

## 2 Methoden

Die Greifschwanzbewegungen von *Ateles geoffroyi* beim Hangeln wurden mit Hilfe des computer- und videounterstützten 3-D-Bewegungsanalyseprogramms *Peak5 Motion Analysis System* untersucht, welches über die **Direct Linear Transformation (DLT)** Bild für Bild digitalisierte Markerpositionen in ein kartesisches Koordinatensystem transformiert. Die x-, y- und z-Koordinaten jeder Markierung lieferten die Grundlage für die Analyse von Bewegungsbahnen, Winkeln, Geschwindigkeiten, Dauer und Beschleunigungen der Greifschwanzbewegungen.

### 2.1 Versuchstiere

Als Versuchstiere standen vier gesunde adulte weibliche Klammeraffen der Art *Ateles geoffroyi* (Kuhl, 1820) im Zoo Frankfurt/Main zur Verfügung (Tab. II-2.1). Die Affengruppe bestand zwar noch aus zwei weiteren Tieren, die jedoch keine Brachiation zeigten. Die Tiere verfügten über einen kleinen Innenkäfig, in dem sie nachts eingesperrt blieben und eine ca. 100 m<sup>2</sup> große, von einem Wassergraben umgebene Außenanlage. Tagsüber hatten sie freie Wahl zwischen der Außen- und Innenanlage, die mit zwei im Abstand von etwa 1 m parallel übereinander hängenden Seilen von ca. 10 m Länge und 4 cm Durchmesser verbunden waren. Entlang dieser Seile hangelten die Tiere. Da die Seile nicht straff gespannt waren, erwiesen sie sich als relativ bewegliches Substrat. Die Anlage selbst war mit dichtem Baum- und Strauchbestand ausgestattet, der von den Tieren ausgiebig genutzt wurde. Für die Untersuchung der Greifschwanzkinematik wurde nur das Hangeln entlang der Seile berücksichtigt.

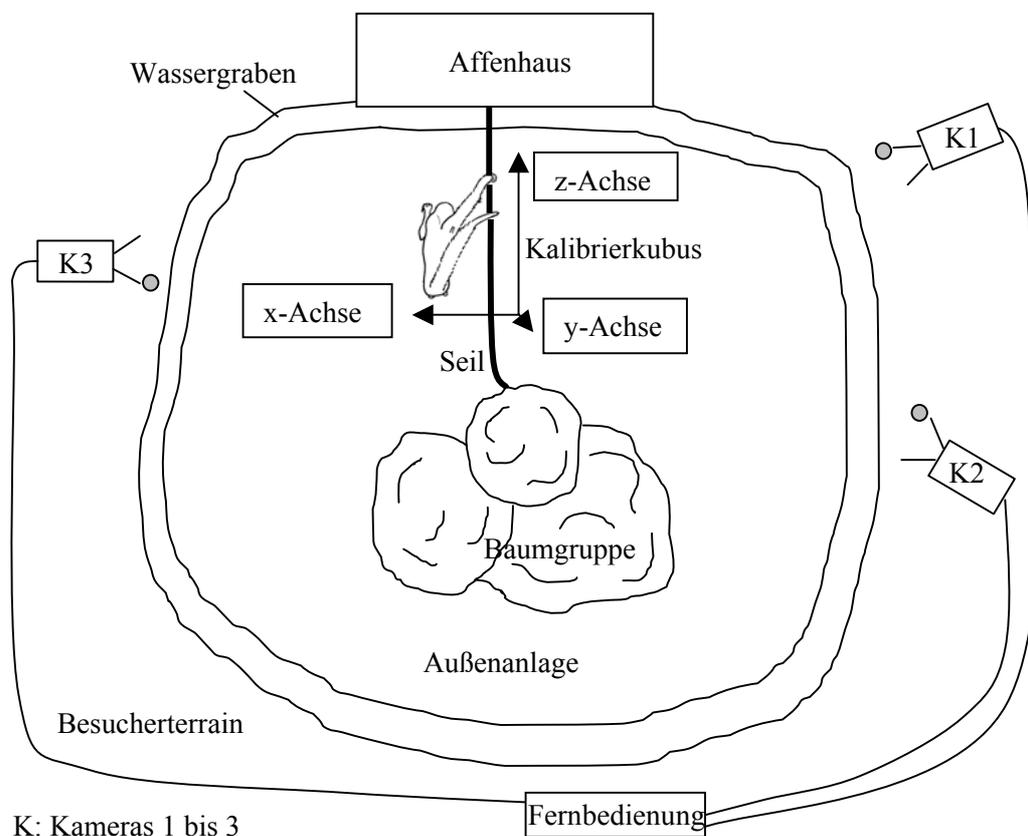
**Tabelle II-2.1: Name und Alter der untersuchten *Ateles geoffroyi***

