderung in der algebraischen Eingabe verändert entsprechend die geometrische Eingabe und umgekehrt. Die Benutzeroberfläche von Geogebra (Abbildung 3.1) besteht aus einem Grafikfenster mit einer Menü- und einer Werkzeugleiste am oberen Rand. Optional können ein Algebrafenster und ein Tabellenblatt eingeblendet werden. Das Tabellenblatt bietet grundlegende Funktionen einer Tabellenkalkulation. Die Eingabe erfolgt entweder über die Werkzeugleiste direkt im Grafikfenster oder für algebraische bzw. analytische Ausdrücke in der Eingabezeile am unteren Rand (Hohenwarter & Hohenwarter, 2009).

Im Anschluss folgt nun eine Vorstellung der in Geogebra erstellten Dateien. Dabei wird sowohl auf die Erstellung als auch die Anwendung der jeweiligen Datei eingegangen.

Analytische Schwerpunktbestimmung nach Dickwach (1967)

Die Geogebra-Datei ‚KSP_analyt_Dickwach.ggb‘ (CD01) enthält mehrere freie Punkte (blau), die beliebig im Grafikfenster verschoben werden können. Jeder dieser freien Punkte steht für ein Gelenkpunkt bzw. Körperteilschwerpunkt.

Die verwendeten Abkürzungen können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 3.1: In Geogebra verwendete Abkürzungen für die Punkte bei der analytischen Schwerpunktbestimmung nach Dickwach (1967).

Abkürzung	Gelenk bzw. Körperteil	Abkürzung	Gelenk bzw. Körperteil
K	Kopf	HüG	Hüftgelenk
SG	Schultergelenk	KG	Kniegelenk
EG	Ellenbogengelenk	FG	Fußgelenk
HaG	Handgelenk	F	Fuß
H	Hand		

Bis auf den Punkt für den Kopf kommen alle Punkte in doppelter Ausführung für beide Körperseiten vor. Sie sind durch einen Index gekennzeichnet. Desweiteren gibt es einen roten Punkt ‚KSP‘, der nicht frei beweglich ist. Dieser Punkt wird aus den Koordinaten der übrigen Punkte und den entsprechenden relativen Massen m_{xx} aus Tabelle 2.3 bestimmt:

$$\begin{aligned}
 KSP = & K \cdot m_K + \sum_{i=1}^2 SG_i \cdot m_{SG} + \sum_{i=1}^2 EG_i \cdot m_{EG} \\
 & + \sum_{i=1}^2 HaG_i \cdot m_{HaG} + \sum_{i=1}^2 H_i \cdot m_H \\
 & + \sum_{i=1}^2 F_i \cdot m_F + \sum_{i=1}^2 FG_i \cdot m_{FG} \\
 & + \sum_{i=1}^2 KG_i \cdot m_{KG} + \sum_{i=1}^2 HüG_i \cdot m_{HüG} \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

Wenn nun im Grafikfenster eine Fotografie mit einer Person in einer bestimmten Körperhaltung eingefügt wird (Werkzeugleiste, vorletzte Kategorie), können die freien Punkte auf die Gelenke bzw. Mittelpunkte der entsprechenden Körperteile gezogen werden. Da m_{xx} für die relativen Massen der Körperteile steht, bezeichnet der Punkt ‚KSP‘ dann die Lage des KSP der abgebildeten Person gemäß Gleichung (2.33).

Diese Bestimmung der Lage des KSP ist natürlich nicht sehr exakt, da zum einen schon in der Methode nach Dickwach (1967) Näherungen und Verallgemeinerungen vorgenommen wurden und zum anderen durch die manuelle Lagebestimmung der freien Punkte eine gewisse Ungenauigkeit entsteht. Ins-

gesamt ist aber eine für diese Arbeit ausreichend genaue Lagebestimmung des KSP möglich.

Interaktive Simulationen zur Lage des KSP

In Geogebra wurden mehrere Simulationen (CD02 bis CD06) zur Lage des KSP erstellt. In diesen wird für ein menschliches Modell die Lage des KSP durch einen roten Punkt angegeben (vgl. Abbildung 3.1). Die Simulationen unterscheiden sich in der Ansicht und in ihrem Detailgrad. Es gibt eine frontale und eine seitliche Ansicht. Die detaillierteren Simulationen unterscheiden zwischen Oberarm, Unterarm und Hand sowie Oberschenkel und Unterschenkel. Dies ist bei den vereinfachten Simulationen nicht der Fall.

In allen Simulationen sind die Positionen der einzelnen Gliedmaßen beweglich. Sie können durch Bewegungen der blauen Punkte verschoben werden. Die Beweglichkeit orientiert sich dabei an anatomischen Gegebenheiten und der zweidimensionalen Beschränkung der Simulationen.

Ändert sich die Position von Gliedmaßen, wird auch die Lage des KSP angepasst. Die Lage der Hände und Füße spielt für die Lage des KSP aufgrund ihrer geringen relativen Masse keine große Rolle (vgl. Abschnitt 4.1.2). Zur Verringerung der Komplexität und der besseren Übersichtlichkeit wegen sind daher die Hände und die Füße unbeweglich angelegt. Lediglich in der detaillierten Seitenansicht können die Füße bewegt werden, da dies bei Fragen der Unterstützungsfläche relevant ist.

Die einzelnen Gliedmaßen werden durch geometrisch konstruierte Rechtecke dargestellt. So bleiben auch bei Positionsänderungen die Größen und Lagebeziehungen der einzelnen Gliedmaßen erhalten. Das detaillierte Vorgehen bei der Konstruktion kann der in Geogebra implementierten Konstruktionsbeschreibung entnommen werden. Für die Maße der Gliedmaßen wurde auf die Durchschnittswerte aus Abbildung 3.2 zurückgegriffen.

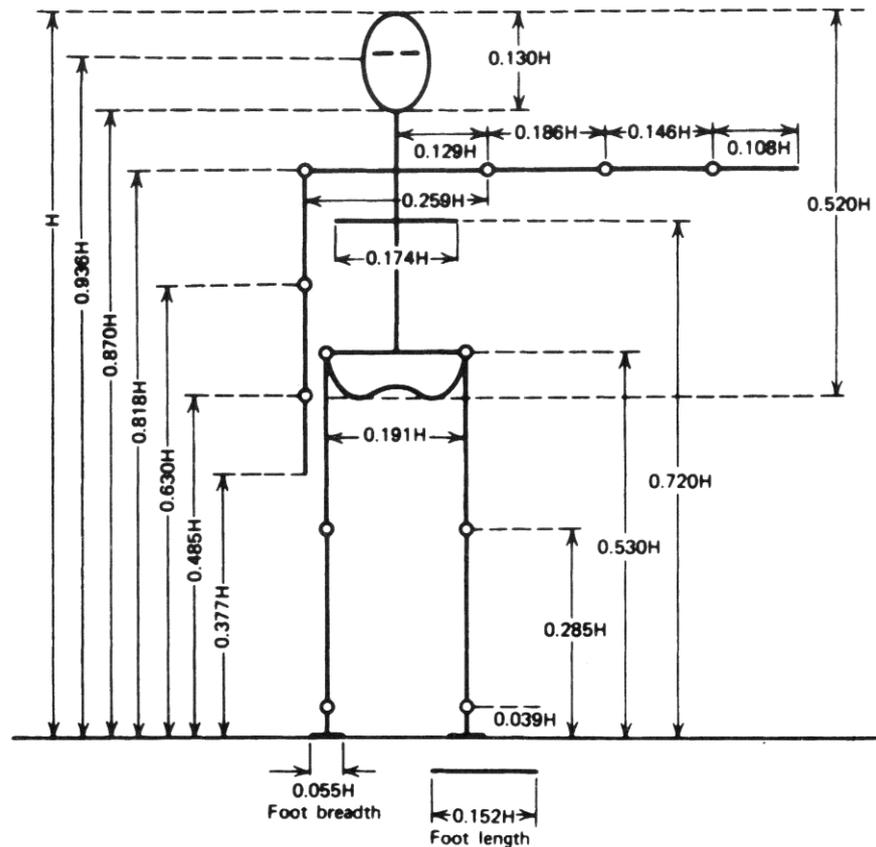


Abbildung 3.2: Abmessungen des menschlichen Körpers in Relation zur Körpergröße (Winter, 2005, S. 60).

Die Breite der Gliedmaßen ist ein sehr individueller Wert. Da jedoch die Lage der Teilschwerpunkte auf den Längsachsen der Gliedmaßen angenommen werden, hat sie auf die Lage des KSP nur einen untergeordneten Einfluss. Für die Gliedmaßen in den Simulationen wurden passende Breiten abgeschätzt. Die Werte für die Breiten lassen sich aber wie alle Werte in den Simulationen auch noch nachträglich über die Algebra- bzw. Tabellenansicht verändern. Die relativen Schwerpunktradien sind diejenigen nach Fischer (Tabelle 2.2). Da sich die Werte nach Fischer auf Gelenkpunkte beziehen, lassen sie sich besser in der Simulation umsetzen. Eine Ausnahme bildet der Kopf. Da hier die Lage des Schwerpunktes anatomisch angegeben wird, ist eine exakte Umsetzung in den Simulationen nicht möglich. Aus diesem Grund wird angenommen, dass der Schwerpunkt des Kopfes in der Kopfmitte liegt. Bei den vereinfachenden Simulationen werden die Schwerpunktradien für Beine und Arme aus den Daten für Oberarm und Unterarm bzw. Oberschenkel und Unterschenkel berechnet. Die Schwerpunkte der Hände liegen mittig am Ende der Arme.

Die Berechnung der Lage des KSP erfolgt über die analytische Methode aus den Koordinaten der Schwerpunkte der Gliedmaßen und den relativen Massen. Die Formel ist analog zu Gleichung (3.1). Entsprechend zu den Schwerpunktradien werden für die relativen Massen die Werte nach Fischer aus Tabelle 2.1 verwendet.

Eine der Simulationen (CD06) ermöglicht es, eine zusätzliche variable Masse am Arm des Modells zu bewegen. Die Masse wird für die Lage des KSP mit einbezogen. Da diese Masse nicht als relativer Anteil der Körpermasse angegeben werden kann, muss in dieser Simulation zusätzlich die absolute Körpermasse eingestellt werden.

Die einzelnen Gliedmaßen sind farblich ausgefüllt dargestellt. Dies bietet, neben einem ansprechenderen Aussehen, den Vorteil, dass auf eventuell verwirrende und auch unpräzise Angaben wie ‚rechts‘ oder ‚links‘ verzichtet werden kann. Stattdessen bietet es sich an, vom gelben Arm oder pinken Bein zu sprechen. Ebenso ist im Bild des Kopfes ein Gesicht skizziert, sodass ‚vorne‘ und ‚hinten‘ festgelegt sind.

Die Simulationen können lediglich als modellhafte Lagebestimmung des KSP aufgefasst werden. Die verwendeten Daten beruhen auf statistischen Werten, sodass eine individuelle Übertragbarkeit nicht gegeben ist. Es kann jedoch durch gezielte Bewegungen von Gliedmaßen die damit einhergehende Lageänderung des KSP simuliert werden. Die Beweglichkeit des Modells ist aber eingeschränkt, um die Komplexität zu begrenzen. Es wurde beispielsweise auf die Beweglichkeit des Rumpfes verzichtet. Systembedingt sind auch dreidimensionale Bewegungen, insbesondere Rotationen von Gliedmaßen, nicht möglich.

3.3 Videoanalyseprogramm

Zur Analyse von Bewegungsabläufen wird das Videoanalyseprogramm Vidantoo in der Version 1.1 genutzt. Das von Helmar Becker entwickelte Programm ist für die private Nutzung und die Nutzung an öffentlichen hessischen Schulen kostenlos. Es steht im Internet unter der Adresse

<http://hbecker.sytes.net/vidantoo/VidAnToo.exe> zum Download zur Verfügung (Stand: 08.09.2010).



Abbildung 3.3: Das Videoanalyseprogramm Vidantoo. Im Hintergrund ist die Programmoberfläche mit geladenem Video und im Vordergrund eine Auswertung zu erkennen.

Mit dem Programm kann die Bewegung eines gefilmten Objekts erfasst und ausgewertet werden. Dazu wird auf jedem Bild des Videos das gewünschte Objekt angeklickt. Das Programm errechnet dann über einen anzugebenden Vergleichswert die Pixelwerte in Meter um. Somit ergibt sich die Bahnkurve des Objektes in einem xy -Diagramm (Abbildung 3.3). Mit der Bildrate des Videos errechnet das Programm durch das Bilden von Differenzenquotienten Werte für die Geschwindigkeit und die Beschleunigung in x - und y -Richtung. Vidantoo ermöglicht das gleichzeitige Erfassen und Auswerten von bis zu drei Objekten. Die Daten können in eine Tabellenkalkulation exportiert werden. Es gibt jedoch auch programminterne Auswertungsmöglichkeiten. So können bis zu drei Diagramme gleichzeitig angezeigt werden. Zur Auswahl stehen neben dem xy -Diagramm ts -, tv - und ta -Diagramme für die zurückgelegte Strecke s , die Geschwindigkeit v und die Beschleunigung a als Funktion der Zeit t , jeweils für die x - und die y -Richtung. Des Weiteren können für Teilbereiche Mittel-, Minimal-, Maximalwerte, Fläche unter der Kurve und Standardabweichung angegeben werden. Zudem verfügt das Programm über die Funktion, einfache Anpassungsfunktionen zu erstellen und die Daten durch Mitteln oder Interpolation bei den Differenzenquotienten zu glätten (Becker, 2010).

Es ist notwendig, dass für eine aussagekräftige Auswertung immer die gleiche Stelle eines Objektes ausgewählt wird. Aus diesem Grund wurden an den auf-

genommenen Personen Markierungspunkte angebracht. Bei diesen Markierungspunkten handelt es sich um kreisförmige Pappscheiben mit einem Durchmesser von 4cm (Abbildung 3.4). Diese Größe hat sich unter dem Gesichtspunkt des nötigen Abstands zur Kamera als noch gut zu erkennen erwiesen.

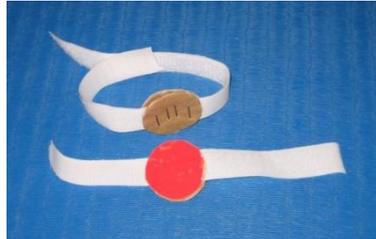


Abbildung 3.4: Die als Markierungspunkte eingesetzten Pappscheiben.

Auf einer Seite sind die Pappscheiben mit rotem Klebeband versehen, sodass sie durch den Kontrast zu den weißen Judoanzügen gut zu erkennen sind. Auf der anderen Seite der Pappscheiben ist ein weißes Klettband zur Befestigung am Körper angebracht. Dieses beeinträchtigt durch seine Farbe nicht die Sichtbarkeit der Markierungen. Es ermöglicht zudem eine schnelle, unkomplizierte und dennoch stabile Befestigung.

Der zur Umrechnung der Daten benötigte Vergleichswert wird jeweils durch die Judomatten bestimmt. Eine Judomatte hat eine Fläche von 1m x 1m. So kann in jedem Video ein Vergleichswert in unmittelbarer Nähe der gefilmten Personen gefunden werden.

3.4 Kraftmessung

Die Messung von Kräften erfolgt über Kraftmessplatten. Diese sind über einen NXT-Stein von Lego Mindstorms mit einem PC verbunden. Das Auslesen und Aufzeichnen der Daten am PC erfolgt durch in Labview erstellte Programme. Um die Programme starten zu können, muss Labview 2010, Version 10.0 installiert sein. Alternativ können die Programme als ausführbare Dateien gestartet werden. Dafür muss das Programm ‚Labview Run-Time Engine 2010‘ (verfügbar unter: <http://joule.ni.com/nidu/cds/view/p/id/2088/lang/de>, Stand: 02.10.2010) und der Treiber für den NXT-Stein ‚Lego Mindstorms NXT

Driver' (verfügbar unter: <http://mindstorms.lego.com/en-us/support/files/Driver.aspx>, Stand: 02.10.2010) installiert werden.

Labview

Zum Auslesen und Aufzeichnen der Sensordaten an einem PC wurden mehrere Programme in Labview 2010, Version 10.0 erstellt.

Labview ist eine von National Instruments entwickelte Software zum Erstellen von Prüf-, Steuer- und Regelanwendungen. Labview nutzt dabei eine grafische Datenflussprogrammierung. Ein Labview-Programm, ein sogenanntes virtuelles Instrument (VI), besteht aus zwei Hauptelementen: der Benutzeroberfläche (Frontpanel), die die Bedien- und Anzeigeelemente enthält, und dem Blockdiagramm, das den Programmcode darstellt.

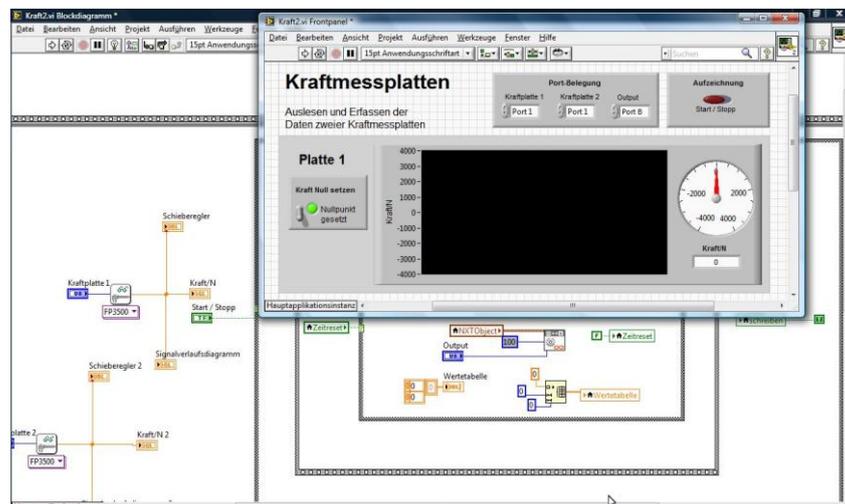


Abbildung 3.5: Ein geöffnetes Labview-Programm mit Bedienoberfläche (Vordergrund) und Blockdiagramm (Hintergrund).

Im Blockdiagramm werden die Daten über Drähte zwischen verschiedenen Datenquellen und -senken geleitet. Bei den Datenquellen und -senken kann es sich um Anzeigeelemente, Bedienelemente oder andere Funktionsblöcke handeln (National Instruments Corporation, 2005). Um eine Arbeit mit dem NXT-Stein zu ermöglichen, ist die NXT-Robotics-Erweiterung von Labview notwendig. Sie erweitert Labview um spezielle Programmierelemente. Die Erweiterung kann direkt bei der Installation Labview ausgewählt und mit installiert werden.

NXT-Stein

Die verwendeten Kraftmessplatten sind darauf ausgelegt, mit dem Mindstorms-NXT-System von Lego genutzt zu werden. Daher wird für die durchgeführten Messungen immer auch ein NXT-Stein (Abbildung 3.6) benötigt. Der NXT-Stein ist ein programmierbarer Baustein, der über vier Input-Anschlüsse und drei Output-Anschlüsse verfügt. An die Input-Eingänge können Sensoren über Kabel angeschlossen werden. Die Output-Anschlüsse ermöglichen es, Geräte wie beispielsweise Lampen oder Motoren anzusteuern. Der Datenaustausch mit einem PC findet wahlweise über eine Bluetooth- oder eine USB-Verbindung statt.



Abbildung 3.6: Der NXT-Stein von Lego. Die Output-Anschlüsse befinden sich oben, die Input-Anschlüsse unten am Gerät.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der NXT-Stein nicht separat programmiert, sondern über Labview-Programme angesteuert. Die Verbindung zum PC erfolgt über die USB-Schnittstelle.

Kraftmessplatten

Zur Anwendung kommen Kraftmessplatten der Firma Vernier (Abbildung 3.7). Die Platten haben eine Fläche von etwa 28cm x 32cm und eine Höhe von 5cm. Sie können über einen Adapter an den NXT-Stein angeschlossen werden. Des Weiteren können an Vorder- und Rückseite der Platten Griffe angebracht werden



Abbildung 3.7: Eine Kraftmessplatte mit Adapter für den NXT-Stein.

Mit einem an der Seite angebrachten Schalter kann zwischen zwei Messbereichen gewählt werden. Ein Messbereich reicht von -200N bis 850N , der andere von -800N bis 3500N . Bei einer gleichmäßigen Verteilung führen Kräfte zwischen -900N und 4500N zu keiner Beschädigung des eingebauten Sensors. Negative Werte stehen dabei für Zug- und positive Werte für Druckkräfte. Die Auflösung der Platten beträgt im kleineren Messbereich $0,3\text{N}$ und im größeren Messbereich $1,2\text{N}$. Die Anzeige der Platten kann auf Null gesetzt werden. Zudem kann es vorkommen, dass auch nach einer größeren Aufprallkraft ein Null-Setzen notwendig ist (Vernier Software & Technology, 2010).

Im Rahmen dieser Arbeit wird in der Regel aufgrund der Größe der vorkommenden Kräfte mit dem größeren der beiden Messbereiche gearbeitet. Auch wenn sich die Kräfte im Grenzbereich des kleineren Messbereichs befinden, wurde der größere Messbereich gewählt. Es war häufig nicht abzusehen, ob der Messbereich nicht doch durch unvorhergesehene Einflüsse überschritten wird. Der damit einhergehende Verlust an Messgenauigkeit ist im Kontext der Messungen aufgrund seiner Größe nicht von Bedeutung.

Für die Kraftmessplatten wurden drei Programme in Labview erstellt. Das Programm ‚Kraftanzeige‘ (CD07, ausführbare Datei: CD08) zeigt die gemessene Kraft in Newton an. Es besteht die Möglichkeit, den Input-Anschluss zu wählen und die Anzeige auf Null zu setzen. Die Programme ‚Kraftmessplatte‘ (CD09, ausführbare Datei: CD10) und ‚Kraftmessplatte2‘ (CD11, ausführbare Datei: CD12) unterscheiden sich lediglich dahingehend, dass beim ersten nur eine Platte angeschlossen werden kann und beim zweiten das zeitgleiche Auslesen von zwei Platten möglich ist. Auch diese Programme bieten die Möglichkeit, den Input-Anschluss einer Platte zu wählen und die Anzeige einer Platte auf Null zu setzen. Zusätzlich ermöglichen es beide Programme, Wertetabel-

len aufzuzeichnen und in einer Datei abzuspeichern. Zudem wird mit dem Start der Aufzeichnung ein Signal an einem Output-Anschluss ausgegeben, sodass eine Synchronisation der Messung beispielsweise mit einer Videoaufnahme ermöglicht wird.

3.5 Wurfpuppe

Die Lerneinheit für das Schülerlabor sieht den Einsatz einer Wurfpuppe (Abbildung 3.8) vor. Wurfpuppen werden im Judo unter anderem eingesetzt, um Würfe mit vielen Wiederholungen zu üben. Es wird auf einen menschlichen Übungspartner verzichtet und stattdessen die Wurfpuppe geworfen. Bei der verwendeten Wurfpuppe handelt es sich um ein speziell auf Kinder und Jugendliche abgestimmtes Modell der Marke Danrho.



Abbildung 3.8: Die verwendete Wurfpuppe mit einem Judoanzug.

Die Puppe hat eine Größe von etwa 130cm und eine Masse von 6kg. Um sie besser handhabbar zu machen, wurde die Wurfpuppe mit einem Judoanzug (japanisch: *Judogi*) versehen.

4 Untersuchungen zu physikalischen Konzepten im Judo

In diesem Kapitel wird Judo als physikalischer Kontext aufgefasst. Dazu werden ausgewählte Techniken aus den Bereichen Stand, Fallübung und Boden unter physikalischen Gesichtspunkten untersucht. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Thematik Gleichgewicht. Das Gleichgewicht spielt im Judo eine große Rolle, sei es als *Tori* oder als *Uke*. Daher beschäftigt sich der erste Abschnitt in diesem Kapitel ausschließlich mit diesem Thema. Aber auch bei der anschließenden Analyse eines Wurfes und bei einer der betrachteten Bodentechnik ist das Gleichgewicht von Bedeutung. Aufgrund der Vielzahl von Techniken kann nur eine stark begrenzte Auswahl von diesen behandelt werden. Daher können die einzelnen Abschnitte dieses Kapitels nur als Ausschnitte der jeweiligen Technikgruppen angesehen werden.

4.1 Gleichgewicht

Der Thematik Gleichgewicht kommt im Judo aufgrund der Wurftechniken eine besondere Bedeutung zu: „Das Stören und Brechen des Gleichgewichts ist das Grundproblem des Judowettkampfes im Stand“ (Lehmann & Müller-Deck, 1989, S. 41). Aber auch in anderen Bereichen spielt Gleichgewicht eine Rolle. Die Grundlagen von Gleichgewicht und Standfestigkeit des Menschen wurden bereits in Kapitel 2 dargelegt. In diesem Abschnitt sollen Grundlagen angewendet und judospezifische Aspekte dieser Thematik erläutert werden. Dafür werden sportarttypische Situationen betrachtet. Aufgrund der entscheidenden Rolle des KSP im Zusammenhang mit dem Gleichgewicht, erfolgt zunächst eine Bestimmung der Lage des KSP. Im Rahmen dieses Kapitels wird der menschliche Körper vereinfachend als ein starrer Körper angesehen.

4.1.1 Lage des Körperschwerpunktes

Die Lage des KSP einer Person wird nach dem auf S. 19 vorgestellten Verfahren von Mathelitsch & Thaller (2008) durchgeführt. Für die Messungen wer-

den eine Langbank, eine Sprossenwand, ein Maßband und eine Stange verwendet. Für die Messungen ist eine Kraftmessplatte mit Adapter, ein NXT-Stein sowie ein Computer mit dem Programm ‚Kraftanzeige‘ notwendig. Zunächst wird das Gewicht der Person mit der Kraftmessplatte bestimmt. Anschließend wird die Platte unter der Bank platziert, die Messanzeige auf Null gesetzt und der Abstand der Aufhängung der Bank an der Sprossenwand zu ihrem Auflagepunkt auf der Platte ausgemessen. Nun legt sich die Person auf die Bank und die zusätzliche Kraft kann bestimmt werden. Die durchgeführten Messungen ergaben die in der folgenden Tabelle festgehaltenen Werte.

Tabelle 4.1: Messdaten zur Lagebestimmung des KSP (CD13).

Horizontaler Abstand d zum Auflagepunkt:	3,48m
Gewicht G der Person:	930N
Zusätzliche Kraft K auf Kraftmessplatte:	517N

Aus diesen Werten lässt sich nun nach Gleichung (2.41) der horizontale Abstand d_S des KSP von der Aufhängung der Bank errechnen:

$$d_S = \frac{d \cdot K}{G} = \frac{3,48\text{m} \cdot 517\text{N}}{930\text{N}} = 1,93\text{m} \quad (4.1)$$

In dieser Entfernung wurde ein Stab aufgestellt, um die Lage des KSP erkennen zu können (Abbildung 4.1).