Name	Alter (Jahre)
Apura	7
Rotnase	27
Cara	24
Dicke	17

## 2.2 Versuchsaufbau und Videoaufnahme

Für die Filmaufnahmen wurden drei über eine Fernbedienung synchronisierte Videokameras des Typs Panasonic S-VHS Profi im Abstand von etwa 10 m bzw. 20 m um das Gehege im Besucherterrain auf Stativen so montiert, dass alle Kameras einen Ausschnitt von ca. 8 m der beiden parallel übereinanderhängenden Seile erfassten. Zwei der Kameras waren auf eine Längsseite des Seiles schräg von zwei unterschiedlichen Perspektiven ausgerichtet, die dritte wurde gegenüber postiert. (Abb. II-2.1). Auf diese Weise konnten bis zu 6 sukzessive Hangelbewegungen der Affen entlang der Seile dokumentiert werden. Um identische Bilder in jeder der drei Perspektiven während des Digitalisierungsprozesses wiedererkennen zu können, wurde vor jedes der Kameraobjektive eine LED (Light Emission Diode) derart installiert, dass diese während der Filmaufnahmen in einer Ecke des Bildausschnitts synchronisiert auf Knopfdruck gut sichtbar aufleuchteten.

Bevor die Tiere morgens auf die Anlage kamen, wurde der Kalibrierkubus mit seinen 25 weißen Kugeln zur Eichung des Raumes in der Standardorientierung so im Bereich der Seile aufgestellt, dass die z-Achse der späteren Berechnung der Lokomotionsrichtung der Tiere entsprach. Nach der etwa 5 min dauernden Aufnahme des Kubus konnte dieser wieder entfernt werden. Die Videokameras wurden auf manuellen Betrieb eingestellt, um die Verschlusszeit je nach Lichtverhältnissen auf 1/1000 s bzw. 1/2000 s festzusetzen. Je nach Lichteinfall wurde die Blende manuell angepasst.



K: Kameras 1 bis 3

Abb. II-2.1: Schema des Aufbaus für die Filmaufnahmen der Greifschwanzbewegungen.

Sobald die Tiere unter dem Einsatz ihres Greifschwanzes entlang der Seile hangelten, begannen die Videoaufzeichnungen auf S-VHS Kassetten mit 180 min Aufnahmedauer. Die LEDs wurden bei jedem Kontakt des Greifschwanzes mit dem Seil kurz aktiviert.

Die Filmaufnahmen fanden ganztägig im Zeitraum vom 20. bis 28. Juni 2001 statt. Die dafür relevante Pilotphase, im Zuge der auch die Individuen kennen gelernt wurden, wurde bereits im Februar desselben Jahres organisiert. Insgesamt umfasste das Videomaterial sechs Stunden, von denen geeignete Sequenzen zur Analyse selektiert wurden.

## 2.3 Konfiguration des *Peak5 Motion Analysis Systems* und Datenaufnahme

Für die Bearbeitung der Videobänder mit *Peak5* wurden die im Teil I dieser Arbeit beschriebenen Schritte zur Codierung der Videobänder und der Kalibrierung des Raumes angewandt.

### 2.3.1 Definition der Markierungen

Es war es nicht möglich, Bereiche des Greifschwanzes zu markieren. Daher wurden funktionell bedeutsame und zugleich markante Stellen des Greifschwanzes ausgewählt, die auch ohne direkt am Tier angebrachte Markierungen zweifelsfrei digitalisiert werden konnten. Folgende anatomische Markierungen wurden in der Konfiguration des *Peak5* Systems definiert (Abb. II-2.2):

<b>distal:</b>	Schwanzspitze
<b>proximal:</b>	proximales Ende der Greiffläche, erkennbar am Übergang der felllosen Greiffläche in den buschigen proximalen Schwanzbereich, als „Schwanzmitte“ bezeichnet
<b>sacral:</b>	Schwanzbasis am <i>Os sacrum</i>

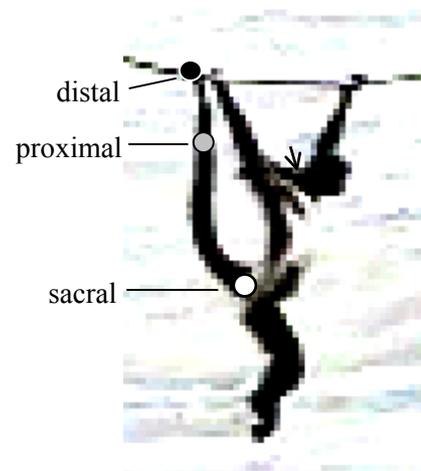


Abb. II-2.2: Digitalisierte Markierungen am Greifschwanz von *Ateles geoffroyi*. Zusätzlich wurden Nacken (Pfeil) und Hände sowie die Kontaktstelle des Schwanzes mit dem Seil markiert.

Nacken-, Hand- und Substratmarkierungen dienten der späteren Längenberechnung.

### 2.3.2 Definition von Ereignissen im Bewegungsablauf

Zur Einordnung der digitalisierten Bewegungen in den Bewegungskontext wurden folgende markanten Ereignisse definiert und bei ihrem Auftritt während des Digitalisierungsprozesses über die Tastatur eingegeben:

- LED:** Beginn des Aufleuchtens der LED
- ab:** der Schwanz verliert den Kontakt mit dem Seil
- auf:** der Schwanz berührt das Seil.

Um diese Ereignisse im Bewegungsablauf des Greifschwanzes in den Kontext der Lokomotion zu setzen, wurde zusätzlich das Aufsetzen und Ablösen der rechten und linken Hand am Seil notiert.

### 2.3.3 Auswahl des Videomaterials

Aus den sechs Stunden an Videomaterial wurden diejenigen Sequenzen ausgewählt, in denen die Tiere ungestört mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich  $0,93 \pm 0,03$  m/s entlang der vollen Länge des Seiles mit mindestens drei aufeinanderfolgenden Vorschwing- und Kontaktphasen hangelten. Die Einschränkung der Fortbewegungsgeschwindigkeit erfolgte, um Veränderungen kinematischer Parameter zu eliminieren. Insbesondere das jüngste Tier hangelte fast ebenso häufig mit einer Geschwindigkeit von bis zu 1,3 m/s. Die Richtung der Bewegung zum Innen- oder Außengehege sowie die Wahl des oberen oder unteren Seiles waren für die Analyse irrelevant.

### 2.3.4 Digitalisierung

Die Digitalisierung der drei Schwanzmarkierungen erfolgte auf die im Teil I beschriebene Weise. Der Verlauf aller Markierungen wurde im Anschluss überprüft und bei Bedarf korrigiert.

### 2.3.5 Bearbeitung der Rohdaten

Mit einer vom System optimierten Frequenz wurden die durch nicht vermeidbare Ungenauigkeiten beim Digitalisieren entstehenden Amplitudengeräusche der Rohdaten mit dem Butterworth Filter bei optimierter Schneidfrequenz geglättet.

### 2.3.6 Kalkulation der Datensätze

Die gefilterten zweidimensionalen Daten der drei Kameraperspektiven wurden über die DLT miteinander verrechnet, so dass die dreidimensionale Position einer jeden Markierung in jedem Bild mit x-, y- und z- Koordinaten vorlag. Zur Synchronisierung der Datensätze jeder Kameraperspektive diente die Registrierung der LED als das am zuverlässigsten zu bestimmende Ereignis zur Markierung identischer Bilder.

Da der Kubus nicht immer exakt parallel zum Seil aufgebaut werden konnte, wurden die Raumpositionen der digitalisierten Markierungen so rotiert, dass das Seil der z-Achse entsprach. Dies erfolgte, indem der Ursprung des Koordinatensystems in den tiefsten Punkt der Seilmarkierung in der ersten Kontaktphase gelegt wurde und das Ende der z-Achse den tiefsten Punkt der Seilmarkierung während der letzten Kontaktphase des Datensatzes schnitt. Zur Weiterverarbeitung wurden die Datensätze in Excel-Tabellen exportiert.

### 2.3.7 Datenbasis

Ausgehend von den Excel-Tabellen mit x-, y- und z-Koordinaten jeder Markierung in jedem Bild erfolgten die im folgenden beschriebenen Berechnungen der Parameter. Insgesamt wurden für die Auswertungen pro Tier jeweils zehn Vorschwing- und zehn Kontaktphasen des Greifschwanzes verwendet, zusammen also jeweils 40 Vorschwing- und Kontaktphasen (siehe Kapitel 2.4). Bei der Auswahl der Bewegungsphasen wurde darauf geachtet, dass mindestens zwei Bewegungsphasen innerhalb einer Filmsequenz aufeinander folgten.