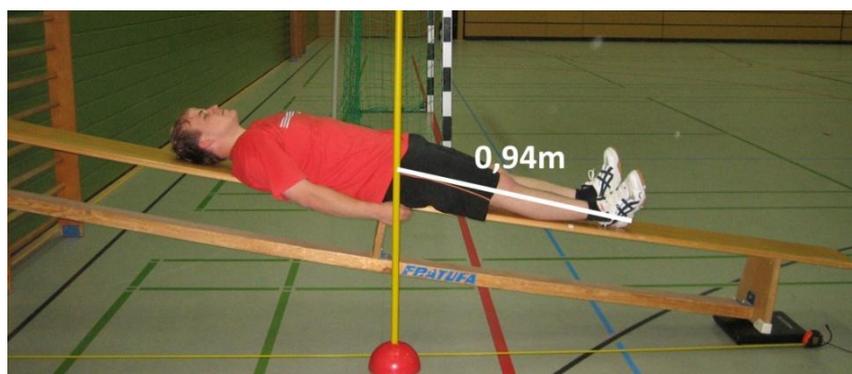


Abbildung 4.1: Experimentelle, eindimensionale Lagebestimmung des KSP. Die Lage des KSP wird durch die gelbe Stange markiert.

Eine Messung hat eine Entfernung der Stange von 0,94m zur Fußsohle ergeben. Umgerechnet auf eine Körpergröße von 1,8m bedeutet dies, dass der KSP näherungsweise bei 52% der Körperhöhe liegt. Dieser Wert weicht von

den Angaben in der Literatur ab. Dort wird die KSP-Höhe bei Männern mit etwa 57% (vgl. Abschnitt 2.6.3) angegeben. Es ist zu berücksichtigen, dass die Lage des KSP individuell unterschiedlich ist und die in der Literatur angegebenen 57% nur ein Richtwert sein können. Die Abweichung kann möglicherweise aber auch in Ungenauigkeiten im Experiment begründet sein. Neben möglichen systematischen Fehlern können auch Messunsicherheiten aufgetreten sein. Die Werte der Kraftmessplatte schwankten schon bei geringsten Bewegungen und auch die exakte Lage der horizontalen Projektion des Auflagepunktes der Bank an der Sprossenwand ist nur schwer zu bestimmen.

Da dieses Verfahren nur eine eindimensionale Lage des KSP liefert und die Baslersche Methode (s. Abschnitt 2.6.3) mit einem zu hohen Aufwand verbunden wäre, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf eine analytische Schwerpunktbestimmung zurückgegriffen.

4.1.2 Stabiler Stand

Im Judo werden zwei grundlegende Stellungen des Standes unterschieden: die natürliche Grundstellung (jap.: *Shizen-Hontai*) und die Verteidigungsstellung (jap.: *Jigotai*). Die Grundstellung entspricht dabei einem normalen Stand. In der Verteidigungsstellung werden die Füße weit nach außen gestellt und die Knie gebeugt. Durch das Beugen der Knie wird der KSP abgesenkt. Bei beiden Stellungen kann ein Fuß in Schrittstellung nach vorne gebracht werden (Kano, 2007).

Die Verteidigungsstellung müsste sich somit gegenüber der Grundstellung durch eine höhere Standfestigkeit auszeichnen. Diese Annahme kann durch das in Abschnitt 2.7.2 vorgestellte geometrische Maß der Standfestigkeit überprüft werden. Zur Überprüfung erfolgt die Bestimmung des KSP nach der analytischen Methode in der Variante nach Dickwach (1967). Es werden Fotoaufnahmen einer Person in diesen Stellungen jeweils in der zur Schwerpunktbestimmung vorgefertigten Datei in Geogebra eingefügt und die Lage des KSP sowie anschließend die Kippwinkel bestimmt. Die Aufnahmen wurden zur Verringerung von Verzerrungen aus einer größeren Entfernung aufgenommen. Zur besseren Darstellung werden jedoch nur die relevanten Bildausschnitte ausgewertet und in Abbildung 4.2 dargestellt.

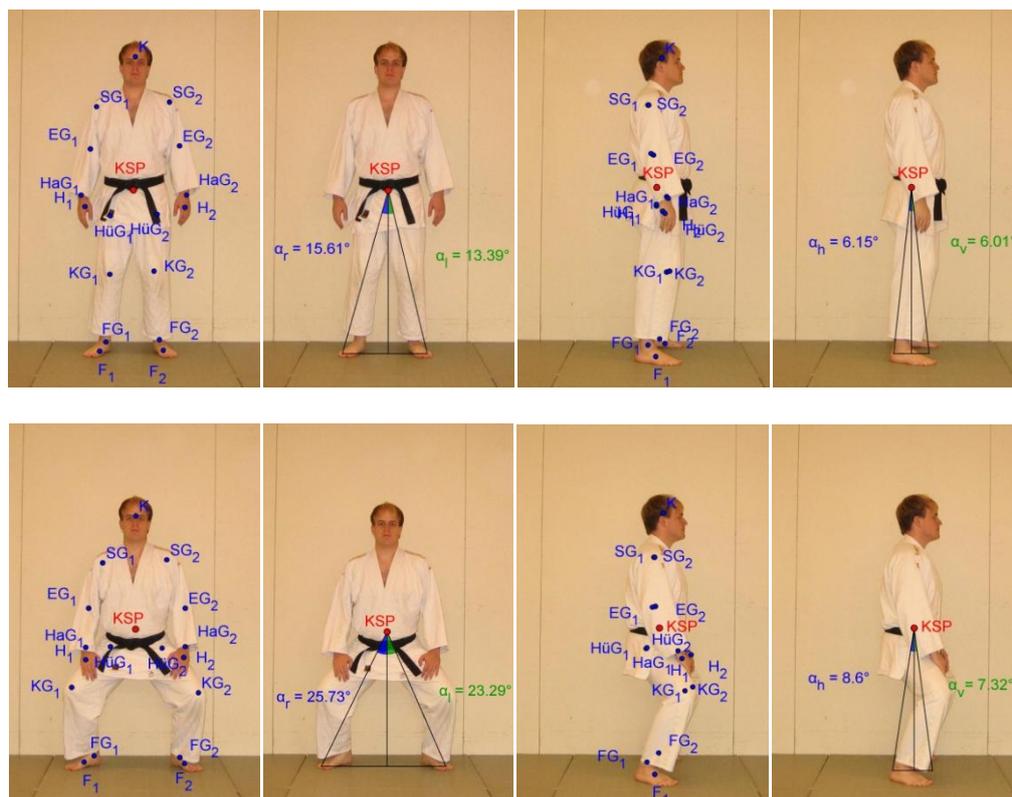


Abbildung 4.2: Bestimmung der Lage des KSP und der Kippwinkel für die Grundstellung (oben) und die Verteidigungsstellung (unten) jeweils in einer frontalen und einer seitlichen Ansicht (CD14 bis CD21).

Das Ausmessen und das Bestimmen der Winkel können direkt in Geogebra vorgenommen werden. Zur Umrechnung der Streckenlängen in tatsächliche Längen wird auf die Judomatten zurückgegriffen. Eine Judomatte ist 1m lang und 1m breit. Mit dieser Information lässt sich direkt am Standpunkt der Person eine Vergleichslänge ausmessen. Der perspektivische Fehler wird so minimiert. Bei den Werten für die Kippwinkel muss berücksichtigt werden, dass die genauen Ausmaße der effektiven Unterstützungsfläche individuell verschieden und nicht exakt festzustellen sind. Es wurde jedoch versucht, die effektive Unterstützungsfläche zu berücksichtigen, indem nicht von den Fußkanten bzw. Zehenspitzen, sondern von weiter innen liegenden Punkten als Kippkante ausgegangen worden ist. Tabelle 4.2 fasst die Ergebnisse der Auswertung zusammen.

Tabelle 4.2: Gemessene Höhe des KSP und Größe des Kippwinkels für die Grundstellung und die Verteidigungsstellung.

	frontale Ansicht		seitliche Ansicht	
	Grundstellung	Verteidigungsstellung	Grundstellung	Verteidigungsstellung
Höhe des KSP	0,94m	0,8m	0,95m	0,8m
Kippwinkel	$\alpha_r = 15,61^\circ$	$\alpha_r = 25,73^\circ$	$\alpha_h = 6,15^\circ$	$\alpha_h = 8,60^\circ$
	$\alpha_l = 13,39^\circ$	$\alpha_l = 23,29^\circ$	$\alpha_v = 6,01^\circ$	$\alpha_v = 7,32^\circ$

Wie aus den Daten hervor geht, liegt der KSP in der Verteidigungsstellung deutlich tiefer als in der Grundstellung. Die Ergebnisse für die frontale und die seitliche Ansicht sind dabei weitestgehend konsistent. Zur Genauigkeit der Umrechnung kann ein Vergleich mit einer bekannten Größe durchgeführt werden. Für die Größe der Person ergibt sich umgerechnet ein Wert von 1,79m, was der tatsächlichen Größe von 1,8m recht genau entspricht. Nach dieser Auswertung liegt der KSP bei etwa 53% der Körperhöhe. Dies deckt sich mit dem Ergebnis der experimentellen Bestimmung (52%) aus dem vorherigen Abschnitt.

Entsprechend der geringeren Höhe des KSP sind auch die Kippwinkel in der Verteidigungsstellung größer als in der Grundstellung. Die Abweichungen der Winkel zwischen rechts und links bzw. hinten und vorne sind auf unsymmetrische Körperhaltungen zurückzuführen. Die Vergrößerung der Kippwinkel macht sich insbesondere bei der frontalen Ansicht bemerkbar. Hier wird durch die veränderte Fußstellung die Unterstützungsfläche verbreitert und die Kippwinkel zu den Seiten werden so noch größer. Die Veränderung der Winkel für die seitliche Ansicht fällt wesentlich geringer aus. Die Standfestigkeit in der Verteidigungsstellung liegt aber demnach tatsächlich über derjenigen in der Grundstellung.

Ein Heben der Arme hat kaum einen Einfluss auf die Lage des KSP. Dies ist mit den geringen relativen Massen von Armen und Händen zu erklären.



Abbildung 4.3: Ein Heben der Arme hat auf die Höhe des KSP kaum einen Einfluss (CD22).

Bei einem Heben der Arme wie in Abbildung 4.3 ergibt sich eine Höhe des KSP von 0,81m. Dieser Wert liegt nur unwesentlich höher als mit hängenden Armen (0,8m).

Durch die optionale Schrittstellung kann die Standfestigkeit in der Verteidigungsstellung nach vorne und hinten zusätzlich vergrößert werden. Dies lässt sich anhand von geometrischen Überlegungen verdeutlichen. Dabei wird angenommen, dass der vordere und hintere Rand der Unterstützungsfläche parallel verlaufen.

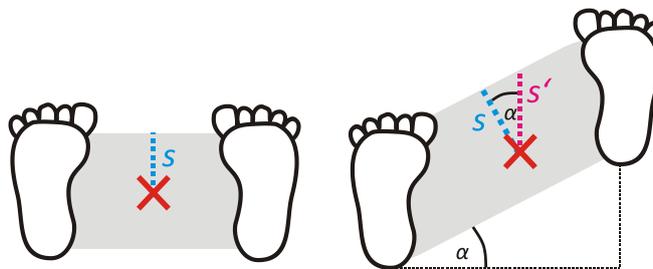


Abbildung 4.4: Durch eine Schrittstellung ergibt sich ein größerer Kippwinkel nach vorne. Die Strecke, die die Projektion des KSP (rotes Kreuz) zurücklegen muss, um die Unterstützungsfläche (grau) zu verlassen, ist abhängig von der Schrittgröße.

Die Strecke, die der KSP zurücklegen muss, bis er sich nicht mehr über der Unterstützungsfläche befindet, ist von der Schrittgröße bzw. dem Winkel α zwischen den Füßen abhängig. Ist s die Strecke, die der KSP bei paralleler Fußstellung zurücklegen muss, um außerhalb der Unterstützungsfläche zu sein, ergibt sich für die entsprechende Strecke s' bei Schrittstellung:

$$s' = \frac{s}{\cos(\alpha)} \quad (0^\circ \leq \alpha < 90^\circ) \quad (4.2)$$

Die Gleichheit der Winkelgrößen ergibt sich aus der Ähnlichkeit der in Abbildung 4.4 angedeuteten Dreiecke. Nach Gleichung (4.2) ist die Strecke s' also länger als die Strecke s und so ergibt sich ein größerer Kippwinkel. Die Überlegungen gelten ebenso für die Strecke nach hinten.

Bei einer Winkelgröße von 0° stehen die Füße parallel und im Grenzfall von 90° würden sie voreinander stehen. Bei dieser mathematischen Sichtweise muss jedoch bedacht werden, dass die Gleichung nicht für Winkel beliebig nahe an 90° anwendbar ist. Die Strecke s' wird durch den Beginn der Zehen nach vorne bzw. Ende der Ferse nach hinten beschränkt. Der maximale Wert von s' entspricht also der Schrittlänge.

Es ist leicht ersichtlich, dass mit zunehmendem Schrittwinkel die Stabilität zur Seite abnimmt. Die Schrittstellung mit einer gemäßigten Schrittgröße macht dennoch unter dem Gesichtspunkt Sinn, dass dem Partner in der Regel die Körpervorderseite zugewandt und mit einem Angriff von vorne zu rechnen ist. Somit ist eine größere Stabilität nach vorne bzw. hinten vorteilhaft.

Auch unter dynamischen Gesichtspunkten bietet die Schrittstellung einen Vorteil. Wird auf den Oberkörper eine nach hinten gerichtete Kraft $F_{\text{stör}}$ (in Abbildung 4.5 gelb dargestellt) ausgeübt, kann durch die Schrittstellung eine entgegen gerichtete Kraft ausgeübt werden.

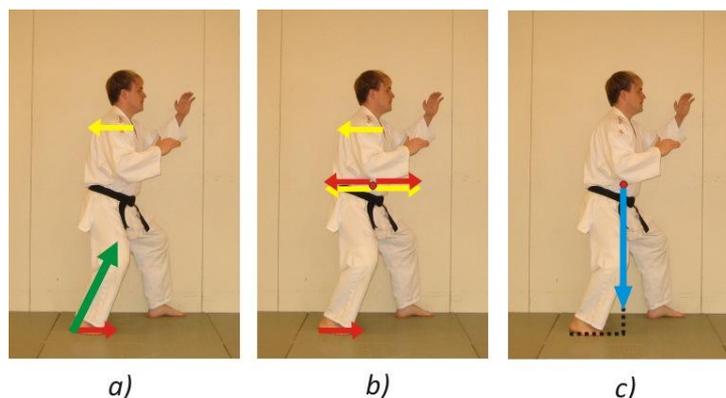


Abbildung 4.5: Die Schrittstellung ermöglicht ein höheres Maß an Stabilität. a) Durch Abdrücken mit dem Bein kann eine horizontale Kraftkomponente (rot) genutzt werden, die der störenden Kraft (gelb) entgegen gerichtet ist. b) Am KSP werden gleich große, antiparallele Kräfte eingezeichnet. Die Translationsbewegung des KSP wird kompensiert. c) Die Gewichtskraft bewirkt ein Drehmoment, das demjenigen aufgrund der störenden Kraft und der Reibung entgegengesetzt ist.

Durch das Drücken des hinteren Fußes gegen den Boden wirkt eine entgegen gerichtete Reaktionskraft (grün). Diese Kraft hat eine horizontale Komponente (rot), nämlich gerade die Reibungskraft F_R zwischen Fuß und Matte. Sowohl diese als auch die störende Kraft greifen nicht im KSP an. Es lässt sich genauso vorgehen wie in Abschnitt 2.3 beschrieben. Es werden jeweils antiparallele und gleich große Kräfte am KSP angesetzt. Die Kräfte, die für eine Translationsbewegung des KSP sorgen würden, können miteinander verrechnet werden, sodass die resultierende Kraft Null ergibt:

$$F_{res} = F_{stör} + F_R = 0 \quad (4.3)$$

Sowohl die störende Kraft als auch die Reibungskraft bewirken beide ein gleichgerichtetes Drehmoment. Es käme zu einem Kippen nach hinten. Die Kippkante entspräche der Ferse des hinteren Fußes, da der vordere Fuß den Bodenkontakt verlieren würde. Jedoch wäre dann der KSP vor der Unterstützungsfläche, die nur noch durch den hinteren Fuß gebildet wird. So wirkt aufgrund der Gewichtskraft (blau) ein entgegen gerichtetes Drehmoment, das die beiden anderen Drehmomente kompensiert.

Die Verteidigungsstellung findet beispielsweise Anwendung bei dem Abblocken von Wurftechniken nach vorne. Abbildung 4.6 zeigt den Ablauf eines solchen Abblockens.



Abbildung 4.6: Eine Wurftechnik nach vorne wird durch Einnehmen der Verteidigungsstellung geblockt (CD23).

Tori ist es durch die Verteidigungsstellung *Ukes* nicht mehr möglich, dessen Gleichgewicht zu brechen (s. nächster Abschnitt) und den Wurf auszuführen. Durch ein nach hinten Lehnen kann das Blockieren des Wurfes noch verstärkt werden. Der KSP bewegt sich dabei nach hinten über die Unterstützungsfläche hinaus. So entsteht ein Drehmoment, das der Wurfrichtung nach vorne entgegengesetzt ist.

4.1.3 Gleichgewicht bei Würfen

Ein Wurf kann in mehrere Phasen unterteilt werden, wobei der eigentliche Niederwurf die letzte Phase darstellt:

- Griff aufnehmen
- Gleichgewicht brechen
- Wurfansatz
- Niederwurf

Nach dem Aufnehmen eines Griffes am Judoanzug des Partners beinhaltet jeder Wurf das Brechen des Gleichgewichts (jap.: *Kuzushi*). Unter Brechen des Gleichgewichts versteht man dabei, den Partner in eine labile Gleichgewichtslage oder sogar ganz aus dem Gleichgewicht zu bringen. Gemäß den von Judogründer Kano formulierten Prinzipien wird dabei versucht, die Aktionen des Partners auszunutzen. So kann ein nach vorne schiebender Partner auch leichter nach vorne geworfen werden. Es ist also situations- bzw. bewegungsabhängig, welche Wurfrichtung und welcher Wurf sinnvoll ist. Aber auch aus

dem Stand heraus kann das Gleichgewicht gebrochen werden. Dafür ist dann entsprechend eine größere Anstrengung notwendig. Das Brechen des Gleichgewichts spielt sich idealerweise in einer so kurzen Zeitspanne ab, dass es *Uke* nicht gelingt, durch Gewichtsverlagerungen oder Wiederherstellungsbewegungen in eine stabile Gleichgewichtslage zurückzukehren. Auch die Verkleinerung der Unterstützungsfläche ermöglicht das schnelle Erreichen einer labilen Gleichgewichtslage. Häufig geht das Brechen des Gleichgewichts mit dem Wurfansatz einher, sodass die beiden Phasen nicht voneinander getrennt werden können.

Im Folgenden soll das Brechen des Gleichgewichts teilweise aus statischen Situationen betrachtet werden. Dies bietet sich an, da so die zugrunde liegenden Prinzipien deutlicher werden und Messungen besser durchgeführt werden können, als bei Würfen aus der Bewegung.

Gleichgewicht des Geworfenen

Da das Gleichgewichtsbrechen bei jedem Wurf im Detail anders abläuft, soll sich die nachfolgende Betrachtung auf drei Würfe beschränken. Die dargestellten Prinzipien können aber auf viele weitere Würfe übertragen werden. Ein recht einfaches Prinzip wird bei den Fegewürfen genutzt. Während eines Schrittes ist der entsprechende Fuß nicht belastet. *Tori* kann mit einer zeitlich gut abgestimmten Bewegung *Ukes* Fuß in diesem Moment mit dem eigenen Fuß ‚wegfegen‘. Ein Beispiel hierfür ist das vorwärtige Fegen (jap.: *De-ashi-barai*) aus Abbildung 4.7. *Uke* verliert die Unterstützungsfläche des Fußes und *Tori* kann ihn durch eine Verdrehung des Oberkörpers auf den Rücken werfen. In der abgebildeten Ausführung ist diese Verdrehung so stark, dass auch noch der zweite Fuß den Bodenkontakt verliert.



Abbildung 4.7: Der Ablauf eines vorwärtigen Fegens (CD24).

Beim Schulterwurf (jap.: *Seoi-nage*) wird der Partner zunächst nach vorne auf die Zehenspitzen gezogen. Nach dem Eindrehen wird der Partner dann über Rücken und Schulter nach vorne geworfen (Abbildung 4.8).

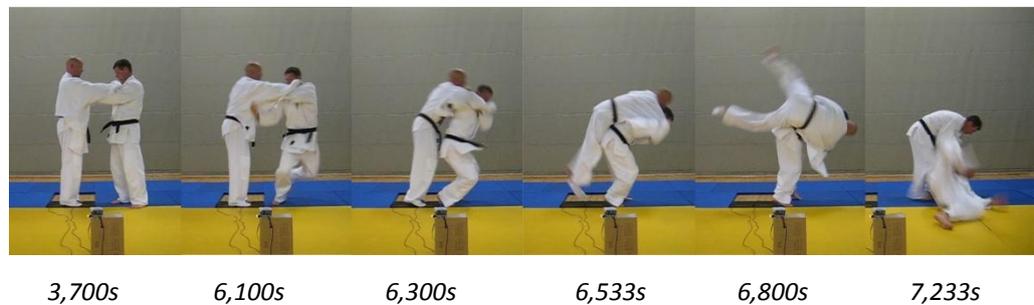


Abbildung 4.8: Der Ablauf eines Schulterwurfs (CD25).

Durch den Zug im Wurfansatz verkleinert sich die Unterstützungsfläche auf die Fußballen bzw. Zehen. Der KSP bewegt sich ebenfalls nach vorne und die Stabilität verringert sich. Insgesamt kommt *Uke* bei dem aufgezeichneten Wurf sogar aus dem Gleichgewicht: Der KSP befindet sich nicht mehr lotrecht über der Unterstützungsfläche (s. Abbildung 4.9). Dies ermöglicht einen leichten Niederwurf nach vorne.

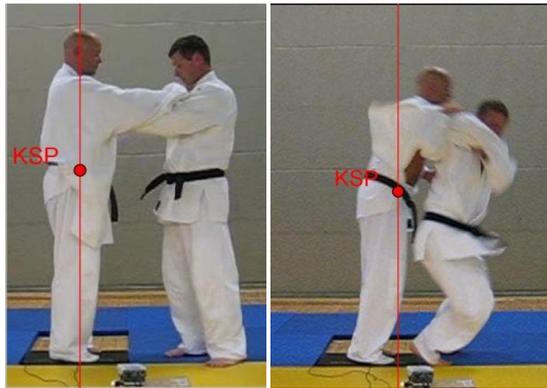


Abbildung 4.9: Bei dem Ansatz eines Schulterwurfes kommt Uke aus dem Gleichgewicht. Das Lot seines KSP liegt außerhalb der Unterstützungsfläche (analytische Bestimmung nach Dickwach (1967)) (CD26, CD27).

Durch die Verwendung der zwei Kraftmessplatten, des NXT-Steins und des Programms ‚Kraftmessplatte2‘ lässt sich die Gewichtsverteilung *Ukes* während eines Schulterwurfs näher untersuchen. Dazu steht *Uke* so auf den Platten, dass vor dem Wurf die vordere Hälfte der Füße auf der einen und die hintere Hälfte der Füße auf der zweiten Messplatte stehen (s. Abbildung 4.8). Zur Synchronisation der Messwerte mit dem Video wurde eine Lampe genutzt, die mit dem Start der Messung zu leuchten beginnt. Der Verlauf der Kräfte ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

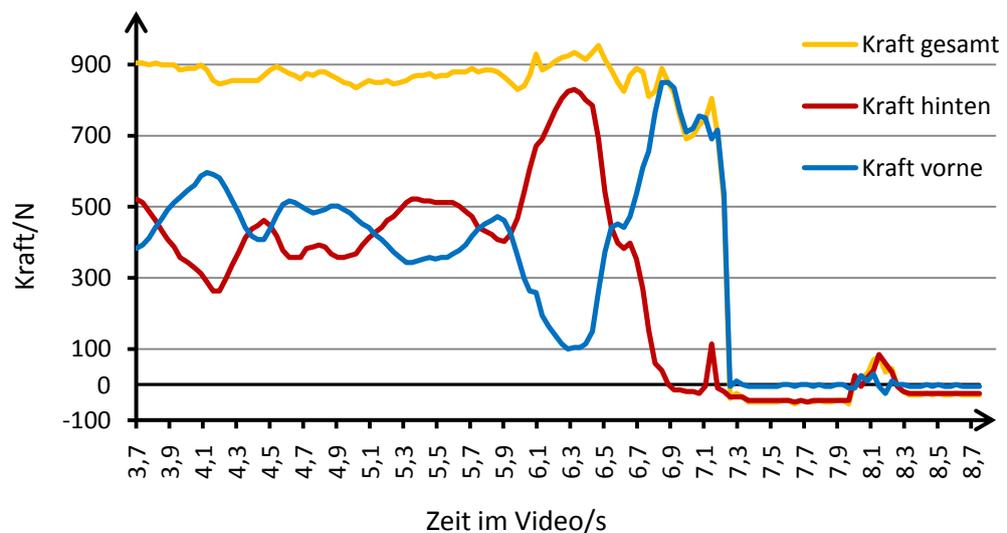


Abbildung 4.10: Kräfte auf der hinteren und vorderen Kraftmessplatte bei dem Schulterwurf (CD28).

Bei der Betrachtung der Kräfte muss natürlich berücksichtigt werden, dass, wie in Abschnitt 2.7.3 dargelegt, der Druckmittelpunkt nicht zwangsläufig mit der lotrechten Projektion des KSP übereinstimmt. Der Verlauf der Kraftkurven lässt also zunächst keine Aussagen über die Lage des KSP zu. Durch die Verwendung zweier Platten lassen sich jedoch bezüglich der Lage des Druckmittelpunktes Abschätzungen vornehmen. Wird hauptsächlich die hintere Fußhälfte belastet, wird der Druckmittelpunkt im hinteren Bereich des Fußes liegen. Zeigt eine Messplatte keinerlei Belastung mehr an, wird die entsprechende Fußhälfte nicht mehr als Unterstützungsfläche genutzt. In Kombination mit dem Video lassen sich somit Aussagen über das Gleichgewicht während des Wurfansatzes treffen.

Zunächst verteilt sich das Gewicht mit Schwankungen auf die vordere und die hintere Fußhälfte. Durch *Tori* werden keine zusätzlichen Kräfte ausgeübt, wie an der praktisch konstanten Gesamtkraft, der Summe der beiden Messwerte, zu erkennen ist. Erst ab 6s ist eine deutliche Gewichtsverlagerung *Ukes* zu erkennen. Er führt eine, aufgrund der geringen Zeitspanne wohl eher unterbewusste Gewichtsverlagerung durch. Auf dem Video ist diese Aktion kaum wahrzunehmen, da sich die Körperhaltung nur sehr gering ändert. Durch die Gewichtsverlagerung verschiebt sich der Druckmittelpunkt in die hintere Fußhälfte, während der KSP durch die kaum geänderte Körperhaltung seine Lage über der Fußmitte (vgl. Abbildung 4.9) praktisch nicht verändert. Somit entsteht, wie im Abschnitt 2.7.3 beschrieben, ein nach hinten gerichtetes Drehmoment. Dieses ist der Wurfbewegung entgegen gesetzt. Die Gewichtsverlagerung ist also damit zu erklären, dass *Uke* weiß, wie der Wurf abläuft. Er versucht daher, sich dem Wurf zu widersetzen. *Uke* wird dann dennoch, wie auf dem Video zu erkennen ist, durch *Tori* auf die Zehenspitzen gezogen. Auch anhand der Messdaten ist dies zu erkennen. Die Kraft auf der vorderen Messplatte entspricht ab etwa 6,9s der Gesamtkraft. Nach ca. 7,2s verliert *Uke* den Bodenkontakt und auch die vordere Kraftmessplatte zeigt keine einwirkende Kraft mehr an. Die kleine Spitze in den Messwerten der hinteren Messplatte bei 7,2s ist mit Hilfe des Videos nicht zu erklären. Der zweite Ausschlag in den Kurven ab etwa 8s trifft mit dem Aufprall *Ukes* zusammen. Die negativen

Werte sind in den beschriebenen Messungenauigkeiten der Messplatten begründet.