Insgesamt standen zur weiteren Analyse 1.883 Bilder je Kameraperspektive zur Verfügung. Dies entsprach bei sechs digitalisierten Markierungen (drei Schwanzmarkierungen, Hände und Nacken) 11.298 Positionsangaben mit 33.894 Koordinaten.

## 2.4 Definition von Bewegungsphasen

Anhand der während des Digitalisierens eingegebenen Ereignisse konnten die Bewegungen des Greifschwanzes beim Hangeln in zwei Bewegungsphasen unterteilt werden:

**Kontaktphase:** der Greifschwanz ist im Kontakt mit dem Substrat

**Vorschwingphase:** der Greifschwanz hat keinen Kontakt mit dem Substrat.

Die Unterteilung in Bewegungsphasen erfolgt in Anlehnung an die für die Beschreibung der Abfolgen von Extremitäten gängige Verwendung von Bewegungsphasen im Lokomotionskontext und grenzt sich damit klar von den im Nahrungskontext verwendeten „Bewegungskategorien“ der Rüsselbewegungen ab (siehe Teil I dieser Arbeit).

## 2.5 Datenauswertung

Die Berechnung weiterer Parameter und deren Analyse erfolgte mit Hilfe von Excel 2000. Die 40 Kontakt- und 40 Vorschwingphasen wurden separat analysiert. Parameter wie Amplituden der Bewegungsbahnen, Winkel, Dauer, maximale Geschwindigkeiten und Beschleunigungen wurden pro Tier und Bewegungsphase separat für jede Markierung berechnet und gemittelt. Als statistische Kennwerte sind jeweils Mittelwert und Standardabweichung ( $M \pm SD$ ) des Messwertes ( $M$ ) und des absoluten Variationskoeffizienten ( $V$ ) angegeben, wobei letzterer mit  $V = SD / M$  die Schwankungsbreite der Werte quantifiziert. Im folgenden werden die Berechnungen in der Reihenfolge ihres Auftretens im Ergebnisteil erläutert.

### 2.5.1 Bewegungen des Greifschwanzes

Zur Untersuchung der Mechanik des Greifschwanzes wurden seine Bewegungen zunächst qualitativ beschrieben und ausgewählte Parameter anschließend quantifiziert.

#### 2.5.1.1 Qualitative Beschreibung der Greifschwanzbewegungen

Um einen Überblick über die Greifschwanzbewegungen zu erhalten, wurden die drei Greifschwanzmarkierungen Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) exemplarisch für das jüngste Tier Apura über den Verlauf einer bzw. zwei aufeinanderfolgender Kontakt- und Vorschwingphasen alle 40 ms auf die Frontal- ( $xy$ -), Sagittal- ( $yz$ -) und Horizontalebene ( $xz$ -) projiziert (Abb. II-2.3).

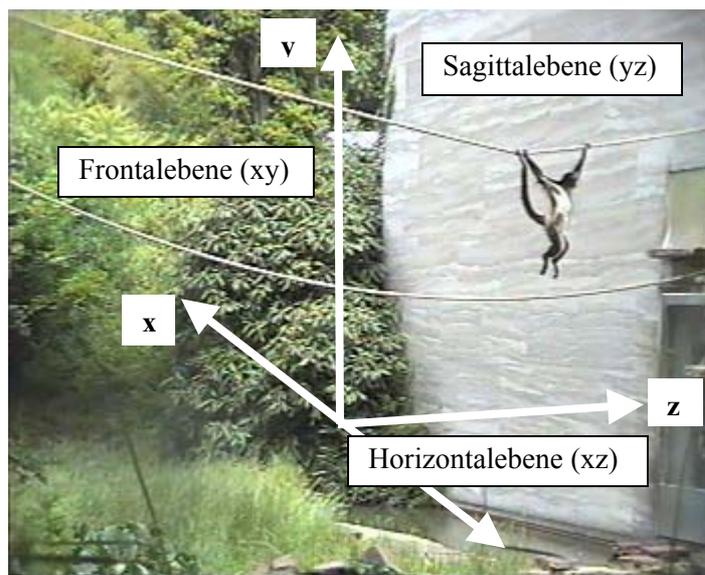


Abb. II-2.3: Ebenen zur Projektion der Markierungspositionen. Achsen  $x$ ,  $y$  und  $z$  sowie die sich daraus ergebenden Ebenen.

### 2.5.1.2 Biessamkeit des Greifschwanzes

Der Greifschwanz verfügt, über zahlreiche Wirbel mit der Schwanzbasis verbunden, über eine hohe Biessamkeit. In welchem Ausmaß die Markierungen des Greifschwanzes sich zueinander verlagern, wird anhand der Distanzen (Abb. II-2.4) zwischen der proximalen (p) bzw. distalen (d) und sacralen (s) Markierung bestimmt nach folgender Formel:

$$\begin{aligned} \text{Distanz (proximal-sacral)} &= [(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2 + (z_p - z_s)^2]^{1/2} && \text{bzw.} \\ \text{Distanz (distal-sacral)} &= [(x_d - x_s)^2 + (y_d - y_s)^2 + (z_d - z_s)^2]^{1/2}. \end{aligned}$$

Die über ein Zeitfenster von jeweils 5 % in der Kontakt- und 10 % in der Vorschwingphase gemittelten Distanzen wurden als Funktion des prozentualen Zeitanteils dargestellt.

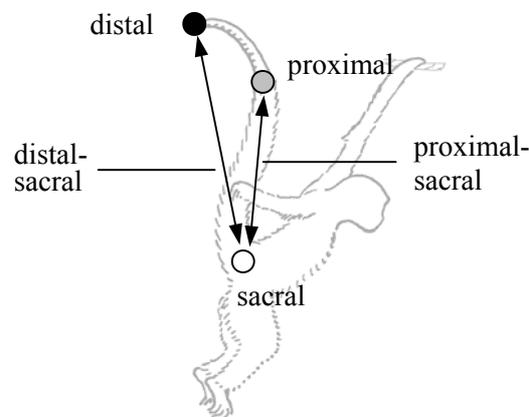


Abb. II-2.4: Schematische Darstellung der Berechnung von Biessamkeiten des Greifschwanzes. Berechnet wurden die Distanzen zwischen den Markierungen distal bzw. proximal und sacral.

### 2.5.1.3 Winkel der Auslenkungen in der Sagittal- und Frontalebene

- **Gesamtwinkel der Auslenkungen**

Die Winkel der sagittal und frontal ausgerichteten Ausschläge der Abschnitte zwischen jeweils zwei Markierungen in der Vorschwing- und Kontaktphase wurden dazu verwendet, die Mechanik der Greifschwanzbewegung schematisiert darzustellen. Um die Auslenkungen des Greifschwanzes innerhalb der Sagittal- und Frontalebene zu bestimmen (Abb. II-2.5), wurden die Winkel der Abschnitte zwischen Schwanzbasis und -mitte (ps), Schwanzmitte und -spitze (dp) und Schwanzbasis und -spitze (ds) zum Lot gemessen. Die frontale und sagittale Auslenkung ergab sich aus der Spannweite der nach rechts und links bzw. vorne und hinten vom Lot gerichteten Auslenkungen nach der Formel

$$\begin{aligned} \text{sagittal (ps; dp; ds)} &= \tan (z_{p, d, d} - z_{s, p, s}) / (y_{p, d, d} - y_{s, p, s}) \\ \text{frontal (ps; dp; ds)} &= \tan (x_{p, d, d} - x_{s, p, s}) / (y_{p, d, d} - y_{s, p, s}). \end{aligned}$$