Bei der großen Außensichel (jap.: *O-soto-gari*) wird ein anderes Prinzip deutlich, *Uke* aus dem Gleichgewicht zu bringen. *Uke* wird nach schräg hinten gedrückt, sodass er nur noch auf einem Bein steht. Dieses Bein wird dann in einer ‚Sichelbewegung‘ weggeschlagen (Abbildung 4.11).



8,000s

9,033s

9,333s

9,533s

9,700s

9,900s

Abbildung 4.11: Der Ablauf einer großen Außensichel (CD29).

Dadurch, dass *Uke* hier auf einen Fuß gestellt wird, findet ebenfalls eine Verkleinerung der Unterstützungsfläche statt. So verringert sich zwar die Stabilität, jedoch entsteht noch nicht unbedingt ein labiles Gleichgewicht, wie Abbildung 4.12 zeigt. Der KSP befindet sich noch immer lotrecht über dem Fuß.

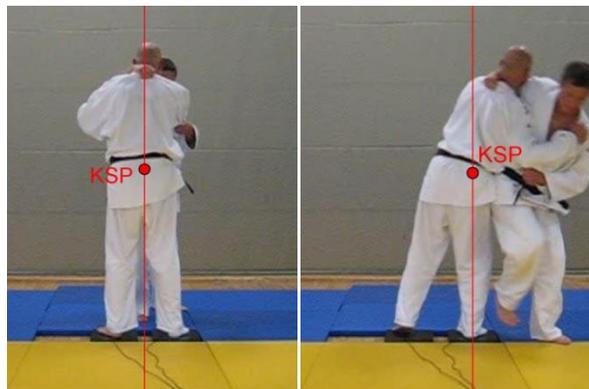


Abbildung 4.12: Bei dem Ansatz einer großen Außensichel bewegt sich der KSP Ukes aus einer zentralen Lage über einen Fuß (analytische Bestimmung nach Dickwach (1967)) (CD30, CD31).

Erst durch das Sicheln des Beines verliert *Uke* endgültig seine Unterstützungsfläche und kommt zu Fall. Auch hier kann die Betrachtung gut durch die Messwerte von zwei Kraftmessplatten ergänzt werden. *Uke* steht mit einem Fuß auf der einen Messplatte und mit dem anderen Fuß auf der zweiten

Messplatte. Die Messkurven sind in Abbildung 4.13 aufgezeichnet. Hier ist ebenfalls zusätzlich die Gesamtkraft als Summe der beiden Messwerte eingezeichnet.

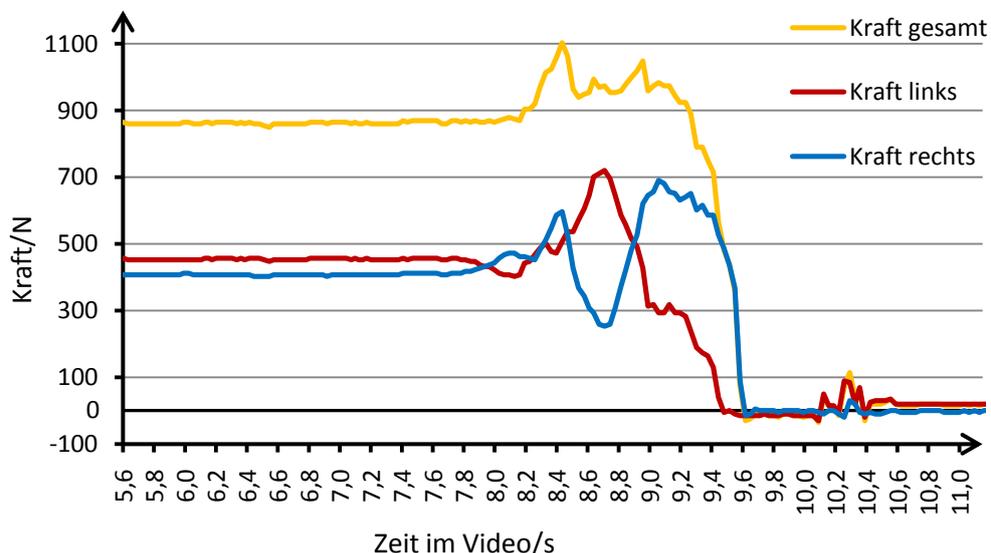


Abbildung 4.13: Kräfte auf der linken und rechten Kraftmessplatte bei der großen Außensichel (CD32).

Anfangs ist hier eine ungefähre Gleichverteilung des Gewichts zu erkennen. Die Gesamtkraft ist auch hier bis 8,2s praktisch konstant. Danach nimmt die Gesamtkraft zu. Wie anhand der Messwerte zu erkennen ist, liegt dies in einer Zunahme der Messwerte der rechten Platte begründet. Da die Messwerte der linken Platte nicht im gleichen Maß abnehmen, entsteht die zusätzliche Kraft durch ein nach unten Drücken *Toris*. Dies ist im Video am Druck auf die Schulter und am Zug an *Ukes* Ärmel zu erkennen. *Uke* versucht auch hier wieder, sich durch eine Gewichtsverlagerung dem Wurf zu widersetzen (ab 8,5s). Dies ist im Video gut durch seine Körperbewegung nach links zu erkennen (vgl. Abbildung 4.11, zweites Teilbild). Ab ungefähr 9s wird *Uke* jedoch wieder zurück auf sein rechtes Bein gezogen. Nach 9,5s übt der linke Fuß keine Kraft mehr auf die Messplatte aus. Die Kraft auf die rechte Messplatte ist geringer als das eigentliche Gewicht *Ukes*. Das ist damit zu erklären, dass ein Teil des Gewichts auf dem sichelnden Bein *Toris* liegt. Kurze Zeit später wird dann das rechte Bein weggeschlagen. Die Ausschläge ab 10,1s sind auch hier wieder durch den Aufprall *Ukes* zu erklären.

Gleichgewicht des Werfenden

Auch für *Tori* spielt das Gleichgewicht eine wichtige Rolle. Er darf nach Möglichkeit nicht selbst fallen. Wie auf dem zuvor beschriebenen Video für die große Außensichel zu sehen, benötigt *Tori* nach dem Wurf mehrere Schritte nach vorne um nicht selbst zu fallen. Aber bereits während der Wurfausführung muss *Tori* auf sein Gleichgewicht achten. Besonders deutlich wird dies bei einbeinig ausgeführten Würfen wie dem Innenschenkelwurf (jap.: *Uchimata*).

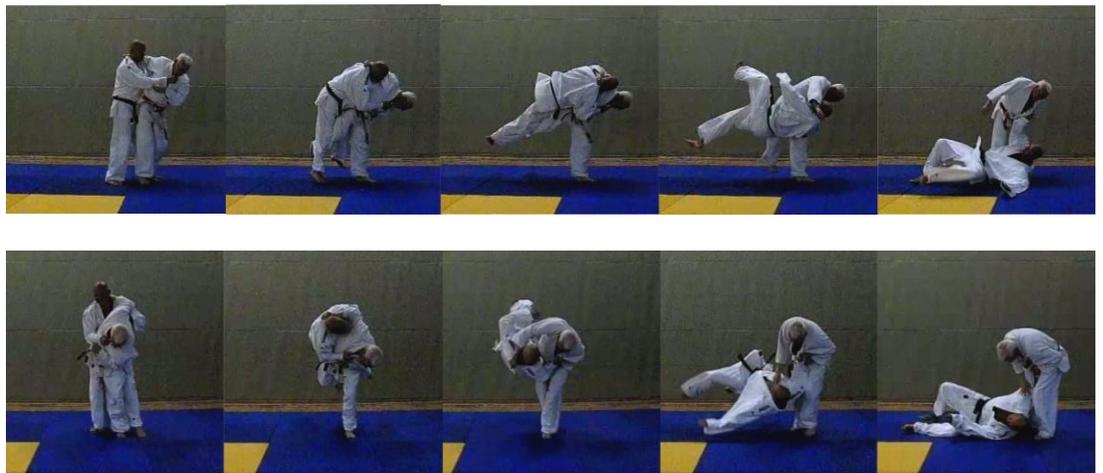


Abbildung 4.14: Der Ablauf eines Innenschenkelwurfs in seitlicher (oben, CD33) und in frontaler Ansicht (unten, CD34).

Als Unterstützungsfläche des Systems *Uke/Tori* dient nur noch ein Fuß *Toris*. Der gemeinsame Schwerpunkt von *Tori* und *Uke* liegt offensichtlich sowohl hinter als auch neben *Toris* Fuß, also außerhalb der Unterstützungsfläche (Abbildung 4.15).

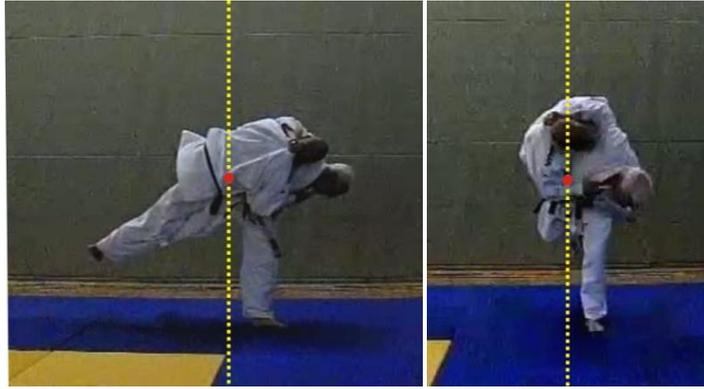


Abbildung 4.15: Der gemeinsame Schwerpunkt (rot) von *Tori* und *Uke* liegt beim *Innenschenkelwurf* sowohl neben als auch hinter der Unterstützungsfläche (Lage des Schwerpunktes geschätzt).

Handelte es sich um eine statische Situation, würde *Tori* mitsamt *Uke* kippen und könnte den Wurf nicht ausführen. *Tori* drückt sich jedoch mit dem Fußballen des Standbeins nach vorne vom Boden ab. So entsteht unter dynamischen Gesichtspunkten ein stabiles Gleichgewicht aus einer seitlichen Sichtweise.

Tori müsste aber immer noch zur Seite umkippen. Eine stabilisierende Kraft zur Seite ist nur schwer zu entwickeln, da es sich bei dem Fußgelenk näherungsweise um ein Scharniergelenk handelt. *Uke* hat keinerlei Bodenkontakt und *Tori* nur über seinen Fuß, der jedoch zu einer Nettokraft zur Seite kaum einen Beitrag leistet. *Uke* und *Tori*s Oberkörper können für diese Richtung als ein abgeschlossenes System mit nur inneren Kräften betrachtet werden. Dass *Tori* nicht umkippt, liegt in der Impulserhaltung begründet. Bei der Wurfausführung drückt *Tori* *Uke* mit einer gewissen Geschwindigkeit nach unten (Abbildung 4.16). *Uke* erhält auf diese Weise einen Impuls.



Abbildung 4.16: Aufgrund der Impulserhaltung gelingt es Tori wieder in ein stabiles Gleichgewicht zurückzukehren.

Da der Gesamtimpuls für das System *Toris* Oberkörper/*Uke* für diese Richtung vor dieser Bewegung null war, muss dies auch nachher gelten. Dafür ist ein gleich großer Impuls entgegengesetzt zu *Ukes* Fallrichtung notwendig:

$$m_{Uke} \cdot v_{Uke} + m_{OK,Tori} \cdot v_{OK,Tori} = 0 \quad (4.4)$$

Dabei bezeichnen $m_{OK,Tori}$ und $v_{OK,Tori}$ die Masse bzw. die Geschwindigkeit von *Toris* Oberkörper. Den Impuls seines Oberkörpers dient *Tori* dazu, in eine stabile Körperhaltung zurückzukehren.

Bei anderen Würfen wiederum gibt *Tori* sein Gleichgewicht gezielt auf, um dadurch *Uke* aus dem Gleichgewicht zu bringen. Ein Beispiel für eine solche Selbstfalltechnik ist der Überkopfwurf (jap.: *Tomoe-nage*). Abbildung 4.17 zeigt eine Variante dieses Wurfes.

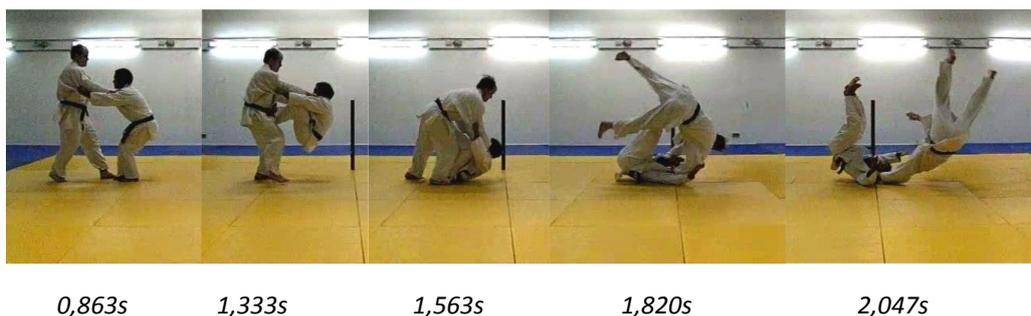


Abbildung 4.17: Der Ablauf einer Variante des Überkopfwurfes (CD35).

Tori gibt sein Gleichgewicht auf, indem er mit beiden Füßen an die Leiste des Partners springt. Der gemeinsame Schwerpunkt von *Tori* und *Uke* liegt dann nicht mehr über der Unterstützungsfläche und beide kippen durch das entstehende Drehmoment nach vorne. Während *Tori* auf dem Rücken landet und so wieder in einem stabilen Gleichgewicht ist, befindet sich *Ukes* KSP nicht

mehr über seiner Unterstützungsfläche. Dadurch entsteht ein Drehmoment, das ihn nach vorne aus dem Gleichgewicht bringt. *Tori*'s Füße befinden sich zu dieser Phase unter *Ukes* KSP. So kann *Tori Uke* auf seine Füße ziehen und leicht ausbalancieren. Im weiteren Verlauf des Wurfes bewegt sich *Uke* durch *Tori*'s Zug weiter nach vorne. Dabei bewegt sich *Ukes* KSP auch ein Stück vor *Tori*'s Füße (Abbildung 4.18). Folglich entsteht ein die Wurfbewegung unterstützendes Drehmoment:

$$M = r \cdot G \quad (4.5)$$



Abbildung 4.18: Der KSP *Ukes* befindet sich vor der Unterstützungsfläche der Füße. Es entsteht ein Drehmoment (KSP: CD36).

Die Lage von *Ukes* KSP ist für *Tori* auch bei anderen Würfen von großer Bedeutung. Ein Beispiel hierfür ist das Schulterrad (jap.: *Kata-guruma*). Bei diesem Wurf wird *Uke* von *Tori* in einem großen Bogen seitlich über die Schultern geworfen (Abbildung 4.19).



2,800s 3,200s 3,400s 3,733s 4,167s 4,500s

Abbildung 4.19: Der Ablauf eines Schulterrades (CD37).

Beim Wurfansatz muss *Tori* darauf achten, seinen Nacken auf die Höhe von *Ukes* KSP zu legen. Bei einer aufrechten Körperhaltung entspricht dies in etwa der Höhe des Gürtels. Abbildung 4.20 zeigt einen korrekten und einen falschen Ansatz des Schulterrades.



Abbildung 4.20: Ein korrekter Ansatz des Schulterrades (links) mit dem Nacken auf der Höhe des KSP und ein falscher, zu hoher Ansatz (rechts).

Wenn *Tori Uke* richtig ausgehoben hat, liegt *Ukes* KSP beim Ausheben direkt über *Toris* Nacken und damit über seinem eigenen KSP und seiner Unterstützungsfläche. *Tori* fällt es somit leicht, *Uke* auszuheben und auf seinen Schultern auszubalancieren. Setzt *Tori* seinen Nacken zu hoch an, liegt *Ukes* KSP vor *Toris* Nacken, und es entsteht ein Drehmoment, das entgegengesetzt zur Wurfriechtung ist.

4.2 Analyse eines Wurfes

Die Würfe im Judo können unter verschiedenen, physikalischen Gesichtspunkten analysiert werden. Im Folgenden soll dazu ein Wurf näher betrachtet werden. Es wird deutlich, dass erst durch die (unterbewusste) Anwendung physikalischer Prinzipien die Wurfausführung in der dargestellten Form möglich wird.

Der beidhändige Schulterwurf (jap.: *Morote-seoi-nage*) ist eine Wurftechnik, bei der *Uke* nach vorne über *Toris* Schulter geworfen wird. *Ukes* Gleichgewicht wird nach vorne oben gebrochen. Im Wurfansatz legt *Tori* seinen Unterarm unter *Ukes* Schulter, geht in die Knie und zieht *Uke* in einem großen Bogen über seinen Rücken und seine Schulter (Abbildung 4.21).



1,301s

1,835s

2,169s

2,603s

3,306s

3,503s

Abbildung 4.21: Der Ablauf des analysierten beidhändigen Schulterwurfes (CD38).

Zur Analyse sind an *Uke* zwei Markierungspunkte befestigt. Einer befindet sich knapp über dem Knöchel des rechten Fußes. Der andere ist an der Seite am Gürtel befestigt. Bei einer gestreckten Körperhaltung liegt diese zweite Markierung ungefähr an der Position des KSP (Abbildung 4.22).



Abbildung 4.22: Die Markierung am Gürtel ist bei einer gestreckten Körperhaltung näherungsweise identisch mit der Lage des KSP (CD39).

Da *Uke* für die gesamte Dauer des Wurfes die gestreckte Körperhaltung nahezu beibehält, beschreibt die Markierung also die ungefähre Bahn des KSP. Lediglich am Ende des Niederwurfs kommt es zu einer Rotation, sodass die Lage des KSP und die Markierung nicht mehr übereinstimmen. Der Koordinatenursprung wurde an die Fußunterkante auf Höhe des Knöchels zum Zeitpunkt $t = 0s$ gelegt. Als Vergleichslänge zur Umrechnung der Werte aus dem Video wurde die blaue Matte (Länge: 1m), auf der der Wurfansatz stattfindet, genutzt. Das folgende Diagramm zeigt die gemessenen Koordinaten der beiden Markierungen.

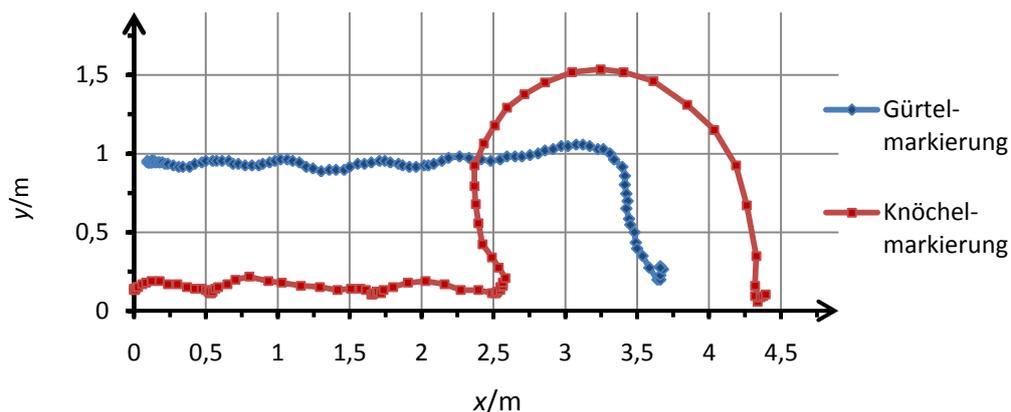


Abbildung 4.23: Das x-y-Diagramm zum beidhändigen Schulterwurf (CD40).

Anhand des Diagramms lassen sich hauptsächlich zwei Sachverhalte feststellen. Die Markierung am Gürtel hebt sich während des Wurfes kaum gegenüber der Höhe während des Gehens. Das bedeutet auch, dass Ukes KSP während des Wurfes kaum angehoben wird. *Tori* wirft also mit einem geringen Energieaufwand für die Hubarbeit. Zwischen dem Maximalwert der Markierung (1,06m) und dem Minimalwert während des Gehens (0,89m) liegt eine Höhendifferenz von 17cm. Bei einem Gewicht *Ukes* von etwa 70kg ergibt sich eine maximale Hubarbeit von:

$$W = 70\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,17\text{m} \approx 116,74\text{J} \quad (4.6)$$

Dieser Wert kann lediglich eine Abschätzung sein, da die Höhe des KSP während des Niederwurfs tendenziell sogar niedriger liegt als die Markierung (vgl. Abbildung 4.24).

Des Weiteren beschreibt die Markierung am Knöchel während der ersten Phase des Niederwurfes annähernd eine Kreisbahn. Werden die Datenpunkte über ein Standbild gelegt, lässt sich die ungefähre Lage der Rotationsachse für diese Bewegung finden (Abbildung 4.24).

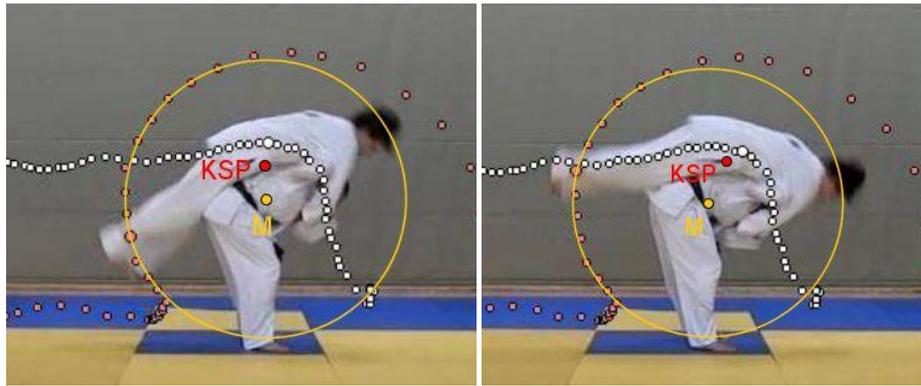


Abbildung 4.24: Der Mittelpunkt der Kreisbahn der Knöchelmarkierung (M) und die Lage von Ukes KSP zu zwei Zeitpunkten während der ersten Phase des Niederwurfs (CD41, CD42).

Es ist zu erkennen, dass die Rotationsachse nahe an Ukes KSP liegt. Je näher die Rotationsachse am KSP liegt, desto geringer wird nach dem Satz von Steiner (2.18) das Trägheitsmoment. Abbildung 4.24 zeigt aber auch, dass dieser Abstand während der Rotation größer wird. Das Trägheitsmoment Ukes nimmt folglich zu. Die Veränderung der Kreisbahn im weiteren Verlauf des Wurfs spricht für eine Veränderung der Rotationsachse. Dies ist damit zu erklären, dass Uke neben der Rotation durch den Zug Toris auch eine überlagernde Translationsbewegung vollführt. Die Rotationsachse dürfte sich im Verlauf des Wurfs zu Toris Schulter hin bewegen.

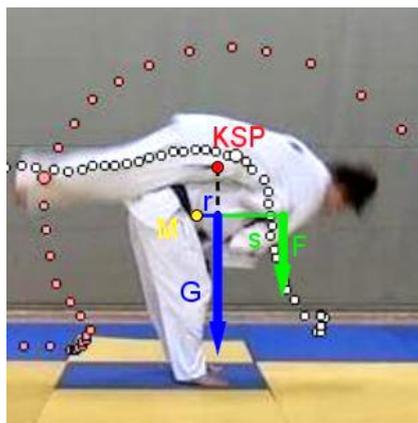


Abbildung 4.25: Während des Wurfs entstehen durch Ukes Gewicht und Toris Zug zwei Drehmomente.

Die zunehmende Entfernung von Ukes KSP zur Rotationsachse verursacht aber auch ein zusätzliches Drehmoment (Abbildung 4.25). Wenn r den horizonta-

len Abstand von *Ukes* KSP zur Rotationsachse bezeichnet, beträgt das Drehmoment:

$$D_G = G \cdot r \quad (4.7)$$

Dieses Drehmoment verstärkt das Drehmoment

$$D_F = F \cdot (r + s) \quad (4.8)$$

durch *Toris* Zug noch zusätzlich. *Uke* wird also auch aufgrund seines eigenen Gewichts geworfen.

Anhand des gleichmäßigen Abstandes der Punkte in der ersten Wurfphase lässt sich zudem erkennen, dass *Uke* mit einer annähernd konstanten Winkelgeschwindigkeit rotiert.

Eine weitere Beobachtung ergibt sich aus der Betrachtung des Zeit-Weg-Diagrammes in *x*-Richtung (Abbildung 4.26). Insgesamt lässt sich auf diesem Diagramm auch der Ablauf des Gehens gut erkennen. Während sich der Oberkörper recht gleichmäßig vorwärts bewegt, bewegt sich der Fuß in Intervallen. Zunächst befindet er sich vor dem Oberkörper und wird dann von diesem überholt.

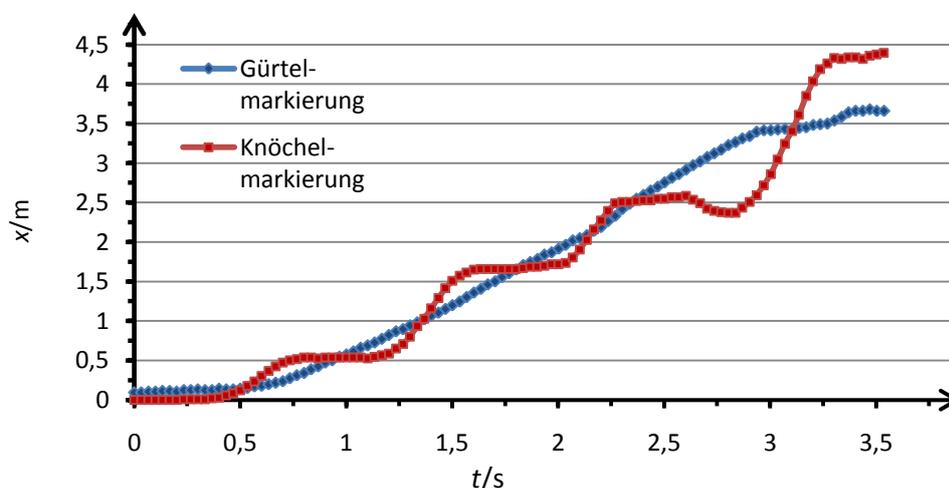


Abbildung 4.26: Das Zeit-Weg-Diagramm der *x*-Richtung für beide Markierungspunkte (CD40).