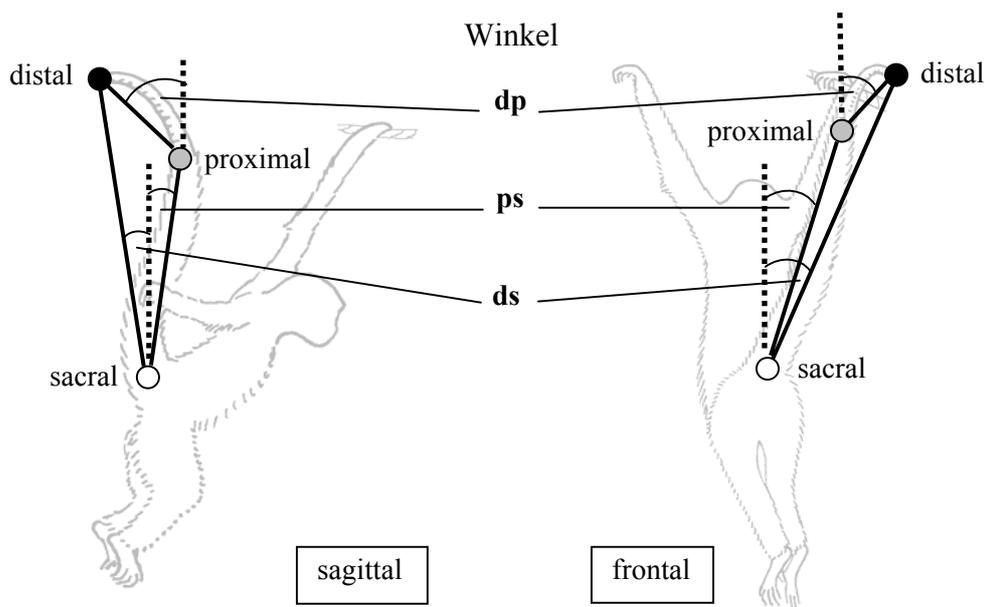


Abb. II-2.5: Schematische Darstellung der Winkelberechnung. Sagittal und frontal gerichtete Auslenkungen der Abschnitte dp, ps und ds zwischen distaler, proximaler und sacraler Markierung vom Lot (gestrichelte Linie).

- **Winkel am Übergang zwischen den Bewegungsphasen**

Gesondert betrachtet wurden die Winkel zu Beginn und am Ende der Vorschwing- und Kontaktphase.

- **Elongationen und Vertikalabstände im Vergleich zum mathematischen Pendel**

Um zu überprüfen, inwiefern die markierten Greifschwanzbereiche als Massepunkte der Bewegungsbahn eines idealen Pendels im Sinne eines mathematischen Pendels (Abb. II-2.6) folgen, wurde die zu erwartende ideale Elongation ( $s'$ ) sowie der vertikale Abstand vom Aufhängepunkt ( $y'$ ) mit Hilfe des Winkels der Schwanzauslenkung ( $\varphi$ ) zu Beginn der Bewegung anhand folgender Formeln berechnet

$$s' = s = \sin \varphi \cdot l \quad \text{und} \\ y' = y = \cos \varphi \cdot l.$$

Für  $l$  wurde in der Kontaktphase der Abstand zwischen Substrat ( $r$ ) und Schwanzbasis ( $s$ ) mit

$$l = [(x_r - x_s)^2 + (y_r - y_s)^2 + (z_r - z_s)^2]^{1/2}$$

und in der Vorschwingphase die funktionelle gesamte Länge des Greifschwanzes (Distanz distal-sacral, vgl. 2.5.1.2) eingesetzt. Des Weiteren wurde die Länge des proximalen Greifschwanzbereichs (Distanz proximal-sacral, vgl. 2.5.1.2) als Pendellänge eingesetzt.

Die als ideal berechneten Elongationen und Vertikalabstände wurden mit den gemessenen Werten verglichen. Hierfür wurden Elongationen und Vertikalabstände des gesamten Greifschwanzes und des proximalen Segments unter Verwendung der am Ende der Bewegungsphasen gemessenen Längen und Winkeln kalkuliert.

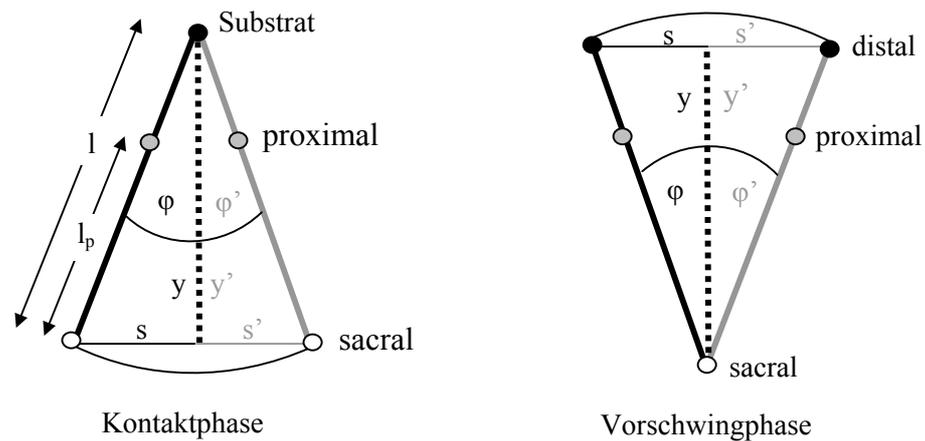


Abb. II-2.6: Schematische Darstellung der Berechnung von erwarteter Elongation und vertikalem Abstand zum Aufhängepunkt. Die erwartete Elongation ( $s'$ ) und der vertikale Abstand ( $y'$ ) entspricht einem idealen Pendel zur Folge der Elongation ( $s$ ) und dem vertikalen Abstand ( $y$ ) zu Beginn der Bewegung.

## 2.5.2 Bewegungsbahnen der Greifschwanzmarkierungen

Die Bewegungsbahnen der Greifschwanzmarkierungen können Hinweise auf die Koordination jedes Greifschwanzabschnittes geben. Zur Analyse diente die qualitative Beschreibung der Form sowie die Bestimmung der Länge, der Abweichungen von der direkten Bewegungsbahn und der Krümmung.

### 2.5.2.1 Eigenschaften der Bewegungsbahnen

Als Eigenschaften der Bewegungsbahnen aller Greifschwanzmarkierungen wurden deren Länge, der Anteil in Fortbewegungsrichtung und die Krümmung berechnet.

- **Länge der Bewegungsbahnen**

Die Länge der Bewegungsbahnen jeder Greifschwanzmarkierung in der Vorschwing- und Kontaktphase berechnete sich anhand der Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  aus der Summe der von Bild zu Bild ( $n$ ) zurückgelegten Abschnitte nach der Formel

$$\text{Länge der Bewegungsbahn} = \sum_{(1-n)} [(x_n - x_{(n-1)})^2 + (y_n - y_{(n-1)})^2 + (z_n - z_{(n-1)})^2]^{1/2}.$$

Das Substrat wurde für die Berechnung nicht abgezogen, da es bei der Koordination der Bewegungen mit berücksichtigt werden muss und alle Markierungen gleich beeinflusst.

- **Verhältnis zwischen den Bewegungsbahnlängen innerhalb der Frontalebene und in Fortbewegungsrichtung**

Für einen effektiven Einsatz des Greifschwanzes in der Lokomotion sollte die Bewegung hauptsächlich in Fortbewegungsrichtung und nicht senkrecht dazu erfolgen. Um die innerhalb der Frontalebene erfolgten vertikal und lateral gerichteten Abweichungen in Relation zu

den in Fortbewegungsrichtung zurückgelegten Bewegungsbahnlängen zu setzen, wurde der Index  $f/l$  berechnet. Die Längen der Bewegungsbahnen innerhalb der Frontalebene ( $f$ ) und entlang der Fortbewegungsrichtung ( $l$ ) berechneten sich für jede der Schwanzmarkierungen mit den Formeln

$$f = \sum_{(1-n)} [(x_n - x_{(n-1)})^2 + (y_n - y_{(n-1)})^2]^{1/2}$$

$$l = \sum_{(1-n)} (z_n - z_{(n-1)}).$$

Je kleiner das Verhältnis  $f/l$  ist, umso weiter konzentrieren sich die Bewegungen der Greifschwanzmarkierungen auf die Fortbewegungsrichtung.

- **Krümmung der Bewegungsbahnen**

Die Krümmung der Bewegungsbahn wurde mit Hilfe des Index der Krümmung (IC) und des Linearitätsindex (LI) erfasst:

IC = Länge der direkten Bewegungsbahn / Länge der Bewegungsbahn,

LI = Amplitude / Länge der direkten Bewegungsbahn,

wobei sich die Länge der direkten Bewegungsbahn aus der Strecke zwischen Start- (1) und Zielposition (n) der Markierungen berechnete:

$$\text{Länge der direkten Bewegungsbahn} = [(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2]^{1/2}.$$