Tori dreht sich etwa nach 2,3s in den Wurf ein. Zu diesem Zeitpunkt bewegt sich die Gürtelmarkierung unverändert weiter. Der Schrittrhythmus des rechten Fußes wird, wie die Kurve zeigt, nicht gestört. Der linke, nicht markierte Fuß kann aber, wie auf dem Video zu erkennen ist, seinen Schritt nicht ver-

vollständigen. Zusammen hat dies zur Folge, dass *Uke* sein Gleichgewicht verliert. Sein KSP bewegt sich über die Unterstützungsfläche nach vorne (Abbildung 4.27). Das entstehende Drehmoment nutzt *Tori* für den Wurfansatz.

Schließlich bewegen sich die Füße beim Wurfansatz zurück und diese Unterstützungsfläche geht ganz verloren. Hier wird ein Judoprinzip besonders deutlich: *Tori* stoppt *Uke* nicht ab, sondern nutzt dessen Bewegung, um ihn werfen zu können.



Abbildung 4.27: Während des Wurfansatzes verliert Uke sein Gleichgewicht. Sein KSP liegt vor seinen Füßen (CD43).

Der Blick auf die Geschwindigkeiten bestätigt diese Beobachtungen (Abbildung 4.28). Hier ist sogar noch zu erkennen, dass die Gürtelmarkierung während des Wurfansatzes schneller wird. Dies ist auf eine Zugbewegung *Toris* im Wurfansatz zurückzuführen.

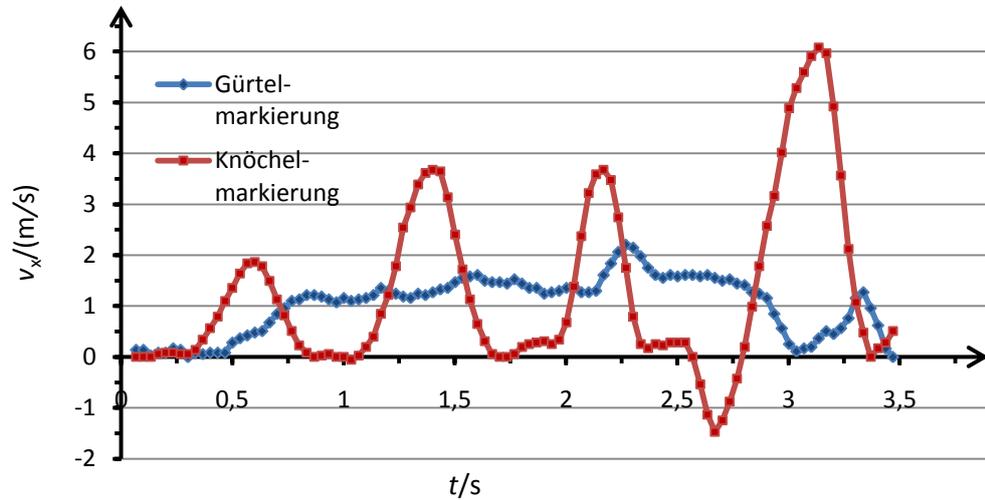


Abbildung 4.28: Die Geschwindigkeiten der beiden Markierungen in x -Richtung. Die Werte stammen aus einer Interpolation fünften Grades (CD40).

Der kurze Zeitpunkt bei etwa 3s, an dem für die Gürtelmarkierung $v_x \approx 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ gilt, stellt den Moment dar, an dem *Uke* während des Niederwurfs senkrecht nach unten fällt. Etwa zeitgleich ist der Wert für die Knöchelmarkierung am höchsten. Die Füße befinden sich am höchsten Punkt ihrer Kreisbahn. Dementsprechend haben sie dabei auch ihre größte Geschwindigkeit in horizontaler Richtung.

Auch die Geschwindigkeiten in y -Richtung für die Knöchelmarkierung entsprechen einer Kreisbewegung (Abbildung 4.29). So ist zu dem Zeitpunkt der maximalen Geschwindigkeit in x -Richtung diejenige in y -Richtung null.

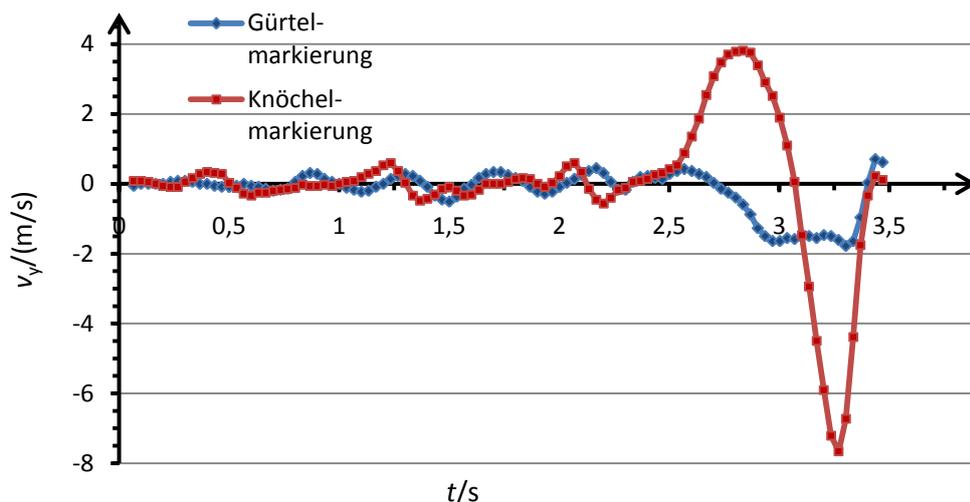


Abbildung 4.29: Die Geschwindigkeiten der beiden Markierungen in y -Richtung. Die Werte stammen aus einer Interpolation fünften Grades (CD40).

Für die Werte der Beschleunigung in y -Richtung (Abbildung 4.30) wurde ebenfalls eine Interpolation fünften Grades durchgeführt. Der Blick auf diese Werte zeigt ein gut abgestimmtes Timing im Wurfansatz.

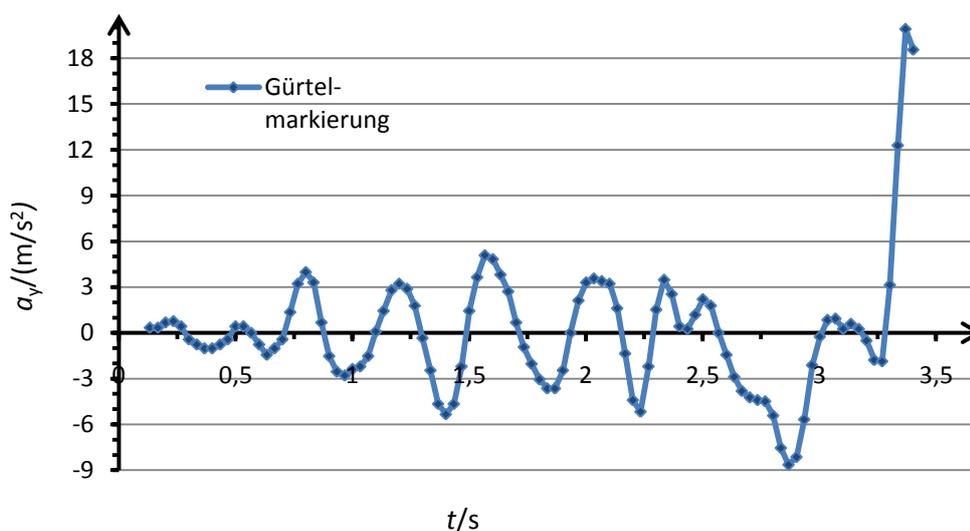


Abbildung 4.30: Die Beschleunigung in y -Richtung für den Markierungspunkt am Gürtel. Die Werte stammen aus einer Interpolation fünften Grades (CD40).

Die ersten Maxima und Minima der Beschleunigung sind auf die Auf- und Abbewegung durch *Ukes* Schritte zurückzuführen. Das letzte Maximum bei etwa 2,3s fällt gerade mit dem Eindrehen und dem Wurfansatz *Toris* zusammen. *Tori* passt mit dem Wurf also gerade den Moment ab, an dem *Uke* auf-

grund seines Schrittrhythmus nach oben beschleunigt. Dementsprechend einfacher hat es *Tori*, *Uke* nach vorne oben aus dem Gleichgewicht zu bringen. Die hohen Beschleunigungswerte ab 3,3s sind auf den Aufprall zurückzuführen. *Ukes* Fall wird innerhalb einer kurzen Zeitspanne abgebremst. Direkte Rückschlüsse auf die Kräfte, die beim Aufprall wirken, sind jedoch ohne Weiteres nicht möglich, weil der menschliche Körper nicht starr ist. Es ist also nicht feststellbar, welche Masse mit dieser Beschleunigung abgebremst wird. Diese Körperteilmasse wird auf jeden Fall mit einer Beschleunigung, die ungefähr $2g$ (interpolierter Wert) entspricht, abgebremst. Bei einer Bestimmung der Kraft beim Aufprall ist zu berücksichtigen, dass nicht alle Körperteile gleichzeitig aufkommen und nicht gleich abgebremst werden. Vielmehr kann man den Menschen mit einem Modell elastisch miteinander verbundener Massenpunkte wie in Abbildung 4.31 vergleichen.

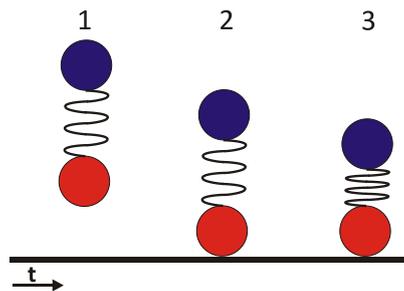


Abbildung 4.31: Über eine Feder verbundene Massenpunkte während eines Aufpralls.

Während des Fallens bewegen sich beide Massenpunkte mit der Geschwindigkeit des Schwerpunktes v_S (Zeitpunkt 1). Der rote Massenpunkt trifft zum Zeitpunkt 2 zuerst auf den Untergrund und wird unmittelbar auf $v = 0$ abgebremst. Der blaue Massenpunkt bewegt sich zunächst noch unverändert weiter. Er wird durch die Federkraft der Verbindung zwischen den beiden Massenpunkten kontinuierlich abgebremst, bis die Federkraft der Gewichtskraft des Massenpunktes entspricht (Zeitpunkt 3). Für diese Bewegung gilt die Bewegungsgleichung eines harmonischen Oszillators

$$m\ddot{x} = -kx \quad (4.9)$$

mit der Federkonstanten k für die Verbindung der Massenpunkte. Über den Lösungsansatz

$$x(t) = A_0 \sin(\omega t) \quad (4.10)$$

ergibt sich für die Geschwindigkeit des zweiten Massenpunktes:

$$v(t) = A_0\omega \cdot \cos(\omega t) . \quad (4.11)$$

Der Ausdruck $A_0\omega$ ist dabei als v_S aufzufassen und $x(t = 0) = 0$ entspricht der Feder im Gleichgewicht.

Für den Aufprall mehrerer Massenpunkte ergibt sich dann das Bild eines Kraftstoßes (vgl. Abbildung 2.6 und Abbildung 4.35). Beim Menschen ist der Ablauf des Aufpralls bedingt durch die Anzahl der Massenpunkte, der Verbindung zu benachbarten Massenpunkten, der Reibung sowie das zeitlich versetzte Aufkommen komplizierter als in diesem Beispiel.

Das Zutreffen des Modells elastisch verbundener Massenpunkte lässt sich auch anhand der Messdaten oder direkt im Video beobachten. Nach dem Aufprall bewegt sich Ukes Oberkörper wieder leicht nach oben wie bei einer stark gedämpften Schwingungsbewegung.

Unter der vereinfachenden Annahme eines Massenpunktes kann über die kinetische Energie und den Bremsweg s leicht auf die insgesamt wirkende durchschnittliche Bremskraft geschlossen werden:

$$\bar{F}_{Brems} = \frac{E_{kin}}{s} \quad (4.12)$$

Für die Geschwindigkeit kann die Geschwindigkeit des Schwerpunktes v_S vor dem Aufprall angenommen werden. Die Geschwindigkeit der Gürtelmarkierung kann hier nicht verwendet werden, da Uke vor dem Aufprall rotiert und die Markierung nicht mehr mit der Lage des KSP gleichgesetzt werden kann. Unter der Annahme eines freien Falls ohne Rotation lässt sich die Geschwindigkeit aus der Fallhöhe ermitteln. Hierbei kann es sich aber auch nur um eine Näherung handeln, da neben der Reibung auch von *Tori* zusätzlich ausgeübte Kräfte vernachlässigt werden.

Aus der Videoanalyse kann auf eine Fallhöhe des KSP von etwa 0,9m geschlossen werden. Für die Dauer des Fallens ergibt sich mit Gleichung (2.5):

$$\begin{aligned} t &= \sqrt{\frac{2s}{g}} & (4.13) \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 0,9\text{m}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \approx 0,43\text{s} \end{aligned}$$

Nach Gleichung (2.3) ist dann

$$v = g \cdot t \quad (4.14)$$

$$= 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,43\text{s} \approx 4,22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Nach Gleichung (2.24) berechnet sich die kinetische Energie bei einer Masse U_{kes} von 70kg zu

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot 70\text{kg} \cdot \left(4,22 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \approx 623,29\text{J}.$$

Der Bremsweg lässt sich über die Dicke der Matten abschätzen. Judomatten haben typischerweise eine Dicke von 4cm. Davon ausgehend, dass die gesamte Mattendicke als Bremsweg genutzt wird und dass dabei eine konstante Kraft wirkt, beträgt die durchschnittliche Bremskraft

$$\bar{F}_{\text{Brems}} = \frac{623,29\text{J}}{0,04\text{m}} \approx 15582\text{N}.$$

Bei diesem hohen Wert kann es sich aufgrund der vielen Vereinfachungen lediglich um eine grobe obere Abschätzung handeln. Hinzu kommt noch, dass sich die Kraft auf eine größere Fläche verteilt, wie im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

4.3 Fallübung

Zweck der Fallübungen (jap.: *Ukemi*) ist es, das Aufschlagen des Körpers auf der Matte nach einer Wurftechnik so zu gestalten, dass es nicht schmerzhaft ist oder gar zu Verletzungen führt.



0,403s

0,950s

1,147

1,183s

1,333s

Abbildung 4.32: Das Fallen während eines Wurfes (CD44).

Dieses Ziel wird durch mehrere Handlungen erfüllt. Generell darf nicht versucht werden, den Fall durch Abstützen mit den Händen oder dem Ellenbogen abzufangen. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, können je nach U_{kes}

Gewicht und der Wurfhöhe große Kräfte auf Uke beim Aufprall einwirken. Stützt sich Uke ab, wirkt die Kraft beim Aufprall auf die relativ kleine Fläche einer Hand oder eines Ellenbogens. Es kommt gemäß der Definition des Drucks nach Gleichung (2.10) zu einem sehr großen Druck. Das Verletzungsrisiko liegt so deutlich höher, da die Gelenke und Knochen diesem Druck eventuell nicht mehr standhalten können. Aus diesem Grund wird ein Judoka immer versuchen, mit einer möglichst großen Körperfläche auf dem Boden aufzukommen. Dies kann beispielsweise der Rücken oder auch wie in Abbildung 4.32 die gesamte Körperseite sein.

Das Auftreffen mit dem Rücken und insbesondere der Seite bietet zudem den Vorteil, dass eine, im Vergleich zum Kopf oder Ellenbogen, große Stauchung ohne Verletzungen möglich ist. Der Bremsweg ist somit größer und nach Gleichung (4.12) wirkt dann bei gleichbleibender Energie eine geringere Bremskraft beim Aufprall.

Auch *Tori* hat die Aufgabe, den Aufprall *Ukes* im Training zu unterstützen. Er soll das Aufkommen in einer geeigneten Position unterstützen und durch einen Zug am Ärmel die Wucht des Aufpralls verringern.

Die Fallübungen beinhalten zudem das Üben einer abrollenden Bewegung. Dieses Abrollen soll den fallenden Körper abfangen (Lehmann & Müller-Deck, 1989). Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Fallübung zur Seite durch ein Abrollen tatsächlich eine geringere Krafteinwirkung auf die Hüfte vorliegt (Groen, Weerdesteyn, & Duysens, 2007).

Eine weitere Handlung besteht im Abschlagen. Unter Abschlagen wird im Judo das kräftige Aufschlagen des Armes kurz vor oder zeitgleich zum Aufprall des Körpers verstanden. Der Arm ist dabei gestreckt und bildet mit dem Oberkörper einen spitzen Winkel. Beim Fallen auf die Seite wird mit einem Arm, beim Fallen auf den Rücken mit beiden Armen abgeschlagen. Im Training und auch in der Literatur wird das Abschlagen besonders hervorgehoben: „Der Aufprall des Körpers wird durch einen federnden Armschlag abgefangen“ (Lehmann & Müller-Deck, 1989, S. 29).

Bei der Fallübung rückwärts (Abbildung 4.33) wird mit beiden Armen neben dem Oberkörper abgeschlagen. Die Arme sind dabei so angewinkelt, dass die Hände ungefähr auf Gürtelhöhe aufkommen.



Abbildung 4.33: Eine Fallübung rückwärts. Es wird mit beiden Armen ungefähr auf Gürtelhöhe abgeschlagen (CD45).

Ohne Abschlagen wäre die Aufprallfläche der Rücken. Durch das Abschlagen mit beiden Armen wird die Aufprallfläche deutlich vergrößert. Somit verteilt sich die Kraft beim Aufprall auf eine größere Fläche und der Druck auf einzelne Körperpartien ist geringer (Mathelitsch & Thaller, 2008). Die Flächenvergrößerung kann mit den Werten der Körpermaße aus Abbildung 3.2 abgeschätzt werden. Für den Oberkörper wird eine trapezförmige Fläche angenommen. Für diese gilt dann in Abhängigkeit der Körpergröße H :

$$A_{OK} = \frac{(0,259H + 0,191H)}{2} \cdot 0,338H$$

$$\approx 0,076H^2$$

Bei einer Körpergröße von 1,8m sind dies ungefähr $0,246\text{m}^2$. Die Armlänge inklusive der Hände wird für einen hängenden Arm mit $0,441H$ angegeben. Umgerechnet auf die Körpergröße ergibt sich eine Länge von 0,794m. Unter der Annahme eine durchschnittlichen Breite des Armes und der Hand von 8cm beträgt die Fläche für einen Arm zusammen mit der Hand

$$A_A = 0,794\text{m} \cdot 0,08\text{m} \approx 0,064\text{m}^2.$$

Da bei der Fallübung rückwärts mit beiden Armen abgeschlagen wird, kommt es zu einer relativen Flächenvergrößerung von

$$\Delta A_{rel} = \frac{2 \cdot 0,064\text{m}^2}{0,246\text{m}^2} \approx 0,52$$

in Bezug auf die Fläche des Oberkörpers. Es liegt also tatsächlich eine deutliche Flächenvergrößerung vor. Es muss bei diesem Wert berücksichtigt werden, dass die Längenmaße statistische Werte sind und dass sich der Körper beim Aufprall zusätzlich noch verformt.

Im Folgenden soll der Einfluss des Abschlagens auf den Aufprall des Oberkörpers untersucht werden. Um zu aussagekräftigen Ergebnisse zu kommen, kann nicht die Fallübung nach einem Wurf untersucht werden. Bei einem Wurf kommen mehrere Einflussfaktoren zusammen, die einen Vergleich der einzelnen Messungen unmöglich machen. Allein das Treffen der Messplatten mit der gleichen Körperpartie würde sich schwierig gestalten. Zudem wären die Bewegungen und die durch *Tori* zusätzlich ausgeübten Kräfte bei jeder Messung anders. Auch ein einfaches Fallen aus dem Stand kommt nicht in Frage, da hier ebenfalls durch unterschiedliches Beugen der Knie und Abdrücken der Füße vom Boden eine Vergleichbarkeit der Messungen nur sehr beschränkt gegeben wäre. Daher findet die Messung von einer Sitzbank aus statt. Dies bietet gegenüber der Variante aus dem Stehen den zusätzlichen Vorteil, dass es zu einer Rotation um die Körperlängsachse kommt. Bei vielen Würfen tritt diese Rotation ebenfalls auf (vgl. Abbildung 4.32 und CD46).

Für die Messungen wurden zwei Kraftmessplatten mit Adapter, ein NXT-Stein, eine Sitzbank sowie ein Computer mit dem Programm ‚Kraftmessplatte2‘ verwendet.

Die Messungen unterteilen sich in drei Durchgänge zu je zehn Messungen. Im ersten Durchgang war der Arm, der abschlagen würde, am Körper angelegt. Im zweiten Durchgang wurde der Arm wie zum Abschlagen vom Körper weggestreckt, es wurde jedoch nicht abgeschlagen. Die zweite Kraftmessplatte wurde so platziert, dass die Hand auf ihr landete. Im dritten Durchgang wurde schließlich auf der zweiten Platte abgeschlagen (Abbildung 4.34). Da die Platten auf den Judomatten stehen, berührt der Arm die Matten nicht. Als Flächenvergrößerung ergibt sich lediglich die Fläche der Hand auf der zweiten Messplatte.



Abbildung 4.34: Der Ablauf einer Messung im dritten Durchgang (CD47).

In allen Durchgängen wurde der Aufprall des Oberkörpers im Bereich des oberen Brustkorbs/der Schulter untersucht. Nach dem Abrollen aus der Seitenlage auf einer Sitzbank fand der Aufprall auf einer Kraftmessplatte statt. Da bei jeder Messung die Bewegung dennoch nicht identisch zu den anderen abläuft und einmalige Effekte auftreten können, erlauben zehn Messungen je Messreihe einen aussagekräftigeren Vergleich über die jeweiligen Mittelwerte.

Beim Fallen von der Bank liegt eine Überlagerung einer Translationsbewegung nach unten und einer Rotation vor. Es wird nach der Energieerhaltung potenzielle Energie in kinetische Energie und Rotationsenergie umgewandelt (unter der Vernachlässigung von Reibung). Wird der Höhe der Messplatte die Nulllage der potenziellen Energie zugewiesen, ergibt sich:

$$E_{pot} = E_{kin} + E_{Rot}. \quad (4.15)$$

Beim Aufprall wird diese Energie in Verformungsarbeit umgewandelt. Die Messkurven der Kraftmessplatten zeigen dabei den Verlauf eines Kraftstoßes (Abbildung 4.35).

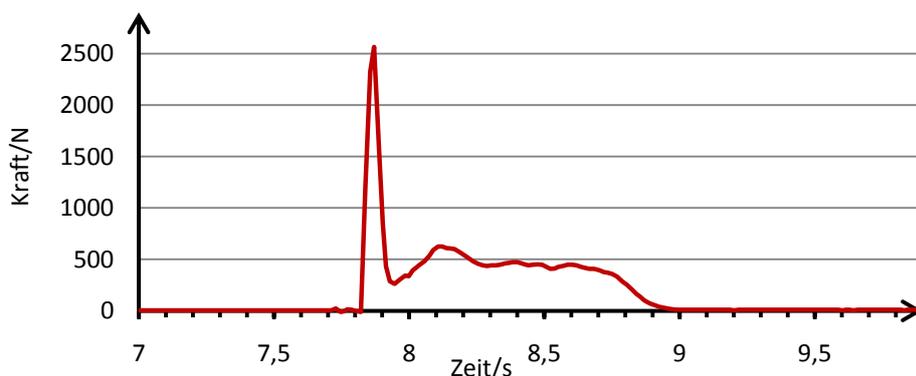


Abbildung 4.35: Eine Messung aus der ersten Messreihe. Es ist deutlich der Kraftstoß beim Auftreffen auf der Messplatte zu erkennen (CD48).

In einem kurzen Zeitintervall wird der Oberkörper abgebremst und sein Impuls wird null. Auch das Nachschwingen nach dem eigentlichen Aufprall ist zu

erkennen: Die Messwerte fallen direkt nach dem Kraftstoß unter den Wert, der aufgrund der Gewichtskraft eigentlich erreicht werden müsste und steigen kurz wieder an. Der Wert für die Gewichtskraft ist anhand des annähernd konstanten Verlaufs der Kurve nach dem Abklingen der Schwingung zu erkennen.

Legt man die Werte aus Abbildung 4.35 zugrunde, ergibt sich für den Kraftstoß:

$$F \cdot \Delta t = \Delta p = 2500\text{N} \cdot 0,1\text{s} = 250\text{Ns}$$

Zum Vergleich lässt sich der Impuls beim Aufprall berechnen. Für die Geschwindigkeit des Oberkörpers kann die Geschwindigkeit des KSP angenommen werden. Diese ergibt sich aus der Energieerhaltung. Für den Impuls gilt also:

$$p = m \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (4.16)$$

Mit den Werten für Masse und Fallhöhe ist

$$\begin{aligned} p &= 92\text{kg} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,42\text{m}} \\ &\approx 264 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 264\text{Ns} \end{aligned}$$

Die Größe dieses Impulses entspricht auch der Größe der Impulsänderung beim Aufprall. Das Ergebnis deckt sich mit dem aus den Messdaten ermittelten Wert für den Kraftstoß.

Für die weitere Auswertung der Messungen sind lediglich die maximalen Kräfte von Interesse, da diese auch über eine eventuelle Verletzung entscheiden. Abbildung 4.36 zeigt eine grafische Übersicht dieser Maximalwerte aus den Messungen der drei Durchgänge. Die vollständigen Messwerte befinden sich auf der beiliegenden CD (CD48).

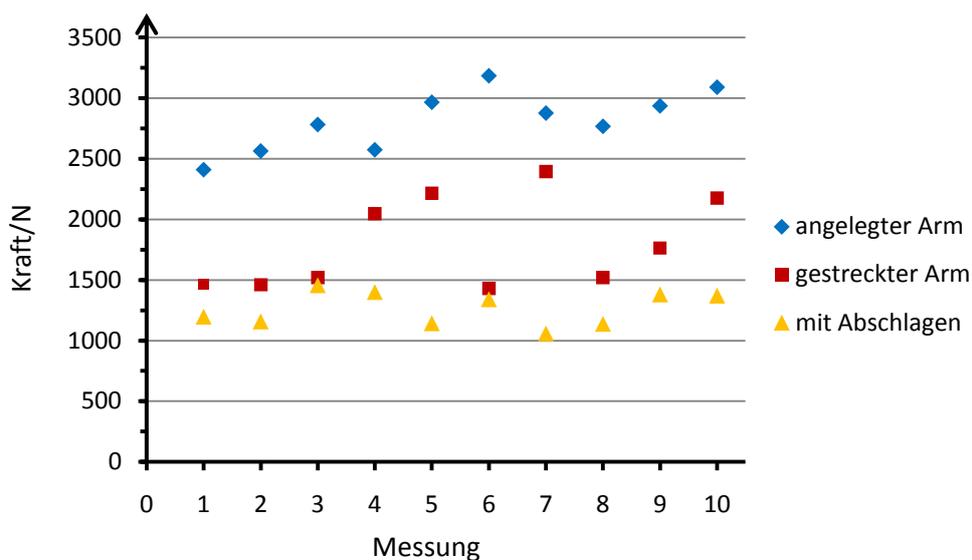


Abbildung 4.36: Gemessene Maximalkräfte am Oberkörper beim Aufprall (CD48).

Trotz der Schwankungen innerhalb der einzelnen Messreihen ist bereits ein klarer Trend zu erkennen. Die beim Aufprall auf den Oberkörper wirkenden Kräfte nehmen durch Strecken eines Armes ab. Durch das Abschlagen wird dieser Effekt noch verstärkt. Besonders deutlich wird dies bei Betrachtung der Mittelwerte der Messreihen (Tabelle 4.3 und Abbildung 4.37).

Tabelle 4.3: Mittelwerte und Standardabweichungen der drei Messreihen für das Fallen (Werte für den Oberkörper) (CD48).

Messreihe	angelegter Arm	gestreckter Arm	mit Abschlagen
Mittelwert	2815N	1800N	1265N
Standardabweichung	246N	372N	140N

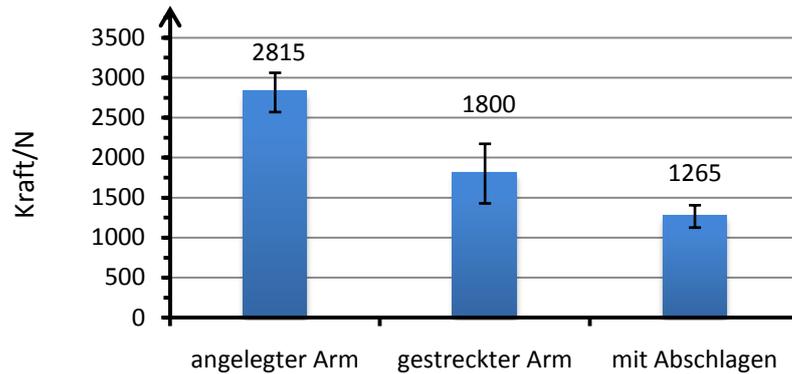


Abbildung 4.37: Grafische Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Kräfte auf den Oberkörper für die drei Messreihen (CD48).

Auch unter Berücksichtigung der einfachen Standardabweichungen nach oben und unten unterscheiden sich die Mittelwerte der drei Messreihen. Dem Strecken des Armes und dem Abschlagen kann also aufgrund der Messdaten tatsächlich eine Wirkung auf den Aufprall zugesprochen werden. Die auf den Oberkörper wirkenden Kräfte werden durch das Abschlagen gegenüber einem Fallen mit angelegtem Arm im Durchschnitt mehr als halbiert.

Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Messreihen mit angelegtem Arm und mit gestrecktem Arm lassen sich über ein verändertes Trägheitsmoment erklären. Das Strecken des Armes führt zu einem größeren Trägheitsmoment (vgl. Abbildung 2.5). Somit wird im Vergleich zum Fallen mit angelegtem Arm ein größerer Teil der potenziellen Energie in Rotationsenergie umgewandelt (vgl. Gleichung (4.15)). Entsprechend wird ein kleinerer Teil in kinetische Energie für die Translationsbewegung umgewandelt und die Kräfte auf den Oberkörper beim Aufprall sind geringer. Durch das Strecken des Armes wird die Aufprallfläche vergrößert. Jedoch ist die Fläche recht gering, da nur die Fläche der Hand hinzukommt. Dies wird weiter durch die gemessenen maximalen Kräfte der zweiten Platte unterstützt. Die Ergebnisse für Mittelwert und Standardabweichung für diese Messwerte sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.4: Mittelwerte und Standardabweichungen für die von der Hand ausgeübten Kräfte (CD48).

Messreihe	gestreckter Arm	mit Abschlagen
Mittelwert	95N	499N
Standardabweichung	56N	128N

Werden die Mittelwerte für Oberkörper und Hand der zweiten und dritten Messreihen addiert, liegen diese dicht beieinander: 1895N für die Mittelwerte mit gestrecktem Arm und 1764N für diejenigen mit Abschlagen. Der Mittelwert der Kräfte an der Hand bei einem gestreckten Arm entspricht lediglich 5,0% dieser Summe, während es für die Messreihe mit Abschlagen 28,3% sind. Trotz der eher großen Standardabweichungen der von der Hand ausgeübten Kräfte wird deutlich, dass das Strecken des Armes und die damit einhergehende Flächenvergrößerung nicht die wesentlich geringeren Kräfte am Oberkörper erklären können.

Durch das Abschlagen werden die Kräfte am Oberkörper noch einmal verringert. Dies lässt sich über die Impulserhaltung erklären. Hand und Körper haben beide die Schwerpunktgeschwindigkeit v_S . Eigentlich hat die Hand aufgrund der Rotation die Geschwindigkeit

$$v_{Hand} = v_S + \omega \cdot R \quad (4.17)$$

wobei ω die Winkelgeschwindigkeit und R die Länge des Arms bezeichnet. Diese Geschwindigkeit hat sie aber sowohl bei einem rein gestreckten Arm als auch beim Abschlagen. Für die Erklärung wird die Rotationsbewegung außer Acht gelassen und von einem rotationsfreien, senkrechten Fall ausgegangen. Der Gesamtimpuls p_{ges} ergibt sich aus der Geschwindigkeit des Schwerpunktes vor dem Aufprall und der Körpermasse $m_{Körper}$:

$$p_{ges} = m_{Körper} \cdot v_S \quad (4.18)$$

Die Körpermasse lässt sich aufteilen in die Masse der abschlagenden Hand m_{Hand} und die Masse des restlichen Körpers $m'_{Körper}$. Also ist

$$p_{ges} = (m'_{Körper} + m_{Hand}) \cdot v_S \quad (4.19)$$

Dadurch, dass die Hand zum Abschlagen schneller bewegt wird, erhöht sich ihre Geschwindigkeit um Δv . Aufgrund der Impulserhaltung muss sich dementsprechend die Geschwindigkeit des Körpers um $\Delta v'$ ändern, sodass gilt:

$$m'_{\text{Körper}} \cdot \Delta v' - m_{\text{Hand}} \cdot \Delta v = 0 \quad (4.20)$$

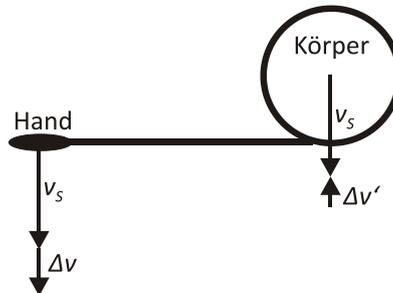


Abbildung 4.38: Die Effekte des Abschlagens sind durch die Impulserhaltung zu erklären. Die Hand erhält durch das Abschlagen eine zusätzliche Geschwindigkeit Δv . Dementsprechend verringert sich die Geschwindigkeit des Oberkörpers um $\Delta v'$.

Für den Gesamtimpuls bedeutet dies, dass

$$p_{\text{ges}} = m'_{\text{Körper}} \cdot (v_s - \Delta v') + m_{\text{Hand}} \cdot (v_s + \Delta v) \quad (4.21)$$

gilt. Der Impuls des Körpers nimmt also einen geringeren Anteil am Gesamtimpuls ein. Dementsprechend ist auch die Impulsänderung beim Aufprall des Oberkörpers geringer. Mit einer konstanten Zeitspanne Δt für den Kraftstoß beim Aufprall folgt eine geringere Kraft.

4.4 Bodentechniken

Die Gruppe der Bodentechniken im Judo ist sehr umfangreich. Neben einer Vielzahl von Techniken stellen sich auch die Bewegungsabläufe unter physikalischen Gesichtspunkten als sehr komplex dar. Den Partner auf den Rücken zu drehen und dann festzuhalten, erfordert Kenntnisse aus dem Bereich Schwerpunkt und Unterstützungsfläche. Neben den Beinen und Füßen sind hier auch die Arme und Hände, mitunter sogar der Kopf, für eine stabile Position entscheidend. Aber auch Drehmomente und Trägheitsmomente spielen eine große Rolle. Anders als im Stehen liegt dabei nicht nur eine aufrechte bzw.

gestreckte Körperhaltung vor. Die Anzahl möglicher Drehachsen und damit verbundener Trägheitsmomente ist erheblich größer.

Für eine Beschreibung und Auswertung mit Foto- und Videoaufnahmen von Bodentechniken kommt erschwerend hinzu, dass die Bewegungsabläufe deutlich unübersichtlicher als im Stand sind und sich nicht in einer Ebene zur Kamera abspielen. Auch die Verwendung der Messgeräte bietet sich nicht an. Die folgenden Betrachtungen beschränken sich daher auf Armhebel und einen Bewegungsablauf zur Befreiung aus einem Haltegriff. Bei beiden Techniken sind die dahinter stehenden physikalischen Prinzipien noch gut zu erkennen.

4.4.1 Armhebel

Im Judo lassen sich zwei Kategorien von Armhebeln unterscheiden. Die Beugehebel werden am angewinkelten Ellenbogengelenk und die Streckhebel entsprechend am gestreckten Ellenbogengelenk angesetzt. Bei Streckhebeln wird das Ellenbogengelenk überstreckt, sodass der entstehende Schmerz *Uke* zum Aufgeben zwingt. Ein Beispiel für einen Streckhebel ist der Armhebel mit der Seite (jap.: *Ude-hishigi-waki-gatame*) wie er in Abbildung 4.39 dargestellt ist.



Abbildung 4.39: Ein Armhebel mit der Seite. Die Körperseite stellt den Fixierpunkt dar. Die Hebelwirkung entsteht durch das nach oben Drücken von Ukes Hand.

Ein gestreckter Armhebel entspricht einem zweiarmigen Hebel im physikalischen Sinne. Es wird oberhalb des Ellenbogens ein Unterstützungspunkt geschaffen und auf den Unterarm eine Kraft in Richtung des kleinen Fingers oder des Handrückens ausgeübt (Abbildung 4.40).

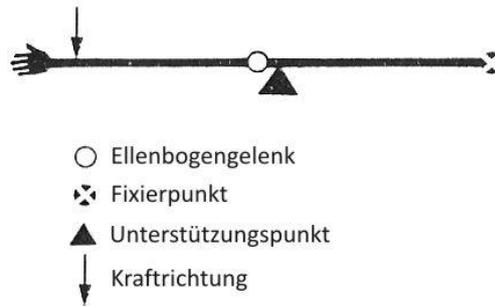


Abbildung 4.40: Schematische Darstellung eines Streckhebels (mod. nach Lehmann & Müller-Deck, 1989, S. 139).

Der Unterstützungspunkt entspricht dem Auflagepunkt des Hebels. Der Unterarm stellt den Kraftarm, der Oberarm den Lastarm und die Fixierung an der Schulter die Last dar. Aus dem Hebelgesetz wird unmittelbar klar, dass der Angriffspunkt der Kraft am besten weit entfernt zum Unterstützungspunkt, also nahe an der Hand wirken muss, damit der Armhebel möglichst effizient wird.

4.4.2 Befreiung aus einem Haltegriff

Ein Ziel in einem Bodenkampf kann es sein, den Partner in einem Haltegriff festzuhalten. Der Partner wird dann versuchen, sich aus dem Haltegriff zu befreien. Je nach Haltegriff stehen ihm dafür mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Der seitliche Vierpunkt-Haltegriff (jap.: *Yoko-shiho-gatame*) kann von *Tori* auf den Knien liegend (s. Abbildung 4.41, erstes Teilbild) oder mit gestreckten Beinen (s. Abbildung 4.42, erstes Teilbild) gehalten werden.



Abbildung 4.41: Die Befreiung aus einem, auf den Knien gehaltenen seitlichen Vierpunkthaltegriff. Durch den hohen Schwerpunkt *Toris* kann sich *Uke* durch Ausheben befreien (CD49).

Bei der Ausführung mit angezogenen Beinen liegt *Toris* KSP vergleichsweise hoch. Unter Gesichtspunkten der Stabilität ist diese Position für *Tori* nicht be-

sonders günstig. *Uke* kann es so gelingen, *Tori* unter Einsatz der Arm-, Rumpf- und Beinmuskulatur seitlich über sich zu heben.

Durch Strecken seiner Beine kann *Tori* seinen Schwerpunkt absenken und seine Stabilität erhöhen. Ein Ausheben wird so deutlich erschwert. Zudem ergibt sich ein deutlich größeres Trägheitsmoment für die zuvor verwendete Drehachse über die Schultern. Durch das Strecken der Beine hat sich der KSP nämlich auch weiter in Richtung von *Toris* Füßen verlagert. Der Abstand des KSP zur Drehachse hat sich folglich vergrößert. Nach dem Satz von Steiner (2.18) vergrößert sich damit auch das Trägheitsmoment deutlich.



Abbildung 4.42: Die Befreiung aus einem seitlichen Vierpunkthaltegriff mit gestreckten Beinen. Nach einer Lageänderung kann sich *Uke* durch Herumrollen befreien (CD50).

Uke muss nun versuchen, sich auf eine andere Weise aus dem Haltegriff zu befreien. Durch ein Heranziehen von *Toris* Beinen in Verbindung mit einer eigenen Drehung schafft es *Uke*, antiparallel zu *Tori* zu liegen. Für eine Rollbewegung zur Seite hat sich *Toris* Trägheitsmoment so deutlich gegenüber dem Wert für die Ausgangslage reduziert (vgl. Werte aus Abbildung 2.5). *Uke* kann sich nun mit einem geringen Aufwand zur Seite rollen, um sich zu befreien.

Zur Abschätzung des Verhältnisses der Trägheitsmomente zueinander werden vereinfachend zwei Kreiszyylinder mit identischem Radius r und identischer Höhe h sowie homogener Massenverteilung betrachtet. Würde *Uke* *Toris* Beine nicht heranziehen, müsste er diesen über die Schultern drehen (Fall a)). Durch das Heranziehen liegt *Toris* Rotationsachse auf der Körperlängsachse *Ukes* (Fall b)). Abbildung 4.43 zeigt die beiden Fälle für die Kreiszyylinder.

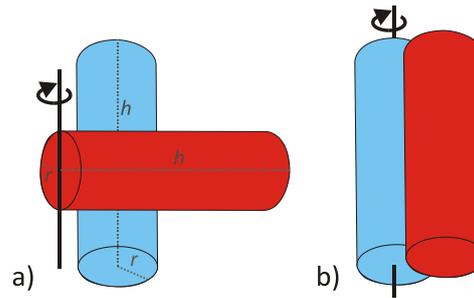


Abbildung 4.43: Die Fälle für die Befreiung aus dem seitlichen Vierpunkthaltegriff mit identischen Kreiszyindern dargestellt. Die Achsen zeigen die Rotationsachsen um die Tori jeweils gedreht werden muss.

Für Kreiszyylinder gelten die in der folgenden Abbildung dargestellten Trägheitsmomente.

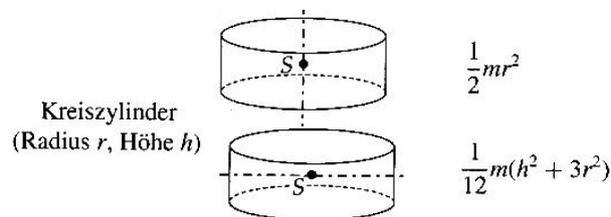


Abbildung 4.44: Die Trägheitsmomente eines Kreiszyinders mit homogener Massenverteilung für verschiedene Rotationsachsen (mod. nach Stöcker, 2007, S. 104).

Da sich *Uke* in beiden Fällen um seine Längsachse dreht, kann für den blauen Zylinder die erste Gleichung aus Abbildung 4.44 für das Trägheitsmoment direkt übernommen werden. Bei der Betrachtung *Ukes* ist also keine Unterscheidung zwischen Fall a) und b) erforderlich. Für *Tori* bzw. den roten Zylinder stellt sich die Situation anders dar. Hier verläuft die Rotationsachse nicht durch den Schwerpunkt. Mit den Gleichungen aus Abbildung 4.44 und dem Satz von Steiner (2.18) ergibt sich für den Fall a) ein Trägheitsmoment von

$$\begin{aligned}
 J_a &= \frac{1}{12}m(h^2 + 3r^2) + \frac{1}{4}mh^2 & (4.22) \\
 &= \frac{1}{3}mh^2 + \frac{1}{4}mr^2
 \end{aligned}$$

und für den Fall b) von

$$\begin{aligned}
 J_b &= \frac{1}{2}mr^2 + 4mr^2 & (4.23) \\
 &= \frac{9}{2}mr^2.
 \end{aligned}$$

Für die Körperbreite kann nach Abbildung 3.2 ein Wert $0,259H$ an den Schultern, von $0,174H$ am Brustkorb und von $0,191H$ an den Beinen angenommen werden (jeweils in Abhängigkeit von der Körpergröße H). Dies entspricht einer durchschnittlichen Breite von $0,208H$. Wird diese Breite als Wert für den Zylinderdurchmesser gewählt, gilt $h \approx 9,6r$. Der Vergleich der beiden Trägheitsmomente für einen abgerundeten Wert von $h = 9r$ ergibt:

$$J_a = 27mr^2 + \frac{1}{4}mr^2 = \frac{109}{4}mr^2 > \frac{18}{4}mr^2 = J_b \quad (4.24)$$

Das Trägheitsmoment J_a ist also etwa sechs Mal so groß wie das Trägheitsmoment J_b .

Natürlich handelt es sich weder bei *Uke* noch bei *Tori* um zwei identische Kreiszyylinder mit homogener Massenverteilung. Auch die Rotationsachsen können nicht als starr angenommen werden, da *Tori* und *Uke* auch keine starren Körper sind. Dennoch wird durch diese Abschätzung deutlich, dass durch das Heranziehen von *Toris* Beinen dessen Trägheitsmoment für eine Rollbewegung zur Seite geringer wird und so die Befreiung aus dem Haltegriff eher gelingen kann.

5 Konzeptionen für das Schülerlabor PiA

Wie das vorangegangene Kapitel zeigt, lassen sich in der Sportart Judo für einen großen Teil der klassischen Mechanik Anwendungen finden. Judo kann somit für eine Reihe von physikalischen Prinzipien als Kontext dienen.

Physiklernen im Kontext

Für das Lernen von Physik sind zwei Aspekte des Kontextbegriffs von besonderer Bedeutung und müssen aufeinander abgestimmt werden (Duit & Mikelskis-Seifert, 2007):

- Die Lernumgebung soll sich auf das Lernen förderlich auswirken.
- Ein fachlicher Inhalt kann „immer nur in einem für die Schülerinnen und Schüler relevanten Kontext gelernt werden“ (Duit & Mikelskis-Seifert, 2007, S. 4). Der Kontext sollte dabei aus Sicht der SuS sinnstiftend sein und auch eine ausreichende Bedeutung im Unterricht haben. Solche Kontexte können verschiedene Themen aus dem Alltag der SuS darstellen.

Sinnstiftende Kontexte erleichtern auf der einen Seite den Zugang zu fachlichen Inhalten, da den Schülerinnen und Schülern (SuS) deutlich wird, warum ein Thema für sie von Interesse ist. Auf der anderen Seite können die SuS anhand solcher Kontexte zentrale Kompetenzen einer naturwissenschaftlichen Grundbildung erlangen (Duit & Mikelskis-Seifert, 2007).

Eine besondere Sorgfalt ist bei der *Auswahl* der Kontexte geboten. Der physikalische Sachverhalt sollte sich deutlich erschließen (Müller, 2010).

Kontexte aus dem Alltag umfassen oft Probleme mit einem hohen Komplexitätsgrad und das Arbeiten mit ihnen kann deshalb sehr zeitintensiv sein. Daher muss eine Auswahl der Lerninhalte getroffen werden. Das Lernen erfolgt exemplarisch: „Lernen in Kontexten macht das exemplarische Lernen zu einer Notwendigkeit“ (Müller, 2010, S. 21).

Von Bedeutung ist auch die *Umsetzung* der Kontexte: „Die zu behandelnden Kontexte müssen so ausgewählt und elementarisiert werden, dass die Verzahnung Fachsystematik/Kontexte auch wirklich gelingt“ (Müller, 2010, S. 20).

Während die Fragestellungen möglichst authentisch sein sollen, ist jedoch das physikalische Thema einzugrenzen. Mit der Einarbeitung in den Kontext ist bereits ein hoher Zeitaufwand verbunden, sodass der Umfang der fachlichen Inhalte abzustimmen ist. Die Kontexte sollten zudem glaubwürdig und nicht nur vorgeblich sein (Müller, 2010).

Das Thema Sport kann einen sinnstiftenden Kontext darstellen. In der internationalen Vergleichsstudie ROSE (*Relevance of Science Education*) wurden die Einflussfaktoren naturwissenschaftlichen Lernens untersucht. Die Ergebnisse der deutschen ROSE-Erhebung zeigen, dass sich Jugendliche vor allem für Kontexte im Zusammenhang mit ihrem Körper und dessen Entwicklung interessieren. Mädchen zeigen ein großes Interesse für den Bereich Fitness. Bei den Jungen fällt das Interesse daran eher geringer aus (Elster, 2007).

Müller (2010) geht aufgrund von Studienergebnissen davon aus, dass der Themenbereich „Mensch und Natur“ im Physikunterricht dem Interesse von ungefähr drei Vierteln aller SuS entgegen kommt. Für diesen Bereich nennt er als Beispiele die Inhalte Medizin, Biologie und Sport. Er führt weiter aus, dass viele SuS Themen aus dem Kontext Sport interessant finden und sich von ihnen motivieren lassen (Müller, 2010). Die Beliebtheit des Sports und die damit einhergehenden positiven Gefühle können sich auf den Physikunterricht übertragen. SuS, die ein Interesse für Sport, aber nicht für Physik haben, können ein großes Engagement für die physikalische Beschreibung sportlicher Aktivitäten entwickeln (Schlichting, 1992; Labudde & Firmin, 2002).

Der Kontext Sport bietet neben diesen Vorzügen auch den Vorteil, dass sportliche Aktivitäten den eigenen Körper betreffen. Die Bewegungen erschließen neue Lernwege, die sonst in der Regel nicht genutzt werden. So kann die physikalische Beschreibung verschiedener Sachverhalte durch eigene Erfahrungen unterstützt werden. Mit dem eigenen Körper können physikalische Zusammenhänge erfahren, eingeschätzt und beurteilt werden. (Labudde & Firmin, 2002; Schlichting, 1992). Gerade diese eigenen Erlebnisse können Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen entgegen wirken. So sollte das Lernen neuer Sachverhalte immer mit konkreten Beispielen beginnen, die bislang fehlende Erfahrungen ermöglichen (Aufschnaiter & Rogge, 2009). Vor allem für Mäd-

chen ist für die Anbindung physikalischer Inhalte wichtig, dass sie auf Erfahrungen zurück greifen können, die sie selbst gemacht haben (Kircher, Girwidz, & Häußler, 2007).

Judo als Kontext

Sport, und somit auch Judo, kann daher einen Interesse weckenden Kontext für eine Lerneinheit des Schülerlabors darstellen. Für eine Umsetzung mit dem Kontext Judo sind jedoch aufgrund der vorhergehenden Darlegungen zwei grundlegende Aspekte von Bedeutung.

Zum einen muss die Komplexität des Kontextes bedacht werden. Für die Sportart Judo sind zwar viele physikalische Konzepte von Relevanz, jedoch sollten sie für die SuS auch ohne entsprechende Vorerfahrungen im Judo mit einem vertretbaren Aufwand zugänglich gemacht werden können. Viele Bewegungsabläufe im Judo sind aber vielschichtig oder beinhalten für Ungeübte ein Verletzungsrisiko. Sie können weder leicht nachgestellt noch analysiert werden. Sie scheiden somit für eine Umsetzung im Schülerlabor aus.

Zum anderen muss der fachliche Anspruch berücksichtigt werden. Die Zielgruppe des Schülerlabors sollen zunächst SuS der Sekundarstufe I sein. Im Judo gibt es viele Rotationsbewegungen und ungleichmäßig beschleunigte Bewegungen. Bei vielen der Bewegungsabläufe spielen Rotationen und Drehmomente eine wesentliche Rolle. Dies sind alles Themen, die inhaltlich dem Oberstufenunterricht zugeordnet sind. Bei einer Erstellung von Lerneinheiten aus diesem Bereich müssten folglich SuS der Sekundarstufe II als Zielgruppe gewählt werden.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird aufgrund der als fehlend angenommenen sportlichen Vorerfahrungen und aufgrund der zum Teil anspruchsvollen physikalischen Konzepte die Lerneinheit für die Sekundarstufe I auf die Themenbereiche Schwerpunkt und Gleichgewicht beschränkt. Dieser Themenbereich spielt, wie im vorangegangenen Kapitel dargelegt, im Judo eine herausragende Rolle. Judo kann demnach als Kontext für diesen Themenbereich gewählt werden. Spezielle Kenntnisse in Judo sind nicht erforderlich, sodass von Seiten des Kontextes keine besonders hohe Komplexität gegeben ist. Die SuS können hier gut eigene Erfahrungen sammeln.

Unter fachlichen Gesichtspunkten ist dieser Themenbereich für SuS der Sekundarstufe I geeignet. Insbesondere für die Gleichgewichtsbedingungen werden zwar Kräfte- und Drehmomentensummen benötigt, jedoch ist eine Betrachtung des Gleichgewichts vor allem in statischen Situationen auch ohne eine exakte physikalisch-mathematische Definition möglich. Vor allem grundlegende Sachverhalte in diesem Themenbereich lassen sich aus phänomenologischen Betrachtungen ableiten.

Zu weiteren Themenbereichen wie Geschwindigkeit und Beschleunigung, Energie, Kräfte, Drehmomente sowie Trägheitsmomente kann Judo ebenfalls ein geeigneter Kontext sein (vgl. Abschnitt 5.4). Allerdings sind dies teilweise Themen für die Oberstufe. Des Weiteren sind diese Themenbereiche auch mit vielen Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen verknüpft (s. Wodzinski, 2007; Nachtigall, 1986). So erscheint es sinnvoller, diese Themenbereiche zunächst anhand weniger komplexer Kontexte zu erarbeiten und eventuell erst anschließend auf den Kontext Judo überzugehen.

5.1 Grundlegende Überlegungen zur Thematik Schwerpunkt und Gleichgewicht im Schülerlabor

5.1.1 Schwerpunkt und Gleichgewicht als schulische Themen

Das Modell des Schwerpunktes spielt in der Physik und vor allem im Physikunterricht implizit eine wichtige Rolle. Häufig wird bei Rechnungen in verschiedenen Situationen der klassischen Mechanik davon ausgegangen, dass die beteiligten Körper über keine räumliche Ausdehnung verfügen. Sie werden auf Massenpunkte reduziert, um eine vereinfachte Betrachtung zu ermöglichen. Da in der Nähe der Erdoberfläche ohnehin vereinfachend die gesamte Gewichtskraft als im Schwerpunkt ansetzend angenommen wird, bietet es sich an, den Schwerpunkt als diesen Massenpunkt zu betrachten. Besonders häufig findet sich der Begriff des Schwerpunktes bei der Behandlung des Themas Impuls. Bei der Betrachtung von Stoßprozessen und des Schwerpunktsystems ist er unverzichtbar.

Die hessischen Lehrpläne für das Fach Physik an Gymnasien (G8), Realschulen und Hauptschulen (Hessisches Kultusministerium, 2010a; Hessisches

Kultusministerium, 2010b; Hessisches Kultusministerium, 2010c) machen keinerlei Angaben zur Thematik Schwerpunkt und Gleichgewicht.

In einer Reihe von gängigen Schulbüchern für die Sekundarstufe I finden sich Einheiten zu Schwerpunkt und Gleichgewicht (Bader & Oberholz, 2001; Boysen, Glunde, Heise, Muckenfuß, Schepers, & Wiesmann, 1990; Bredthauer, Bruns, Müller, Klar, Schmidt, & Wessels, 2002; Kuhn, 1996). Gemeinsam ist diesen Einheiten, dass sie sehr kurz sind: Sie gehen alle über etwa zwei Buchseiten. Nach einer Einführung zum Schwerpunkt wird in diesen Quellen auf die Gleichgewichtsarten eingegangen. Eine Ausnahme bildet Kuhn (1996). Hier wird inhaltlich das Gleiche thematisiert, jedoch folgen die Gleichgewichtsarten nicht direkt auf den Schwerpunkt.

Die Einführung zum Schwerpunkt stellen in der Regel Überlegungen zum Ausbalancieren eines Körpers dar. Der Schwerpunkt stellt denjenigen Punkt dar, in dem sich die gesamte Gewichtskraft des Körpers angreifend vorgestellt werden kann. Eine Ausnahme bildet das Buch von Bader und Oberholz (2001). Hier werden in einer Zeichnung eines Saltos die Flugbahnen verschiedener Körperpunkte dargestellt. Als Schwerpunkt wird jener Punkt bezeichnet, welcher der Flugbahn eines geworfenen Balles entspricht.

In jedem der erwähnten Schulbücher wird zwischen stabilem, labilem und indifferentem Gleichgewicht unterschieden. Dazu wird in fast allen Büchern ein drehbar gelagerter Stab mit verschiedenen Rotationsachsen betrachtet. Die Drehachsen liegen für das stabile Gleichgewicht senkrecht über dem Schwerpunkt, für das labile Gleichgewicht senkrecht darunter und für das indifferente Gleichgewicht gehen sie durch den Schwerpunkt. In Bader und Oberholz (2001) wird hingegen auf konkrete Beispiele für die Gleichgewichtsarten verwiesen. Eine Definition erfolgt im Anschluss über eine Veränderung der potenziellen Energie des Körpers.

Ein Bezug zum menschlichen Körper bzw. zum Sport findet sich lediglich in zwei Quellen. Bader und Oberholz (2001) leiten den Themenbereich mit der Abbildung des KSP während eines Sprunges ein und greifen dies später in einer Aufgabe noch einmal auf. In dem Buch Boysen und Kollegen (1990) wird recht ausführlich auf das menschliche Gleichgewichtsorgan eingegangen. Bis

auf Kuhn (1996) behandeln alle erwähnten Bücher die Fragestellung der Standfestigkeit in Ansätzen. Dazu werden geometrische Überlegungen wie Höhe des Schwerpunktes und Größe der Unterstützungsfläche angestellt. In Boysen und Kollegen (1990) wird zudem in einer Aufgabe die Frage nach der Standfestigkeit eines Ringers aufgeworfen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Thematik Schwerpunkt und Gleichgewicht in den hessischen Lehrplänen keine und in Schulbüchern nur eine sehr geringe Rolle spielt. Der Bedeutung, die dem Schwerpunkt und dem Gleichgewicht im Alltag und vor allem im Sport zukommt, wird dies nicht gerecht. Somit kann eine entsprechende Einheit im Schülerlabor eine sinnvolle Ergänzung zum Unterricht sein.

5.1.2 Überlegungen zu Lernschwierigkeiten

Zur Thematik Schwerpunkt und Gleichgewicht konnten bei den Recherchen zu dieser Arbeit keine expliziten Angaben zu Lernschwierigkeiten oder Schülerfehlvorstellungen gefunden werden. Unter Berücksichtigung der fachlichen Grundlagen dieser Thematik lassen sich jedoch Vermutungen formulieren.

Bei der Einführung des Begriffes des Schwerpunktes sind größere Schwierigkeiten zu erwarten. Der Schwerpunkt verlangt von den SuS ein hohes Maß an Abstraktionsvermögen. Der Schwerpunkt ist weder sichtbar noch fühlbar, wie es beispielsweise die Wirkungen von Kräften sind. Insbesondere bei der Betrachtung des KSP kann es zu Schwierigkeiten kommen. Für SuS ist es möglicherweise leichter, das Modell des Schwerpunktes für einen unbelebten Körper als für ihren eigenen Körper zu akzeptieren. Hinzu kommt, dass der menschliche Körper im physikalischen Sinne kein starrer Körper ist. Eine überschaubare Übertragung des Modells des Schwerpunktes auf den menschlichen Körper lässt sich aber nur unter dieser Vereinfachung durchführen.

Die Vorstellung, dass die gesamte Gewichtskraft im Schwerpunkt angreift, könnte bei den SuS ebenso Schwierigkeiten hervorrufen. Durch die dabei vorgenommen Reduzierung des Körpers auf einen Punkt werden nicht unerhebliche Anforderungen an die Modellbildungsfähigkeiten der SuS gestellt. Die Gewichtskraft dürfte aufgrund der Alltagserfahrungen zur Gravitation keine besonderen Probleme bereiten. Eine tiefergehende Betrachtung zur Ge-

wichtskraft ist bei dieser Thematik darüber hinaus nicht zwingend erforderlich.

Ebenso können Erklärungen zur Lagebestimmung des Schwerpunktes, insbesondere des KSP, Schwierigkeiten bereiten. Bei einer Herleitung der Gleichung zur Lagebestimmung des Schwerpunktes über Kräfte und Drehmomente wie beispielsweise in Hochmuth (1981) müssen die mit Kräften und Drehmomenten verknüpften Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen berücksichtigt werden (u. a. Nachtigall, 1986). Zudem wird ein Verständnis für die mathematischen Formeln benötigt. Eine weitere, anschaulichere Beschreibung zur Lage des Schwerpunktes wird in Bredthauer und Kollegen (2002) gegeben. Der Schwerpunkt wird dort als gemeinsamer Schnittpunkt aller Drehachsen eines Körpers definiert, für die der Körper, sich selbst überlassen, nicht anfängt sich zu drehen. Wissen über Kräfte oder Drehmomente ist hierbei nicht notwendig. Eine Übertragung auf den unter geometrischen Gesichtspunkten komplexen menschlichen Körper kann jedoch für SuS eine große Herausforderung sein. Je nach Kontext und Zielgruppe sollte abgewogen werden, inwieweit physikalische Begriffe oder mathematische Gleichungen bei einer Einführung zur Lage des Schwerpunktes eines Körpers notwendig sind oder auf sie verzichtet werden kann.

Im Zusammenhang mit einer Lageveränderung des KSP ist das Auftreten von Lernschwierigkeiten ebenfalls denkbar. Es ist vorstellbar, dass es SuS schwer fällt, eine Lageänderung des KSP einhergehend mit einer Änderung der Körperhaltung zu akzeptieren. Damit ist sicherlich vor allem dann zu rechnen, wenn auf eine analytische Schwerpunktbestimmung vollständig verzichtet wird. Ähnlich könnte es sich mit der Tatsache verhalten, dass der KSP auch außerhalb des Körpers liegen kann. Die Vorstellung, dass der KSP immer innerhalb des Körpers liegen muss, könnte eine mögliche Fehlvorstellung darstellen.

Weitere Möglichkeiten für Lernschwierigkeiten und vor allem Fehlvorstellungen zu Schwerpunkt und Gleichgewicht ergeben sich im Vorfeld vermutlich nicht. Dafür findet diese Thematik in Schule und Alltag zu wenig Beachtung.

Ob diese Vermutung, müssen selbstverständlich Erfahrungen und Untersuchungen mit den in Abschnitt 5.2 vorgestellten Stationen zeigen.

Eine Unterscheidung zwischen Massenmittelpunkt und Schwerpunkt erscheint nicht notwendig und auch zu diffizil. In den im vorherigen Abschnitt erwähnten Schulbüchern ist ebenfalls nur vom Schwerpunkt die Rede. Nur in Bader und Oberholz (2001) wird der Massenmittelpunkt als alternativer Begriff für den Schwerpunkt angeführt.

Zu den Themen Stabilität und Standfestigkeit sind Lernschwierigkeiten sicherlich auch in Abhängigkeit der verwendeten Mathematik zu erwarten. Dass die Standfestigkeit von der Höhe des KSP und der Größe der Unterstützungsfläche abhängt, dürfte den SuS keine Schwierigkeiten bereiten. Dieser Zusammenhang ist leicht nachzuvollziehen. Auch der daraus resultierende Kippwinkel ist ein anschauliches Mittel zum Vergleich von Standfestigkeiten. Die Bestimmung des Kippwinkels setzt aber Kenntnisse in der Trigonometrie voraus.

Das energetische Maß der Standfestigkeit kann unter der Voraussetzung der Kenntnis des Energiebegriffs recht anschaulich sein. Demnach ist die Standfestigkeit umso höher, je größer die Höhendifferenz ist, die der Schwerpunkt zurücklegen muss, bis er sich über der Kippkante befindet. In der Bestimmung ist dieses Maß nicht ganz einfach, da die Schwerpunkthöhe einer Körperhaltung mit der Schwerpunkthöhe während einer labilen Haltung verglichen werden muss. Dazu muss zudem diese labile Haltung eindeutig feststehen.

Das dynamische Maß würde SuS wohl die meisten Schwierigkeiten bereiten. Es ist eine dynamische Betrachtung notwendig. Die SuS benötigen zumindest grundlegende Kenntnisse über Kräfte, deren Vektordarstellung und der Überlagerung von Kräften. Hier können an vielen Stellen Lernschwierigkeiten auftreten und auch Fehlvorstellungen über Angriffspunkte von Kräften oder das Ausüben von Kräften durch belebte bzw. unbelebte Körper (vgl. Nachtigall, 1986; Wodzinski, 2007) sind zu beachten.

5.1.3 Zielgruppe und Lernziele

Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt, sollen SuS der Sekundarstufe I die Zielgruppe der Lerneinheit sein. Unter Berücksichtigung dieser Zielgruppe, der bisherigen Überlegungen und des Kontextes können die folgenden Punkte als

Grundlage für Lernziele einer Einheit mit dem Thema Schwerpunkt und Gleichgewicht formuliert werden. Die SuS sollen zunächst einmal die Bedeutung der Konzepte Schwerpunkt und Gleichgewicht für eine Sportart wie Judo erfahren. Der Körperschwerpunkt soll dabei von ihnen als ein modellhafter Punkt erkannt werden, in dem die gesamte Gewichtskraft angreift. Für die weitere Betrachtung des Gleichgewichts müssen die SuS zudem mit einer grundlegenden Vorstellung zum Begriff der Unterstützungsfläche vertraut sein. An diese Grundlagen kann die Erkenntnis angeschlossen werden, dass sich für einen ruhenden Körper der KSP immer senkrecht über der Unterstützungsfläche liegen muss, damit sich der Körper im Gleichgewicht befindet. Der KSP könnte sich für ein stabiles Gleichgewicht auch unterhalb der Unterstützungsfläche befinden. Diese Erkenntnis ist aber sowohl schlecht in den Kontext einzubetten als auch schwer für die SuS erfahrbar zu machen. Die Betrachtung eines dynamischen Gleichgewichts bietet sich aufgrund der Zielgruppe und der damit einhergehenden Lernschwierigkeiten nicht an. Die SuS müssten Vorkenntnisse im Bereich Kräfte und Drehmomente haben. Da der KSP eine entscheidende Rolle für das Gleichgewicht spielt, sollen die SuS die Lage ihres KSP experimentell und analytisch bestimmen. Dabei erfahren sie auch, dass die Lage des KSP individuell unterschiedlich und von der Körperhaltung abhängig ist. Weiterhin können die Bedingungen für eine hohe Standfestigkeit thematisiert werden. In diesem Zusammenhang bietet sich die Unterscheidung von verschiedenen Gleichgewichtsarten ebenfalls als Lernziel an.

Da die Lerneinheit in einem sportlichen Kontext stehen soll, ist es sinnvoll, die Lernziele auf Erfahrungen der SuS bezogen zu formulieren. Die Lernziele beziehen sich so nicht auf allgemeine Körper und deren Schwerpunkte sondern konkret auf die Körper der SuS und deren KSP. Beim Lernen in Kontexten ist es unvermeidbar, dass das erworbene Wissen sehr eng mit der Situation verknüpft ist, in der es erworben wurde (Duit & Mikelskis-Seifert, 2007).

Mit den genannten Grundlagen für die Lernziele geht einher, dass kaum Anforderungen an ein mögliches inhaltliches Vorwissen der SuS gestellt werden. In diesem Zusammenhang kann hauptsächlich die Gewichtskraft genannt werden. Jedoch kann die Gewichtskraft rein im Sinne von der Erdanziehung

behandelt werden, sodass hier eine phänomenbasierte Betrachtung ausreichend ist.

Da eine Behandlung der Thematik KSP dennoch nicht ohne die Erwähnung der Gewichtskraft und des KSP als deren Angriffspunkt auskommt, sollten die SuS zumindest schon einmal mit dem Begriff der Gewichtskraft zu tun gehabt haben. Die hessischen Lehrpläne sehen die Gewichtskraft für alle Schulformen in der Jahrgangsstufe 8 vor (Hessisches Kultusministerium, 2010a; Hessisches Kultusministerium, 2010b; Hessisches Kultusministerium, 2010c). Somit empfiehlt es sich, als Zielgruppe einer Lerneinheit zum Themenbereich Schwerpunkt und Gleichgewicht SuS aus der zweiten Hälfte der Sekundarstufe I zu wählen.

5.1.4 Lernen an Stationen

Bei dem Lernen an Stationen handelt es sich um eine Methode, die eine vielfältige Auseinandersetzung mit einem bestimmten Thema erlaubt. Sie ermöglicht verschiedene Zugänge und das Betrachten mehrerer Aspekte eines Themas. Lernen an Stationen kann zu allen Zeitpunkten des Lernprozesses, insbesondere zum Einstieg und zur Erarbeitung eines Themas, und für alle Altersklassen eingesetzt werden. Gerade auch bei begrenztem Material ergeben sich aus dem Lernen an Stationen Vorteile. Bei der Auswahl der Stationen muss darauf geachtet werden, dass unter ihrer Anzahl nicht die Überschaubarkeit leidet und die Einheit noch als Ganzes wahrgenommen wird. Die einzelne Station muss in sich geschlossen sein, aber dennoch den Zusammenhang zu den übrigen Stationen erkennen lassen (Barzel, Büchler, & Leuders, 2007).

Für den Ablauf sind mehrere Aspekte zu berücksichtigen. Zu Beginn ist ein Einstieg mit Informationen zum Thema und einer kurzen Vorstellung der Stationen empfehlenswert. Zudem sollte eine klare Zeitvorgabe gesetzt werden. Bei fünf oder mehr Stationen ist ein Laufzettel zur Wahrung der Übersicht vorteilhaft. Die Dokumentation zu einzelnen Stationen kann in einem Lerntagebuch oder mithilfe von Arbeitsblättern erfolgen. Vor allem bei SuS, die mit dieser Arbeitsform nicht vertraut sind, ist es sinnvoll bei jeder Aufgabe Hinweise zur Dokumentation zu geben. Der Abschluss einer Lerneinheit mit Stati-

onen kann in einer Sammelphase geschehen, in der Ergebnisse präsentiert, offene Fragen geklärt und Inhalte noch einmal zusammengefasst werden. Bei Stationen rein zum Üben oder Wiederholen kann auf eine Nacharbeit mit der ganzen Lerngruppe verzichtet werden (Barzel, Büchter, & Leuders, 2007).

Aufgrund dieser Ausgangspunkte für ein Lernen an Stationen bietet sich diese Methode für eine Lerneinheit zum Thema Schwerpunkt und Gleichgewicht im Schülerlabor an. Das Thema umfasst verschiedene Aspekte, sodass eine Unterteilung möglich ist. So können Stationen zur Lage des KSP und zu Aspekten des Gleichgewichts eingerichtet werden. Auch im Hinblick auf das für die Experimente benötigte Material sind Stationen vorteilhaft. Schließlich kann an Stationen auch gut in Kleingruppen gearbeitet werden. So können sich die SuS gegenseitig bei der Bearbeitung und Auswertung der Stationen unterstützen.

5.2 Stationen für das Schülerlabor zur Thematik Schwerpunkt und Gleichgewicht

Die Lerneinheit unterteilt sich in einen einleitenden Vortrag, fünf weitere Stationen und eine Abschlussrunde. In den folgenden Abschnitten werden der Vortrag und die Stationen mit dem benötigten Material, den Lernzielen, einer Beschreibung der Station und einhergehenden Überlegungen vorgestellt.

Das *Material* bezieht sich immer auf einen einzelnen Aufbau der Station. Zusätzlich zu dem aufgeführten Material werden für jede Station die Arbeitsanweisungen und eine der Anzahl der SuS entsprechende Menge an Arbeitsblättern für das Portfolio (s. Abschnitt 5.3) benötigt. Auf der dieser Arbeit beigelegten CD findet sich eine Zusammenstellung aller benötigten Materialien (CD51). Bei den eingesetzten Simulationen handelt es sich um die in Abschnitt 3.2 vorgestellten Geogebra-Dateien. Geogebra bietet die Möglichkeit, diese als html-Dateien zu exportieren. Davon sollte Gebrauch gemacht werden, da so die SuS die Dateien nicht aus Versehen verändern können.

Die *Lernziele* beruhen auf den Überlegungen aus Abschnitt 5.1.3. Angegeben werden die Ziele, die an der jeweiligen Station hauptsächlich erreicht werden sollen. Zudem wiederholen sich manche Lernziele und tauchen in verschiede-

nen Zusammenhängen auf. Neben der Wiederholung ergibt sich so der Vorteil verschiedener Zugangswege zu diesen Zielen.

Die Abschnitte *Durchführung* beschreiben den Ablauf der Stationen und geben eine zusammenfassende Beschreibung der Tätigkeiten der SuS. Die genauen Arbeitsanweisungen finden sich auf der beiliegenden CD. Die Verweise finden sich in den entsprechenden Unterkapiteln.

In den Abschnitten *Begründung* werden Überlegungen zur Auswahl der Inhalte der Stationen sowie einige weiterführende Überlegungen aufgeführt.

Im einleitenden Vortrag wird das Modell des KSP und seine Beziehung zum Gleichgewicht vorgestellt. Er dient somit als Grundlage für die weiteren Stationen, an denen dann von den SuS Erfahrungen zum KSP und Gleichgewicht gesammelt werden können. Der Vortrag sollte daher in jedem Falle den anderen Stationen vorangestellt sein. Die weitere Reihenfolge der Stationen ist hingegen nicht zwingend vorgegeben. Die Stationen bauen inhaltlich nicht aufeinander auf. In ihnen werden verschiedene Aspekte des Gleichgewichts vertieft. Sollten es die organisatorischen Umstände (Anzahl der SuS, Material, etc.) jedoch erlauben, ist die hier angegebene Reihenfolge der Stationen empfehlenswert. In dieser Abfolge wird zunächst die Lage des KSP experimentell und analytisch bestimmt, bevor sich die Betrachtungen zum Gleichgewicht anschließen. Der Kontext wird hauptsächlich im Vortrag, aber auch in zwei weiteren Stationen verdeutlicht. Die Lagebestimmung des KSP kann nicht auf eine authentische Weise in den Kontext Judo eingebunden werden. Der KSP bzw. seine Lage ist jedoch für das Gleichgewicht von herausragender Bedeutung, sodass die diese Stationen sinnvollerweise mit einbezogen werden.

Die SuS sollen die Stationen möglichst selbständig in Kleingruppen von je drei Personen bearbeiten. Soll eine ganze Klasse die Lerneinheit durchlaufen, sollte jede Station zweimal vorhanden sein. So können insgesamt 30 SuS gleichzeitig arbeiten.

Die Aufgabenstellungen an den Stationen erfordern die Arbeit in den Kleingruppen. Manche der Stationen, wie die experimentelle Lagebestimmung des KSP, sind alleine nicht zu bearbeiten. In den Kleingruppen können sich die SuS gegenseitig unterstützen. Des Weiteren haben sie so auch einen unmittelba-

ren Vergleich zu den Werten ihrer Gruppenmitglieder. Dies hebt die individuelle Lage des KSP hervor. Größere Gruppen sind nicht empfehlenswert, da jedes Gruppenmitglied die Arbeitsanweisungen durchführen soll. Bei größeren Gruppen lässt sich dies nur schwer gewährleisten und es würde zu lange dauern, bis alle Gruppenmitglieder an der Reihe gewesen wären. Die Anwesenheit einer Betreuerin bzw. eines Betreuers ist trotz der angestrebten selbstständigen Arbeitsweise der SuS notwendig. Diese/r kann bei Fragen und Schwierigkeiten helfen und sollte darauf achten, dass die SuS kein Verletzungsrisiko eingehen.

Die Arbeitsanweisungen sind in kleine Schritte unterteilt. Dies deckt sich mit Forschungsergebnissen, wonach sich SuS maximal fünf Minuten mit der Lösung einer (Teil-)Aufgabe befassen. Zudem kommt es auch gerade leistungsschwächeren SuS entgegen, wenn Aufgaben in kleine Teile vorstrukturiert werden (Aufschnaiter, 2006).

Strukturierte Lernangebote ermöglichen es den SuS zudem, Regelmäßigkeiten leichter intuitiv zu erfassen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Selbstbestimmung der SuS möglichst nicht eingeschränkt wird (Aufschnaiter & Rogge, 2009).

Für die Bearbeitung der Stationen sind jeweils etwa 25min vorgesehen. Mit einer angenommenen Vortragsdauer von 15min und Zeitfenstern für die Gruppeneinteilung zu Beginn, Stationswechsel sowie die Abschlussrunde ergibt sich eine Zeitspanne von knapp 3h für die gesamte Einheit. Die Vortragsdauer von 15min sollte die Aufmerksamkeitsspanne der SuS noch nicht überfordern, da auch eine abschließende Aktivität der SuS im Vortrag enthalten ist. Ebenso sollte die Dauer von etwa 25min für eine Station eine angemessene Zeitspanne für die anvisierte Altersklasse sein, zumal die Arbeitsanweisungen wie erwähnt in kleine Schritte eingeteilt sind. So stellt sich schneller das Erfolgserlebnis einer abgeschlossenen (Teil-)Aufgabe ein. Jedoch ist eine exakte Zeitvorgabe für die Stationen natürlich nicht möglich. Dafür wird das Arbeitstempo der SuS zu unterschiedlich sein. Alle SuS sollten aber die Möglichkeit haben, alle Arbeitsaufträge durchzuführen. Die Zeitangabe ist daher eher als eine Obergrenze zu sehen. Folglich verfügt jede Station über

eine Zusatzaufgabe, die von den SuS durchgeführt werden kann, sollten sie mit den regulären Aufgaben früher fertig sein.

Wenn in den folgenden Ausführungen bei der Betrachtung einzelner Personen lediglich die männliche Form angegeben wird, geschieht dies nur aus Gründen der Lesbarkeit. Die Formulierungen sind so zu verstehen, dass die weibliche Form immer mit eingeschlossen ist.

5.2.1 Einleitender Vortrag

Der Vortrag (CD52) hat zum Ziel, das Modell des Schwerpunktes vorzustellen und die Bedeutung der Lage des KSP für das eigene Gleichgewicht hervorzuheben. Ein einleitender Vortrag bietet aber auch weitere Vorteile. Es sind alle SuS versammelt und es kann auf die Lernstationen eingestimmt werden. Zudem kann der Ablauf der Einheit und die Arbeitsweise an den Stationen besprochen werden. Am Ende des Vortrags sollen die SuS bereits erste eigene Erfahrungen zu ihrem Gleichgewicht machen.

Lernziele

Der Vortrag soll das Erreichen der folgenden Ziele unterstützen:

- Die SuS nennen das Gleichgewicht als bedeutsam für bestimmte Sportarten, wie z. B. Judo.
- Die SuS nennen den Schwerpunkt als denjenigen Punkt, der sich als Angriffspunkt der gesamten Gewichtskraft gedacht werden kann.
- Die SuS beschreiben den Schwerpunkt als ein Modell.
- Die SuS beschreiben die Unterstützungsfläche im Stehen als Fläche zwischen den Auflagepunkten der Füße.
- Die SuS benennen, dass sich ihr ruhender Körper im Gleichgewicht befindet, wenn sich ihr Schwerpunkt über der Unterstützungsfläche befindet.

Material

Um zu Beginn des Vortrags Videobeispiele für Sportarten, in denen das Gleichgewicht eine Rolle spielt, zeigen zu können, ist ein PC und ein Beamer erforderlich. Der Vortrag benötigt weiterhin eine Judo-Wurfpuppe zur praktischen Demonstration der Schwerpunktlage. Hierfür sollte eine stabile Stange

oder ein Brett, auf dem die Puppe ausbalanciert werden kann, zur Verfügung stehen. Es sollte eine Breite von etwa 4,5cm und eine Länge von 160cm haben. Entsprechend ist auch eine Halterung, an der dieses Brett in einer horizontalen Position befestigt werden kann, notwendig.

Durchführung

Da ein Vortrag auch immer vom Stil des Vortragenden abhängig ist, soll hier keine wörtliche Vorgabe des Vortrages angegeben werden. Vielmehr werden die Reihenfolge und die Inhalte des Vortrages beschrieben.

Zu Beginn des Vortrages können Videosequenzen von Judowürfen gezeigt werden (CD35, CD37, CD38). Eventuell bietet sich eine Ergänzung mit Videos anderer Sportarten, in denen das Gleichgewicht eine besondere Rolle spielt, an (bspw. Videos vom Eiskunstlauf, Klettern oder Balancieren auf einem Schwebebalken bzw. einer Slackline von dem Mathelisch & Thaller (2008) beiliegenden Datenträger). Anhand dieser Videos kann dann die Fragestellung aufgegriffen werden, wann sich ein Mensch im Gleichgewicht befindet und unter welchen Voraussetzungen er dieses verliert und umfällt. Zur Untersuchung fordert der Vortragende die SuS auf, diese Tatsache unter seiner Anleitung an sich selbst zu überprüfen. Dazu sollen sich die SuS aufrecht mit einer normalen Fußstellung hinstellen (eine ähnliche Körperhaltung wie die Wurf-puppe). Die Füße sollen auf dem Boden bleiben. Es soll sich also weder auf die Zehenspitzen gestellt noch ein Schritt gemacht werden. Nun sollen die SuS ihre Oberkörper nach vorne und hinten neigen. Sie werden feststellen, dass sich weiter nach vorne neigen können als nach hinten. Ebenso werden sie feststellen, dass sie ihren Oberkörper nicht über einen gewissen Winkel neigen können ohne in Gefahr zu geraten umzukippen. Für eine genauere Untersuchung, wann sich der menschliche Körper im Gleichgewicht befindet, kann der Vortragende die Wurf-puppe und die Stange nutzen. Mit ihr können die Begriffe Schwerpunkt und Unterstützungsfläche veranschaulicht werden.



Abbildung 5.1: Die Wurfuppe kann zur Bestimmung ihres Schwerpunktes für drei Achsen auf einer Holzlatte ausbalanciert werden. Der Schnittpunkt der drei Ebenen durch die jeweilige Unterstützungsfläche bezeichnet den Schwerpunkt.

Der Vortragende legt die Puppe, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, für drei verschiedene Achsen so auf die Stange, dass die Puppe jeweils im Gleichgewicht ist und nicht herunter fällt. Der Schnittpunkt der Ebenen, die senkrecht durch die Unterstützungsfläche, also die Holzlatte, gehen, bezeichnet dann den Schwerpunkt der Puppe. Dabei sollte der Vortragende bereits deutlich machen, dass es sich bei dem Schwerpunkt um ein Modell handelt. Je nach Vorwissen der SuS kann der Schwerpunkt als derjenige Punkt beschrieben werden, in dem die gesamte Gewichtskraft angreift. Anhand dieser Herleitung kann der Vortragende verdeutlichen, dass sich der Körper im Gleichgewicht befindet, wenn sich der Schwerpunkt über der Unterstützungsfläche befindet. Abschließend werden die Erfahrungen vom Beginn des Vortrags aufgegriffen und mit der Lage des KSP, der für den aufrechten Stand ungefähr mit demjenigen der Puppe übereinstimmt, und der Unterstützungsfläche begründet: Die Unterstützungsfläche der Füße ist nach vorne größer als nach hinten. Der KSP befindet sich somit länger über ihr. Die Unterstützungsfläche wird dabei als Fläche zwischen den Auflagepunkten der Füße beschrieben.

Am Ende des Vortrages sollte noch auf den Aufbau der Stationen, deren Bearbeitung und die Verwendung des Portfolios eingegangen werden. Der Vortragende teilt die SuS in Gruppen zu je drei Personen ein bzw. lässt sie sich einteilen.

Begründung

Wie bereits in den Überlegungen zu den Lernschwierigkeiten geschildert, stellt der Schwerpunkt ein abstraktes Thema dar. Als reine modellhafte Vorstellung ist er nur schwer auf einem explorativen Weg zu fassen. Daher ist es allein aus zeitlichen Gründen erforderlich, dass ein Betreuer vor den eigentlichen Stationen einen einleitenden Vortrag für alle SuS hält. Der Vortrag kann nicht nur als ein motivierender Einstieg angesehen werden, sondern auch den Kontext der Lerneinheit veranschaulichen.

Die Herleitung der Lage des Schwerpunktes orientiert sich an dem Schulbuch von Bredthauer und Kollegen (2002). Sie bietet den Vorteil, ohne Formeln auszukommen. Des Weiteren ist diese Herleitung mit der Wurf puppe recht anschaulich im Hinblick auf die Bedeutung des Schwerpunktes und den Schwerpunkt eines Menschen. Durch die Verwendung der Puppe wird möglicherweise bereits einer vermuteten Lernschwierigkeit entgegen gewirkt. Vermutlich fällt es den SuS so leichter zu akzeptieren, dass der menschliche Körper ebenfalls einen Schwerpunkt hat.

Die Charakterisierung des Schwerpunktes als Angriffspunkt der Gewichtskraft kann durch den Vortragenden auf die Vorkenntnisse der SuS abgestimmt werden.

Durch die Selbstversuche sammeln die SuS nicht nur Erfahrungen als Grundlage für den weiteren Vortrag. Das Erfahrene können sie am eigenen Körper überprüfen und sie werden auf die anschließende Arbeit an den Stationen eingestimmt.

Eine Kenntnis der genauen Lage des eigenen KSP ist an dieser Stelle noch nicht notwendig. Es geht vielmehr um ein erstes Verständnis für das Gleichgewicht. Dafür dürfte der Bezug über die Lage des Schwerpunktes bei der Wurf puppe ausreichen. Es wird zunächst nicht zwischen Gleichgewichtsarten unterschieden, sondern vereinfachend nur von Gleichgewicht gesprochen, wenn ein stabiles Gleichgewicht gemeint ist. Diese Bezeichnung befindet sich näher am Sprachgebrauch des Alltags und eine Unterscheidung ist auch aus fachlicher Sicht zu diesem Zeitpunkt nicht unbedingt erforderlich.

Mit einem einleitenden und auch theoretischen Vortrag gehen natürlich auch Risiken einher. Es besteht die Gefahr, die SuS zu überfordern, da sie sich auf einem anderen Entwicklungsniveau befinden (s. Aufschneider & Rogge, 2009), als der Vortrag voraussetzt. Den SuS könnten fallbezogene Erfahrungen fehlen, sodass sie die Intention des Vortrags nicht erfassen können. Des Weiteren kann sich ein solcher Vortrag für die Dauer der Einheit negativ auf die Motivation auswirken, da eventuell die Vorstellung eines langweiligen Unterrichts hervorgerufen wird. Der hier beschriebene Vortrag erscheint jedoch angebracht und notwendig. Bei dem KSP handelt es sich um einen imaginären Punkt. Mit ihm können zwar verschiedene Aspekte zum Gleichgewicht erklärt werden, jedoch ist er über eine rein fallbasierte Erfahrungen nicht zugänglich. Es wird versucht, den genannten Risiken durch die eingebundene Schüleraktivität und die Kürze des Vortrags zu begegnen.

5.2.2 Experimentelle Schwerpunktbestimmung

Diese Station (,Wo liegt mein Schwerpunkt? Experiment!', CD53) ermöglicht es den SuS, die Lage ihres KSP in einem Experiment zu bestimmen. Das Experiment entspricht dem in Abschnitt 2.6.3 beschriebenen und in Abschnitt 4.1.1 durchgeführten Vorgehen nach Mathelitsch und Thaller (2008). Die SuS können die individuelle Lage des KSP an dieser Station auch in Abhängigkeit ihrer Körperhaltung untersuchen.

Lernziele

- Die SuS benennen aufgrund der Daten aus einem Experiment die Höhe ihres KSP für eine aufrechte Körperhaltung.
- Die SuS entwickeln ein Verständnis dafür, dass die Lage ihres KSP von ihrer Körperhaltung, aber auch vom jeweiligen Individuum abhängig ist.

Material

Zur Bearbeitung dieser Station benötigen die SuS eine Kraftmessplatte mit Adapter und einen NXT-Stein. Zum Auslesen der Daten ist ein PC mit dem Programm ,Kraftanzeige' (CD08) erforderlich. Die SuS brauchen zudem zwei Maßbänder und eine Stange (beispielsweise eine lange Stativstange mit Fuß)

zum Anzeigen der Schwerpunkthöhe. Die Länge eines Maßbandes sollte mindestens 5m betragen um den horizontalen Abstand zwischen der Aufhängung und dem Auflagepunkt der Unterlage zu bestimmen. Als Unterlage kann wie in Abschnitt 4.1.1 eine Langbank an einer Sprossenwand oder etwas Vergleichbares dienen. Wichtig ist dabei, dass die Konstruktion auf einer Seite beweglich befestigt und ausreichend stabil ist. Zur Auswertung kann von den SuS eine vorgefertigte Tabellenkalkulationsdatei genutzt werden (CD54).

Durchführung

Der Aufbau dieser Station sollte schon weitestgehend vorgegeben sein. Die Verkabelung der Messplatte mit dem NXT-Stein und dem PC bräuchte ansonsten aufgrund der Anschluss- und Bedienmöglichkeiten eine eigene detaillierte Anleitung für die SuS. Auch aus zeitlichen Gründen erscheint es daher angebracht, das Material fertig angeschlossen bereitzustellen.

Für die Messungen muss zunächst die Gewichtskraft eines Schülers ermittelt werden. Dazu stellt sich dieser auf die Kraftmessplatte. Ein weiterer Schüler kann den Wert aus dem Anzeigeprogramm ablesen und in die Tabellenkalkulation eintragen. Bei den Messungen sollten sich die SuS möglichst nicht bewegen. Bereits kleine Bewegungen führen zu Schwankungen in der Anzeige und erschweren das Ablesen.

Anschließend wird die Kraftmessplatte unter das Ende der Bank geschoben und auf Null gesetzt (im Anzeigeprogramm implementierte Funktion). Das Maßband wird parallel zur Bank ausgelegt. Der Beginn des Maßbandes muss sich lotrecht unter der Aufhängung der Bank befinden. Der horizontale Abstand von der Aufhängung zum Auflagepunkt der Bank auf der Messplatte kann nun ebenfalls schon abgelesen und eingegeben werden.

Der Schüler legt sich zunächst in einer gestreckten Körperhaltung auf die Bank. Der Wert, den das Anzeigeprogramm nun anzeigt, wird in die Tabellenkalkulation eingetragen. Von dieser wird der horizontale Abstand des KSP zum Auflagepunkt berechnet. Je nach Aufbau der Anordnung sollte eine lotrechte Markierung unter der Aufhängung angebracht werden. So können die SuS leichter den Abstand ermitteln. Weiterhin sollte darauf geachtet werden, dass

wirklich der Abstand bis zum Auflagepunkt der Unterlage und nicht nur bis zum Rand der Messplatte gemessen wird.

Zur Markierung der Lage des KSP kann an die entsprechende Stelle eine Stan-ge gestellt werden. Zusätzlich wird die Entfernung des KSP zu den Fußsohlen ausgemessen. Somit erhalten die SuS eine gute Näherung für die Höhe ihres KSP für eine aufrecht stehende Körperhaltung. Anschließend nimmt der Schü-ler eine andere Haltung ein und die Lage des KSP wird erneut bestimmt.

Begründung

An dieser Station können die SuS die Lage ihres eigenen Schwerpunktes be- stimmen. Durch die Veränderung der Haltung wird der Einfluss der Körperhal- tung auf die Lage des KSP aufgezeigt. Der unmittelbare Vergleich mit Mitschü- lern/innen verdeutlicht zudem die individuell unterschiedliche Lage des KSP.

Durch die Verwendung der Tabellenkalkulation erübrigt sich das eigenständi- ge Rechnen der SuS. Dies ist vertretbar, da sich die Tätigkeit der SuS ohnehin nur auf das Einsetzen der Werte in eine Formel beschränken würde, zumal das Hebelgesetz nicht thematisiert wird. Die Tabellenkalkulation beugt zudem Rechenfehlern vor.

Das an dieser Station durchgeführte Experiment ermöglicht zwar nur eine eindimensionale Bestimmung der Lage des KSP. Es ist jedoch mit nur geringem Aufwand sowohl im Hinblick auf das Material, die Durchführung als auch die Auswertung verbunden. Eine eindimensionale Bestimmung dürfte im Hinblick auf die angestrebten Ziele ausreichend sein.

5.2.3 Analytische Schwerpunktbestimmung

An dieser Station (,Wo liegt mein Schwerpunkt? Foto!', CD55) können die SuS ebenfalls die Lage ihres KSP ermitteln. Diesmal wird jedoch auf das analyti- sches Verfahren nach Dickwach (1967) zurückgegriffen. Die Lagebestimmung erfolgt am PC anhand von Fotoaufnahmen.

Lernziele

- Die SuS benennen die Lage ihres KSP für eine bestimmte Körperhal- tung aufgrund der Ergebnisse aus einer analytischen Schwerpunktbe- stimmung.

- Die SuS entwickeln ein Verständnis dafür, dass die Lage ihres KSP von ihrer Körperhaltung abhängig ist und dass nicht alle Gliedmaßen die Lage gleichermaßen beeinflussen.
- Die SuS beschreiben für ihre Fotoaufnahmen die Unterstützungsfläche als Fläche zwischen den entsprechenden Auflagepunkten.

Material

Benötigt werden für diese Station eine Digitalkamera mit Stativ sowie eine auf die Gruppengröße abgestimmte Anzahl von Computern. Zur Bestimmung des KSP wird die Datei ‚KSP_analyt_Dickwach.ggb‘ (CD01) eingesetzt. Weiterhin sollte ein Ausdruck mit fertiger Lagebestimmung, ein Drucker, Scheren und Klebstoff an dieser Station zur Verfügung stehen. So können die SuS die Bilder mit der Lage ihres KSP ausdrucken und in ihre Unterlagen einkleben.

Durchführung

Die SuS fertigen mit der Digitalkamera jeweils eine Aufnahme von sich an. Für diese Aufnahme sollen sie eine möglichst frontale Haltung zur Kamera einnehmen, um später optimale Ergebnisse zu erzielen. Bei den Aufnahmen sollte die Kamera senkrecht zum Motiv ausgerichtet sein, um Ungenauigkeiten durch Verzerrungen zu vermeiden. Aus dem gleichen Grund sollte der Abstand zwischen Kamera und Motiv hinreichend groß sein. Ein Abstand von etwa 5m dürfte ausreichen. In dieser Entfernung von der Kamera kann im Vorfeld eine Markierung auf dem Boden angebracht werden, sodass der Abstand von den SuS nicht ausgemessen werden muss. Um spätere Größenänderungen zu vermeiden, sollte die Auflösung der Kamera nicht diejenige des Bildschirms der eingesetzten Computer überschreiten.

Die Aufnahmen werden in die Geogebra-Datei eingefügt und die freien Punkte auf die entsprechenden Gelenke gezogen. Für die Übertragung der Aufnahmen auf die Computer und das Einfügen in der Geogebra-Datei sollte ein Betreuer zur Unterstützung anwesend sein. In Abhängigkeit von der Auflösung der Aufnahmen und des Bildschirms ist in Geogebra eine Größenanpassung des Bildes erforderlich. Falls sich die SuS bei dem Verschieben der Punkte un-

sicher sind, können sie ihre Anordnung mit einem Beispielausdruck vergleichen.

Anschließend können die SuS die Bilder mit ihrem KSP ausdrucken, ausschneiden und in ihre Unterlagen kleben. Anhand des eigenen Bildes und der Bilder der Gruppenmitglieder kann eine Bestimmung der Unterstützungsfläche erfolgen.

Begründung

Diese Station ermöglicht einen weiteren Zugang zur Bestimmung der Lage des eigenen KSP. Neben der experimentellen Bestimmung lernen die SuS zusätzlich das analytische Verfahren kennen. Dank der vorgefertigten Geogebra-Datei kann es ohne großen Rechenaufwand angewendet werden und bietet sich so auch für den Einsatz bei SuS an.

Bei der analytischen Methode wird durch das Verschieben der Punkte die Abhängigkeit der Lage des KSP von der Lage der einzelnen Gelenke bzw. Gliedmaßen deutlich. Es ist gut zu erkennen, dass nicht alle Gliedmaßen die Lage des KSP im gleichen Maße beeinflussen.

Die beweglichen Punkte für die Gelenke können vor dem Ausdrucken ausgeblendet werden. Für eine spätere bessere Nachvollziehbarkeit des Vorgehens sollten sie jedoch sichtbar bleiben.

Durch das Beschreiben der jeweiligen Unterstützungsflächen kann bereits deutlich werden, dass diese sich nach Form und Größe unterscheiden können. Bevor die Schülergruppen an dieser Station wechseln, sollte durch den Betreuer sichergestellt sein, dass sich die Geogebra-Datei wieder in ihrem Ausgangszustand befindet. Daher sollte auch eine Sicherheitskopie bereit gehalten werden.

5.2.4 Lage des Schwerpunktes und Massenverteilung

Diese Station („Ausbalancieren!“, CD56) greift den Zusammenhang zwischen der Lage des Schwerpunktes und der Massenverteilung auf. Dies geschieht sowohl mit einer interaktiven Simulation als auch durch eine praktische Überprüfung.

Lernziele

- Die SuS erkennen, dass die Lage ihres KSP von der Massenverteilung abhängig ist.
- Die SuS benennen, dass sich ihr ruhender Körper im Gleichgewicht befindet, wenn sich ihr Schwerpunkt über der Unterstützungsfläche befindet.
- Die SuS entwickeln ein Verständnis dafür, dass die Lage ihres KSP von ihrer Körperhaltung abhängig ist.

Material

An dieser Station wird eine Holzleiste (etwa 5cm breit und 1m lang) benötigt, auf der die SuS balancieren können. Zudem ist es notwendig, eine Hantel o. Ä. mit einer Masse von 3kg zur Veränderung der Massenverteilung bereitzustellen. Die Hantel sollte über eine Befestigungsmöglichkeit verfügen, sodass sie nicht nur in der Hand gehalten, sondern auch am Arm befestigt werden kann. Weiterhin brauchen die SuS Zugriff auf einen Computer mit der Geogebra-Datei ‚Schwerpunkt_ve_m.ggb‘ (CD06).

Durchführung

Zunächst sollen die SuS in der Simulation die Situation einer auf der Holzleiste stehenden Person nachstellen und die Lage des KSP überprüfen. Anschließend wird in der Simulation die Masse am Arm auf den voreingestellten Wert gesetzt und bei ausgestrecktem Arm bewegt. Die SuS haben die Aufgabe, die Lage des KSP zu überprüfen und mit Hilfe der Simulation eine Körperhaltung zu finden, für die sich der KSP wieder oberhalb der Unterstützungsfläche befindet. Diese Vermutung soll auch praktisch überprüft werden. Nun kann eine Simulation dieser Körperhaltung ohne Masse erfolgen. Abschließend soll dann das zur Seite Strecken eines Beines und der einhergehenden Oberkörperbewegung über die Massenverteilung erklärt sowie an der Simulation überprüft werden.

Begründung

Der Zusammenhang zwischen der Lage des KSP und der Massenverteilung lässt sich im Kontext Judo kaum auf einem für die SuS leichten Niveau veran-

schaulichen. Daher wird bei dieser Station auf den Kontext Balancieren zurückgegriffen. Durch das Balancieren auf der Holzleiste können die SuS die zusätzliche Masse, wie gewünscht, nur über ein Neigen des Oberkörpers und nicht über eine breitere Fußstellung ausgleichen.

In der Simulation müssen die SuS per Schieberegler einen Wert für ihre eigene Masse angeben. Dies ist notwendig, da die Simulation eigentlich mit relativen Massen arbeitet, aber für die Lage des Schwerpunktes mit der zusätzlichen Masse die Relation zwischen Körpermasse und zusätzlicher Masse von Bedeutung ist. Die Masse ist in der Simulation beweglich. So kann auch der Einfluss der Entfernung vom restlichen Körper verdeutlicht werden. Den Einfluss beider Parameter können die SuS durch gezielte Variation überprüfen.

Das Balancieren erfordert eigentlich das Betrachten des Gleichgewichts unter dynamischen Gesichtspunkten, wie unter Abschnitt 2.7.3 beschrieben. Darauf soll hier aber verzichtet werden. Es müssten sonst neben der Gewichtskraft noch weitere Kräfte und auch Drehmomente berücksichtigt werden. Daher erfolgt eine rein statische Betrachtung des Gleichgewichts, während die SuS auf der Holzlatte stehen.

5.2.5 Gleichgewicht und Unterstützungsfläche

Zu Beginn der Station (,Im Gleichgewicht bleiben!', CD57) sollen die SuS die Erfahrung machen, dass sich ihr KSP über der Unterstützungsfläche befinden muss, damit sie im Gleichgewicht sind. Dazu führen sie zwei Übungen durch, die aus den Texten von Mathelitsch (1994) und Rodewald (1992) stammen. Ergänzt werden diese mit Beispielen aus dem Judo.

Lernziele

- Die SuS benennen, dass sich ihr ruhender Körper im Gleichgewicht befindet, wenn sich ihr Schwerpunkt über der Unterstützungsfläche befindet.
- Die SuS beschreiben anhand von Beispielen verschiedene Unterstützungsflächen als Flächen zwischen den Auflagepunkten.
- Die SuS entwickeln ein Verständnis dafür, dass die Lage ihres KSP von ihrer Körperhaltung abhängig ist.

- Die SuS beschreiben eine Körperhaltung, für die ihr KSP außerhalb des Körpers liegt.

Material

Für diese Station benötigen die SuS zunächst einen PC mit den Simulationen ‚Schwerpunkt_sd.ggb‘ (CD02) und ‚Schwerpunkt_vd.ggb‘ (CD04). Des Weiteren wird die Wurf puppe verwendet. Sinnvollerweise ist auch eine Unterlage wie Judomatten, eine Gymnastikmatte o. Ä. vorhanden.

Durchführung

Die SuS stellen sich zunächst mit den Zehenspitzen gegen eine Wand und sollen dann versuchen, sich auf ihre Zehenspitzen zu stellen. Dies wird ebenso wenig gelingen wie die nächste Übung. Dazu stellen sie sich mit einer Fußaukante und der entsprechenden Schulter seitlich gegen eine Wand und versuchen, das der Wand abgewandte Bein zu heben (Übungen nach: Mathelitsch, 1994; Rodewald, 1992). Die Erklärung zu dieser Beobachtung können sie im Anschluss anhand der Simulationen überprüfen.

Die Tatsache, dass ein ruhender Körper im Gleichgewicht ist, wenn sich sein KSP über der Unterstützungsfläche befindet, können die SuS anschließend bei dem Nachstellen zweier Judowürfe bestätigen. Dazu wird einmal die Wurf puppe auf den Schultern und das andere Mal auf den Füßen ausbalanciert.

Abschließend sollen die SuS mit Hilfe der Simulationen eine Körperhaltung ermitteln, für die der KSP außerhalb des Körpers liegt. Diese Körperhaltung stellen sie anschließend mit der Wahl einer geeigneten Unterstützungsfläche selbst nach.

Begründung

Die einleitenden Übungen dieser Station ergänzen zunächst die Erfahrungen der SuS aus dem Vortrag. Daran schließen sich Situationen aus dem Judo an. Die SuS erfahren, dass die Unterstützungsfläche eines Körpers nicht identisch mit der Fläche zwischen den Füßen sein muss. An dieser Station sollte auch die Aufsicht durch einen Betreuer gewährleistet sein, damit die SuS die Wurfansätze nicht an sich gegenseitig ausprobieren.

Insgesamt können die SuS auch an dieser Station eigene Erfahrungen zum Gleichgewicht sammeln. Diese beziehen sich sowohl auf den eigenen Körper als auch auf das Gleichgewicht anderer Körper, für welche die Wurf puppe stellvertretend steht. Durch den Einsatz der Simulationen wird der Bezug zur Lage des KSP hergestellt und den SuS ermöglicht, einen Zusammenhang zwischen Schwerpunktlage und Gleichgewicht herzustellen.

Der Begriff der Unterstützungsfläche wird an dieser Station noch einmal aus einer anderen Blickweise verdeutlicht. Dadurch, dass die SuS die Wurfpositionen nachstellen, bilden sie selbst die Auflagepunkte für die Unterstützungsfläche. So können sie mit dem eigenen Körper spüren, wie die Unterstützungsfläche das Gleichgewicht eines anderen Körpers beeinflusst.

Durch den Einsatz der Simulationen wird aber auch direkt auf eine vermutliche Lernschwierigkeit eingegangen. Die SuS können Körperhaltungen suchen, für die der KSP außerhalb des Körpers liegt. Durch das Nachstellen dieser Körperhaltung kann der Modellcharakter des KSP deutlich werden. Die SuS befinden sich mit der durch die Simulation ermittelten Lage des KSP im Gleichgewicht, können aber den KSP trotz seiner Lage außerhalb des Körpers nicht sehen.

5.2.6 Stabilität und Standfestigkeit

An dieser Station („Stabile Sache!“, CD58) sollen sich die SuS mit Fragen der Standfestigkeit und der Stabilität auseinandersetzen.

Lernziele

- Die SuS bestätigen, dass sich ihr ruhender Körper im Gleichgewicht befindet, wenn sich ihr Schwerpunkt über der Unterstützungsfläche befindet.
- Die SuS unterscheiden zwischen stabilem und labilem Gleichgewicht.
- Die SuS vergleichen die Stabilität von Körperhaltungen anhand der Lage des KSP und der Größe der Unterstützungsfläche.
- Die SuS bestätigen, dass ein hoher KSP und eine geringe Strecke zum Rand der Unterstützungsfläche für eine geringe Stabilität sorgen.

Material

An dieser Station wird ein Computer mit den Videos des beidhändigen Schulterwurfes (CD38) und des Blockierens eines Wurfes (CD23) sowie die Simulationen ‚Schwerpunkt_sd.ggb‘ (CD02) und ‚Schwerpunkt_vd.ggb‘ (CD04) benötigt.

Durchführung

Zunächst machen sich die SuS mit den Simulationen vertraut und beobachten die Lageänderung des KSP bei der Änderung der Körperhaltung. Über die Lage des KSP werden die Begriffe des stabilen und labilen Gleichgewichts eingeführt.

Anhand eines Vergleichs der beiden Videobeispiele können die SuS erkennen, dass ein Judoka die Knie beugt und die Füße weit auseinander stellt um nicht geworfen zu werden. Von dieser Beobachtung ausgehend sollen die SuS den Einfluss der Höhe des KSP und der Größe der Unterstützungsfläche auf die Stabilität überprüfen. Dies soll durch die aufeinanderfolgende Variation der Parameter Höhe des KSP und Entfernung zum Rand der Unterstützungsfläche geschehen. Über die Simulationen wird die jeweilige Lage des KSP bestimmt.

Begründung

Eine Einführung von labilen und stabilen Gleichgewicht ist nur mit praktischen Erfahrungen nicht durchführbar. Daher wird auf die Simulationen zurückgegriffen. Das Beispiel mit dem Neigen des Oberkörpers kennen die SuS jedoch bereits aus dem Vortrag. Es bietet sich an, den Begriff des labilen Gleichgewichts vor den Stabilitätsbetrachtungen einzuführen, da sich der KSP im labilen Gleichgewicht gerade über dem Rand der Unterstützungsfläche befindet. Eine weitere Unterscheidung von Gleichgewichtsarten nach metastabilem und indifferentem Gleichgewicht würde zu weit führen bzw. wäre im Falle des indifferenten Gleichgewichts für den Menschen auch nicht sinnvoll. Somit wird die Bedeutung des horizontalen Abstandes des KSP bis zum Rand der Unterstützungsfläche für die Stabilität einer Körperhaltung verdeutlicht.

Durch die aufeinanderfolgende Variation der Parameter Höhe des KSP und Entfernung zum Rand der Unterstützungsfläche kann der jeweilige Einfluss auf

die Stabilität deutlich werden. Die Auswirkungen der Parametervariation sollen die SuS wieder unmittelbar mit dem eigenen Körper erfahren. Damit ein Bezug zur Lage des KSP hergestellt werden kann, kommen die Simulationen zum Einsatz.

Die Betrachtung der Stabilität erfolgt mit der Betrachtung der Höhe des KSP und der Größe der Unterstützungsfläche unter rein geometrischen Gesichtspunkten. Auf eine Bestimmung des Kippwinkels wird aus mehreren Gründen verzichtet. Zunächst würde dies Wissen in der Trigonometrie voraussetzen, über welches die SuS nicht unbedingt verfügen. Zudem müssten Schwerpunkthöhe und Strecke bis zur Kippkante ausgemessen werden. Dieser Aufwand erscheint im Vergleich zum Erkenntnisgewinn ungerechtfertigt. Auch ohne die Kenntnis einzelner Kippwinkel ist die Erfahrung mit dem eigenen Körper ausreichend um die Stabilität verschiedener Körperhaltungen qualitativ zu vergleichen. Des Weiteren würde mit der Winkelbestimmung ein zusätzlicher Zeitbedarf für diese Station entstehen.

Auch eine Betrachtung des energetischen Maßes ist nicht möglich, da den SuS der Begriff der potenziellen Energie nicht vertraut ist. Auf die Gründe für den Verzicht auf das dynamische Maß wurde bereits unter Abschnitt 5.1.3 eingegangen.

5.2.7 Abschlussrunde

Nachdem die SuS alle fünf Stationen bearbeitet haben, sollte noch eine kurze Abschlussrunde stattfinden. Inhaltliche Ziele werden in dieser Runde nicht angestrebt und entsprechend kurz kann sie ausfallen. Allerdings sind so nach der Arbeit in den Kleingruppen die SuS noch einmal alle versammelt und die Lerneinheit kann gemeinsam abgeschlossen werden. In dieser Runde können die SuS ihre Erfahrungen reflektieren und austauschen oder noch offene Fragen klären. Sollte kein Gespräch aufkommen, kann der Betreuer als Alternative Ergebnisse ausgewählter Stationen besprechen. Dieses Gespräch kann sich auf die Erfahrungen der SuS an dieser Station oder auch auf die erzielten Ergebnisse beziehen. Weiterhin kann auch eine kurze Ergebnispräsentation stattfinden. In dieser können die SuS beispielsweise die Aufnahmen ihrer analytischen Schwerpunktbestimmung auslegen und die spektakulärste Aufnahme

me wählen. Dies böte den weiteren Vorteil, dass die SuS noch einmal anhand einer größeren Anzahl von Beispielen sehen können, wie die Lage des KSP von der Körperhaltung abhängig ist.

5.3 Portfolio

Die SuS legen im Verlauf der Stationen ein Portfolio (CD59) an. Die ersten Seiten erhalten sie am Ende des Vortrages. An jeder der Stationen wird das Portfolio um ein Blatt ergänzt.

Dieses Portfolio erfüllt mehrere Funktionen. Zunächst einmal unterstützt es die SuS bei der Orientierung zwischen den Stationen. Die SuS behalten den Überblick, welche Stationen sie bereits bearbeitet haben und welche ihnen noch fehlen. Die bearbeiteten Stationen können sie im Portfolio markieren. Somit kann diese Übersicht auch zur Motivation beitragen.

Weiterhin enthält das Portfolio auf den ersten Seiten die grundlegenden Informationen zu den Bereichen KSP und Gleichgewicht aus dem Vortrag. So können die SuS im weiteren Verlauf Informationen noch einmal nachschlagen, falls sie diese vergessen haben sollten. Die weiteren, im Verlauf der Stationen zu ergänzenden Blätter beinhalten Informationen, die sich auf die jeweilige Station beziehen. Neben diesen Informationen beinhaltet jedes dieser Blätter eine Aufgabe für die SuS. Zweck dieser Aufgaben ist es, Ergebnisse und Erkenntnisse der Stationen festzuhalten. Bei den Ergebnissen handelt es sich beispielsweise um die Lage des eigenen KSP. Ein Beispiel für das Festhalten einer Erkenntnis ist das Skizzieren einer Körperhaltung, für die der KSP außerhalb des Körpers liegt.

In diesen Aufgaben müssen die SuS nicht alle ihre Erkenntnisse aufschreiben. Vieles ist bereits in den Informationskästen vorgegeben. Dies hat mehrere Gründe. Das Notieren sämtlicher Erkenntnisse durch die SuS würde eine erhebliche Zeitspanne beanspruchen. Die Lerneinheit würde sich so deutlich in die Länge ziehen oder es stünde weniger Zeit für die anderen Tätigkeiten an den einzelnen Stationen zur Verfügung. Aber gerade die Tätigkeiten ‚einen Versuch selber durchführen‘ und ‚etwas ausprobieren‘ stoßen bei den SuS auf ein hohes Interesse (Kircher, Girwidz, & Häußler, 2007). Die Informationen auf

den Blättern können auch eine Kontrolle für die SuS darstellen, inwieweit ihre Ergebnisse mit dem erwarteten Resultat übereinstimmen. Zudem sollen die Informationen auch zum Nachschlagen dienen. Würden sich die SuS fehlerhafte Notizen machen, könnten diese zu falschen Ergebnissen an den weiteren Stationen führen.

Eine weitere Funktion des Portfolios ergibt sich daraus, dass die SuS über Unterlagen verfügen, die sie mit nach Hause nehmen können. Außerdem kann das Portfolio als Grundlage für eine eventuell im Unterricht stattfindende Nachbereitung des Besuchs im Schülerlabor dienen.

5.4 Entwürfe für weitere Stationen

Über die Thematik Schwerpunkt und Gleichgewicht hinausgehend, kann Judo auch für weitere physikalische Konzepte als Kontext dienen. Im Folgenden werden Entwürfe für Stationen zu den Themen Drehmoment, Trägheitsmoment und Bewegungsanalyse vorgestellt. Eine detaillierte Ausarbeitung wird nicht gegeben. Vielmehr handelt es sich um Ideen für weitere Einsatzmöglichkeiten für Judo als physikalischen Kontext. Entsprechend der fachlichen Themen handelt es sich bei der Zielgruppe um SuS der Sekundarstufe II. Die Stationen können jeweils Bestandteil einer größeren Lerneinheit sein. Es ist aber auch ein eigenständiger und somit zeitlich begrenzter Einsatz bei einem Aktionstag o. Ä. denkbar.

Im Zusammenhang mit dem Drehmoment können durch die SuS einzelne Würfe mit der Wurf puppe nachgestellt werden. Als Würfe eignen sich das in Abschnitt 4.1.3 vorgestellte Schulterrad und der in Abschnitt 4.2 analysierte Schulterwurf. Beide Techniken lassen sich richtig und falsch ansetzen. Für das Schulterrad wurde dies bereits thematisiert. Ein zu hoher Ansatz führt zu einem der Wurfbewegung entgegengesetzten Drehmoment. Die Wurfausführung fällt schwerer. Ähnlich verhält es sich bei dem Schulterwurf. Dies wird in Abbildung 5.2 mit der Wurf puppe demonstriert.



Abbildung 5.2: Ein falscher (links) und ein richtiger Ansatz (rechts) zu einem Schulterwurf mit der Wurfpuppe.

Wird der Arm der Puppe weit oben gegriffen, fällt die Wurfausführung leichter. Das Drehmoment aufgrund der Gewichtskraft der Puppe unterstützt frühzeitig die Wurfbewegung. Durch das Ausführen dieser beiden Techniken in der richtigen und in der falschen Variante können die SuS die unterschiedlichen Auswirkungen Drehmomente in Abhängigkeit der Schwerpunktlage der Puppe erfahren.

Eine Erfahrung zu unterschiedlichen Trägheitsmomenten können die SuS durch die Nachstellung der Befreiung aus dem seitlichen Vierpunkt-Haltegriff machen (Abschnitt 4.4.2). Sie legen die Wurfpuppe auf sich, als würde diese sie im Haltegriff festhalten. Sie versuchen einmal die Puppe quer und einmal längs über sich zu rollen. Die zweite Variante wird ihnen aufgrund des geringeren Trägheitsmomentes leichter fallen. Zudem könnten durch eine Anpassung der Simulationen zum KSP mit diesen auch Trägheitsmomente für verschiedene Körperhaltungen und Rotationsachsen ermittelt werden. Somit können sie als Ergänzung zu einer solchen Station zum Thema Trägheitsmomente eingesetzt werden.

Ebenso ist der Einsatz von Videoanalysen möglich. Hier können die SuS anhand von Videoaufnahmen ausgewählter Judowürfe den Bewegungsablauf auswerten. Bereits durch die Betrachtung der Ortskoordinaten lassen sich Ergebnisse erzielen. Weiterhin wäre auch ein Nachstellen bestimmter Wurfbewegungen mit der Wurfpuppe denkbar. An der Puppe ließen sich Markierungen anbringen, die dann zur Auswertung genutzt werden können.

6 Schlussbetrachtungen

Bewegungsabläufe und Techniken im Judo lassen sich unter vielfältigen physikalischen Gesichtspunkten analysieren. Dies kann gut an den in Kapitel 4 betrachteten Techniken nachvollzogen werden. Bei der Vielzahl der Judotechniken kann dieses Kapitel nur einen Bruchteil von diesen behandeln. Mit den vorgestellten Techniken dürfte aber eine durchaus repräsentative Auswahl getroffen worden sein. Hierbei muss auch bedacht werden, dass sich nicht alle Judotechniken gleichermaßen gut zur Analyse eignen. Viele Techniken beinhalten Rotationsbewegungen um mehrere Achsen. Wie bereits dargelegt, trifft dies im besonderen Maße auf die Bodentechniken zu. Aber auch im Stand erschweren die Bewegungsabläufe die Analyse. Für die Auswertung von Videoaufnahmen ist es erforderlich, dass die Bewegung möglichst in eine Ebene frontal zur Kamera abläuft. So können Würfe mit unterschiedlich im Raum orientierten Rotationsachsen nicht ohne Weiteres korrekt ausgewertet werden. Hinzu kommt das komplexe Zusammenspiel von *Tori* und *Uke* bei vielen Techniken. Neben äußeren Kräften wirken zwischen *Tori* und *Uke* innere Kräfte, die nur schwer in Bezug auf ihre Größe und Richtung auszumachen sind. Auch der Einsatz von Messgeräten wie den Kraftmessplatten kann durch die Bewegungsabläufe erschwert werden. Bei mehr als einer beteiligten Person oder in dynamischen Situationen ist es kaum möglich, eine geeignete Position für den Einsatz der Messplatten zu finden. Zudem erschwert die Komplexität der Bewegungen, die Messdaten angemessen zu interpretieren.

Für die Erstellung einer Lerneinheit für das Schülerlabor mussten die eben dargelegten Aspekte natürlich ebenfalls berücksichtigt werden. Hinzu kommt, dass es sich bei Judo um einen Kampfsport handelt. Die Bezüge zum Judo müssen also so gewählt werden, dass ein Verletzungsrisiko für die SuS aufgrund des Kontextes ausgeschlossen ist. Die gewählte Thematik Schwerpunkt und Gleichgewicht wird beiden Aspekten gerecht. Es sind weder komplexe Bewegungen noch Judotechniken, die zu einer Gefährdung der SuS führen, erforderlich.

Eine praktische Erprobung der Lerneinheit wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. In welchem Umfang die angestrebten Lernziele tatsächlich erreicht werden, muss somit noch in praktischen Erprobungen überprüft werden. Ebenso kann so die Frage geklärt werden, ob die Lerneinheit auf das Interesse der SuS stößt. Insgesamt werden wohl mehrere Probedurchgänge erforderlich sein, um diese Fragen beantworten zu können und die Arbeitsanweisungen gegebenenfalls anzupassen. Zudem kann durch mehrere Erprobungen auch eine Überprüfung hinsichtlich der Zielgruppe und des Zeitumfangs der Lerneinheit stattfinden.

Aufgrund der Komplexität der Bewegungsabläufe im Judo muss abgewogen werden, inwieweit Judo als Kontext für weitere Lerneinheiten genutzt werden kann. Grundsätzlich dürfte aber Sport ein gut geeigneter Kontext für das Schülerlabor sein. In der Literatur finden sich einige Beispiele für physikalische Konzepte im Sport wie in Mathelitsch und Thaller (2008), Mück (2009) oder auch in Rodewald (1992). Dabei handelt es sich zumeist um Sportarten mit einfacheren Bewegungsabläufen. Vermutlich sind diese daher insbesondere für jüngere SuS eher als Kontexte für weitere Einheiten im Schülerlabor geeignet.

Im Rahmen solcher Einheiten ließe sich sowohl fachlich als auch methodisch auf die Inhalte dieser Arbeit aufbauen. So kann beispielsweise unter dem Gesichtspunkt des Gleichgewichts der Einsatz von Balancierstangen betrachtet werden oder es lässt sich begründen, warum es nicht so schwer wie häufig gedacht ist, mit einem Motorrad und einer darunter hängenden Person über ein Drahtseil zu fahren.

Weiterhin ist für die in dieser Arbeit erstellten Simulationen ein Einsatz in anderen Zusammenhängen denkbar. Sie sind aufgrund ihrer Gestaltung nicht auf den Kontext Judo festgelegt. Die Lage des KSP und auch die damit einhergehende Frage des Gleichgewichts können bei unterschiedlichen Fragestellungen rund um den menschlichen Körper und seine Bewegungen von Bedeutung sein. Als Beispiel kann die Betrachtung der Körperhaltung bei verschiedenen Sprungtechniken im Hochsprung dienen. Anhand der Simulationen wird deutlich, dass sich der KSP je nach Technik unterschiedlich hoch über oder sogar

unterhalb der Latte bewegt. So ergeben sich unmittelbar die Vorteile bestimmter Sprungtechniken gegenüber anderen.

Auch die eingesetzten Kraftmessplatten bieten sich für verschiedene Zwecke an. Neben der Betrachtung von einfachen Druck- und Zugkräften kann mit ihnen unter anderem der Kraftverlauf bei verschiedenen Sprüngen analysiert werden. Dies kann gut mit einer Videoanalyse ergänzt werden. Bei einfachen Bewegungsabläufen wie Sprüngen bieten sich hier viele interessante Möglichkeiten, diese über ihre Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu charakterisieren. Insgesamt bietet die Videoanalyse viele Möglichkeiten, um Bewegungsabläufe in einem physikalischen Kontext zu betrachten. Neben Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sind ebenso Auswertungen zu Energie und Impuls denkbar. Eine schöne Übersicht der Einsatzmöglichkeiten der Videoanalyse findet sich in der Arbeit von Mück (2009). Dort werden Videos von Bewegungsabläufen in mehreren Sportarten unter verschiedenen Gesichtspunkten analysiert.

7 Zusammenfassung

Viele Aspekte im Sport lassen sich unter physikalischen Gesichtspunkten analysieren. So richten sich alle Bewegungsabläufe im Sport nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten. In der vorliegenden Arbeit werden Untersuchungen zu physikalischen Konzepten in der Sportart Judo durchgeführt und eine Lerneinheit mit einem judobezogenen Kontext für das Schülerlabor PiA (Physik in Aktion) der Justus-Liebig-Universität Gießen erarbeitet.

Judo ist eine aus Japan stammende Kampfsportart, deren Techniken sich in mehrere Gruppen einteilen lassen. Zur Analyse ausgewählter Judotechniken werden verschiedene physikalische und biomechanische Grundlagen benötigt. Dazu gehören insbesondere die Themenbereiche Schwerpunkt und Gleichgewicht, da diesen im Judo eine große Bedeutung zukommt. Die Position des Köperschwerpunktes des Menschen kann durch experimentelle und analytische Verfahren bestimmt werden. Um jedoch Aussagen zum Gleichgewicht auf den Menschen übertragen zu können, ist es erforderlich, den menschlichen Körper als starr anzunehmen.

Für die Untersuchungen physikalischer Konzepte im Judo und zur Erstellung der Lerneinheit wurden verschiedene Geräte wie Kameras und Kraftmessplatten eingesetzt. Des Weiteren wurden mehrere Computerprogramme zur Erstellung von Simulationen u. a. verwendet.

Die Untersuchungen orientieren sich an den Technikgruppen im Judo. Aufgrund der Würfe ist das Gleichgewicht im Judo von besonderer Bedeutung. Im Judo werden daher Voraussetzungen für ein stabiles Gleichgewicht durch eine angepasste Körperhaltung umgesetzt. Zur Durchführung von Würfen wird der Gegner aus diesem stabilen Gleichgewicht gebracht. Messungen zeigen hier die Gewichtsverlagerungen auf. Für den Werfenden spielt das Gleichgewicht eine ebenfalls eine wichtige Rolle. Die Bewegungsanalyse einer Videoaufnahme zeigt den Ablauf eines Wurfes aus der Sicht des Geworfenen. Durch die Bestimmung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zweier Markierungspunkte wird das Wurfprinzip verdeutlicht. Zur Vermeidung von Verlet-

zungen durch den Sturz bei den Würfeln werden im Judo Falltechniken geübt. Diese verringern aufgrund physikalischer Prinzipien die Wucht beim Aufprall. So belegen Messungen zur seitlichen Fallübung einen verringerten Effekt des im Judo praktizierten Abschlagens auf die beim Aufprall auf den Körper ausgeübten Kräfte. Auch die Bodentechniken im Judo sind von physikalischen Gesetzmäßigkeiten bestimmt. Bei Armhebeln und der Befreiung aus einem Haltegriff wird dies deutlich.

Bei der Auswahl eines Kontextes für eine Lerneinheit müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden. Dazu gehört neben der Auswahl auch die Umsetzung des Kontextes. Sport eignet sich dabei grundsätzlich gut als Kontext. Er weckt das Interesse von vielen Schülerinnen und Schülern und kann über die Erfahrung am eigenen Körper Lernwege erschließen, die sonst nicht genutzt werden. Für die erstellte Lerneinheit wird Judo als Kontext genutzt. Unter Berücksichtigung dieses Kontextes wird eine Lerneinheit für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I zu den Themenbereichen Schwerpunkt und Gleichgewicht erstellt. Diese Themenbereiche kommen in den hessischen Lehrplänen nicht vor und werden auch in mehreren Schulbüchern auf nur wenigen Seiten behandelt. Insgesamt sind in Verbindung mit diesen Themen mehrere mögliche Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen denkbar, die bei der Auswahl der Lernziele berücksichtigt werden müssen.

Für die Lerneinheit selbst bietet sich die Organisation in Stationen an. Dementsprechend unterteilt sich die Einheit in fünf Stationen, die von einem einleitenden Vortrag und einer Abschlussrunde eingerahmt werden. An den Stationen können die Schülerinnen und Schüler selbständig verschiedene Aufgaben zum Themenbereich bearbeiten und ein Portfolio anlegen. Eine praktische Erprobung der Lerneinheit steht noch aus, sodass bislang keine Aussagen über ihre Eignung getroffen werden können.

Über die Lerneinheit hinaus ist die Eignung von Judo als physikalischer Kontext nur bedingt gegeben. Die eingesetzten Geräte und Methoden können jedoch sinnvolle Ergänzungen für weitere Lerneinheiten mit einem sportlichen Kontext sein.

8 Literatur

- Aufschnaiter, C. v. (2006). Zeit zum Denken, Zeit zum Lernen. *Schüler. Wissen für Lehrer, 2006* (2006), S. 114-116.
- Aufschnaiter, C. v., & Rogge, C. (2009). Im Physikunterricht wird zuviel erklärt! *Lernchancen, 2009* (69/70), S. 54-59.
- Bader, F., & Oberholz, H.-W. (Hrsg.). (2001). *Dorn Bader. Physik. Gymnasium Sek I*. Hannover: Schroedel Verlag GmbH.
- Barzel, B., Büchter, A., & Leuders, T. (2007). *Mathematik Methodik. Handbuch für die Sekundarstufe I und II*. Berlin: Cornelsen Scriptor.
- Baumann, W. (1989). *Studienbrief 14 – Grundlagen der Biomechanik*. Schorndorf: Hofmann-Verlag.
- Becker, H. (2010). *VidAnToo*. Abgerufen am 08. September 2010 von <http://hbecker.sytes.net/vidantoo/>
- Benz, M. (2008). *Digitale Videoanalyse von Bewegungen – Neue Möglichkeiten mit der Software „measure Dynamics“*. Abgerufen am 09. September 2010 von http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/Staatsexamensarbeit_MBenz.pdf
- Boysen, G., Glunde, H., Heise, H., Muckenfuß, H., Schepers, H., & Wiesmann, H.-J. (1990). *Physik für Gymnasien. Sekundarstufe I. Länderausgabe A, Teilband I*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Bredthauer, W., Bruns, K. G., Müller, W., Klar, G., Schmidt, M., & Wessels, P. (2002). *Impulse Physik, Mittelstufe*. Stuttgart: Ernst Klett Verlag GmbH.
- Demtröder, W. (2008). *Experimentalphysik 1 – Mechanik und Wärme*. Berlin: Springer.
- Dickwach, H. (1967). Methode zur Bestimmung des Körperschwerpunktes aus der Lage der Gelenkpunkte. *Theorie und Praxis der Körperkultur, 1967* (12), S. 1108-1114.
- Donskoi, D. D. (1975). *Grundlagen der Biomechanik*. Berlin: Bartels & Wernitz.
- Duenbostl, T., Mathelitsch, L., Oudin, T., & Thaller, S. (2010). *Sport und Physik. 50 Arbeitsblätter mit Lösungen*. o. O.: Aulis Verlag.

- Duit, R., & Mikelskis-Seifert, S. (2007). Kontextorientierter Unterricht. *Unterricht Physik, 18* (98), S. 4-8.
- Elster, D. (2007). Interessante und weniger interessante Kontexte für das Lernen von Naturwissenschaften. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, 60* (4), S. 243-249.
- Giancoli, D. C. (2006). *Physik*. München: Pearson Studium.
- Groen, B. E., Weerdesteyn, V., & Duysens, J. (2007). Martial arts fall techniques decrease the impact forces at the hip during sideways falling. *Journal of Biomechanics, 40* (2), S. 458-462.
- Hessisches Kultusministerium. (2010a). *Lehrplan Physik. Bildungsgang Hauptschule. Jahrgangsstufen 5 bis 9/10*. Abgerufen am 09. Oktober 2010 von http://www.hessen.de/irj/servlet/prt/portal/prtroot/slimp.CMReader/HKM_15/HKM_Internet/med/753/7536e9fb-a45b-901b-e592-697ccf4e69f2,22222222-2222-2222-2222-222222222222,true
- Hessisches Kultusministerium. (2010b). *Lehrplan Physik. Bildungsgang Realschule. Jahrgangsstufen 5 bis 10*. Abgerufen am 09. Oktober 2010 von http://www.hessen.de/irj/servlet/prt/portal/prtroot/slimp.CMReader/HKM_15/HKM_Internet/med/f0e/f0e70f20-874b-b901-be59-2697ccf4e69f,22222222-2222-2222-2222-222222222222,true
- Hessisches Kultusministerium. (2010c). *Lehrplan Physik. Gymnasialer Bildungsgang. Jahrgangsstufen 6G bis 9G und gymnasiale Oberstufe*. Abgerufen am 09. Oktober 2010 von http://www.hessen.de/irj/servlet/prt/portal/prtroot/slimp.CMReader/HKM_15/HKM_Internet/med/4a1/4a1704b5-267f-121a-eb6d-f191921321b2,22222222-2222-2222-2222-222222222222,true
- Hochmuth, G. (1981). *Biomechanik sportlicher Bewegungen*. Berlin: Sportverlag.
- Hohenwarter, M., & Hohenwarter, J. (2009). *GeoGebra Hilfe – Offizielles Handbuch 3.2*. Abgerufen am 4. September 2010 von <http://www.geogebra.org/help/docude.pdf>

- Kano, J. (2007). *Kodokan Judo*. Bonn: Dieter Born.
- Kircher, E., Girwidz, R., & Häußler, P. (2007). *Physikdidaktik – Theorie und Praxis*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kuhn, W. (Hrsg.). (1996). *Lehrbuch der Physik*. Braunschweig: Westermann Schulbuchverlag GmbH.
- Labudde, P., & Firmin, F. (2002). Physikunterricht in Bewegung. *Unterricht Physik*, 13 (70), S. 4-9.
- Lehmann, G., & Müller-Deck, H. (1989). *Judo – Ein Lehrbuch für Trainer, Übungsleiter und Aktive*. Berlin: Sportverlag Berlin.
- Leva, P. d. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's Segment Inertia Parameters. *Journal of Biomechanics*, 29 (9), S. 1223-1230.
- Machold, A. (2005). *Mechanik – Eine genetische Hinführung zu grundlegenden Vorstellungen klassischer Physik*. Weingarten: Pädagogische Hochschule Weingarten.
- Mathelitsch, L. (1994). Gleichgewicht – einige physikalische Betrachtungen. *Leibesübungen/Leibeserziehungen*, 3 (48), S. 27-29.
- Mathelitsch, L., & Thaller, S. (2008). *Sport und Physik*. Köln: Aulis Verlag Deubner.
- McGinnis, P. M. (2005). *Biomechanics of Sport and Exercise*. Champaign, IL, USA: Human Kinetics.
- Mück, T. (2009). *Physik und Sport. Fächerverbindender Unterricht*. Abgerufen am 28. 08 2010 von <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/Physik+Sport.pdf>
- Müller, R. (2010). *Physik in interessanten Kontexten*. Abgerufen am 08. Oktober 2010 von http://www.uni-kiel.de/piko/downloads/Physik_in_interessanten_Kontexten_RMueller.pdf
- Nachtigall, D. (1986). Vorstellungen im Bereich der Mechanik. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik/Chemie*, 34 (13), S. 16-20.
- National Instruments Corporation. (2005). *Einführung in LabVIEW – Dreistündiger Einführungskurs*. Abgerufen am 04. September 2010 von http://www.ni.com/pdf/academic/d/labview_3_hrs.pdf

- Nieke, H. (1962). Innere und äußere Kräfte bei der Wurftechnik im Judo. *Theorie & Praxis der Körperkultur*, 8 (11), S. 737-741.
- Nordmeier, V. (2002). Videoanalyse von Bewegungen mit dem Computer. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik*, 13 (69), S. 27-30.
- Rodewald, B. (1992). Physik auf Schritt und Tritt. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik*, 3 (12), S. 22-27.
- Schlichting, H. J. (1992). Die physikalische Dimension des Sports. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik*, 3 (12), S. 44-46.
- Stöcker, H. (Hrsg.). (2007). *Taschenbuch der Physik*. Frankfurt/Main: Verlag Harri Deutsch.
- Vernier Software & Technology. (2010). *Force Plate*. Abgerufen am 10. September 2010 von <http://www2.vernier.com/booklets/fp-bta.pdf>
- Wick, D. (2005). *Biomechanische Grundlagen sportlicher Bewegungen*. Balingen: Spitta Verlag.
- Willimczik, K. (1989). Biomechanische Forschungsmethodik. In K. Willimczik (Hrsg.), *Biomechanik der Sportarten* (S. 25-57). Reinbek: Rowohlt.
- Winter, D. A. (1995). *A.B.C. (Anatomy, Biomechanics and Control) of Balance During Standing and Walking*. Waterloo, Kanada: Waterloo Biomechanics.
- Winter, D. A. (2005). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Wodzinski, R. (2007). Lernschwierigkeiten in der Mechanik. In R. Müller, R. Wodzinski, & M. Hopf (Hrsg.), *Schülervorstellungen in der Physik. Festschrift für Hartmut Wiesner* (S. 107-113). Köln: Aulis Verlag Deubner.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mir bei der Fertigstellung dieser Arbeit geholfen haben.

Zunächst gilt mein Dank Prof. Dr. Peter J. Klar und Prof. Dr. Claudia von Aufschnaiter, die es mir ermöglicht haben, diese Arbeit zu schreiben. Sie haben sich nicht nur viel Zeit für hilfreiche und konstruktive Gespräche genommen, sondern stellten auch das eingesetzte Material zur Verfügung.

Einen besonderen Dank möchte ich auch Kathrin Steckenmesser-Sander für ihre Ratschläge und die engagierte Betreuung aussprechen.

Ebenso möchte ich mich bei Hans Peter Jorde bedanken, der mir eine große Hilfe bei technischen Fragen war und sich viel Zeit für Erklärungen genommen hat.

Bedanken möchte ich mich auch den Mitgliedern des JC Rockenberg, die sich freundlicherweise für die Foto- und Videoaufnahmen zur Verfügung gestellt haben.

Ein herzliches Dankeschön geht an Helena für ihre vielfältige und beständige Unterstützung!

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwandt und die Stellen, die anderen benutzten Druck- und digitalisierten Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, mit Quellenangaben kenntlich gemacht habe. Diese Erklärung schließt die bildlichen und sonstigen Darstellungen sowie die auf dem Datenträger enthaltenen Dateien ein.

Datum

Unterschrift