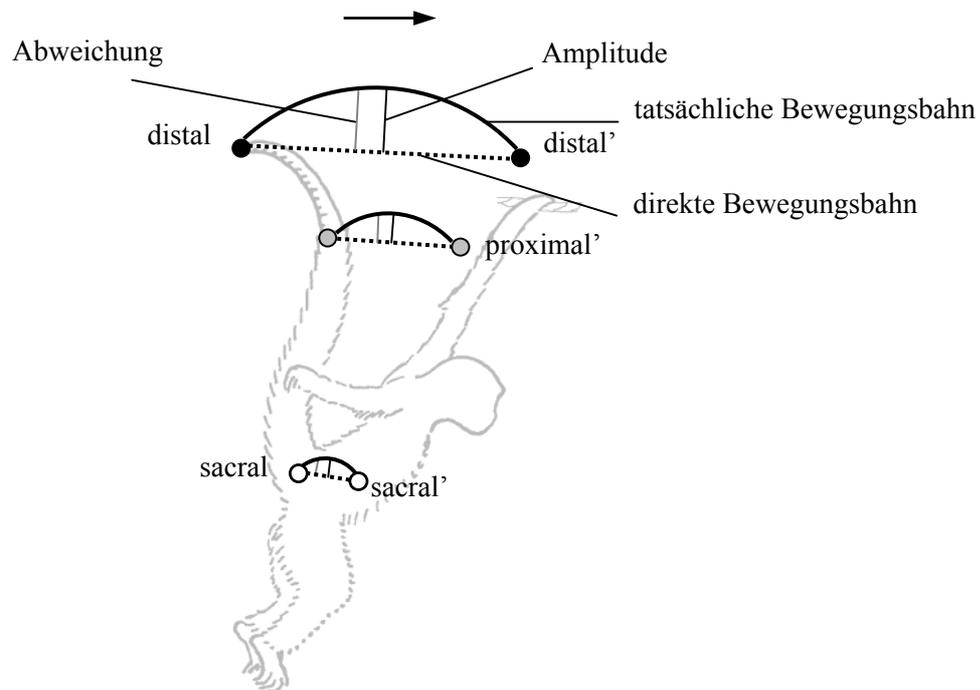
### 2.5.2.2 Tatsächliche Bewegungsbahnen der Greifschwanzmarkierungen

Die Pendelbewegung des Tieres beim Hangeln und die Beweglichkeit des Seiles hatten zur Folge, dass sich die Richtung der Fortbewegungsachse in jeder Phase transversal ( $x$ ) und vertikal ( $y$ ) leicht verschob. Zur Standardisierung wurden die Abstände zwischen der Position jeder der Markierungen und der direkten Bewegungsbahn als Strecke zwischen Start- und Zielposition der betreffenden Markierung separat für die Bewegungsphasen Vorschwing- und Kontaktphase pro Bild berechnet (Abb. II-2.7). Die Abstände entsprachen der tatsächlichen Bewegungsbahn als dem Bahnverlauf jeder Markierung im Verhältnis zur direkten Bewegungsbahn. Die Koordinaten der direkten Bewegungsbahn ( $x_{dir}$ ;  $y_{dir}$ ) berechneten sich Bild für Bild ( $m$ ) durch Addition der Koordinaten von gleich großen Streckenabschnitten zwischen Start- ( $x_1$ ;  $y_1$ ) und Zielkoordinaten ( $x_n$ ;  $y_n$ ) der Bewegung zu den Koordinaten der Startposition nach der Formel

$$x_{dir_m}; y_{dir_m} = x_1; y_1 + m \cdot (x_n; y_n - x_1; y_1) / N.$$

Die tatsächliche Bewegungsbahn wurde nun anhand der momentanen Abweichungen der tatsächlichen von den Koordinaten der direkten Bewegungsbahn ( $dir$ ) kalkuliert nach der Formel

$$\text{Abweichung} = [(x - x_{dir})^2 + (y - y_{dir})^2]^{1/2}.$$



*Abb. II-2.7: Schematische Darstellung der Parameter zur Analyse der tatsächlichen Bewegungsbahnen. Die tatsächlichen Bewegungsbahnen der Greifschwanzmarkierungen sind die Abweichungen der Markerpositionen von der direkten Bewegungsbahn als Strecke zwischen Start- und Zielpositionen (') der Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal), hier exemplarisch für die Vorschwingphase gezeigt. Der Pfeil gibt die Fortbewegungsrichtung an. Die Amplitude entspricht der maximalen Abweichung.*

Die Abweichungen wurden in Form eines standardisierten Profils dargestellt, indem die Werte über Zeitabschnitte von je 5 % in der Kontakt- und 10 % in der Vorschwingphase gemittelt wurden. Vorschwing- und Kontaktphase wurden für die grafische Darstellung aneinandergereiht.

Die Varianz der Bewegungsbahnen jeder Markierung wurde anhand der multiplen linearen Regressionsanalyse pro Individuum ermittelt, wobei die Übereinstimmungsmaße  $R^2$  für jedes Individuums mit dem F-Test auf Signifikanz überprüft wurden.

### 2.5.2.3 Amplituden der tatsächlichen Bewegungsbahnen

Als Amplituden galten die maximalen Abweichungen der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn.

- **Länge der Amplitude**

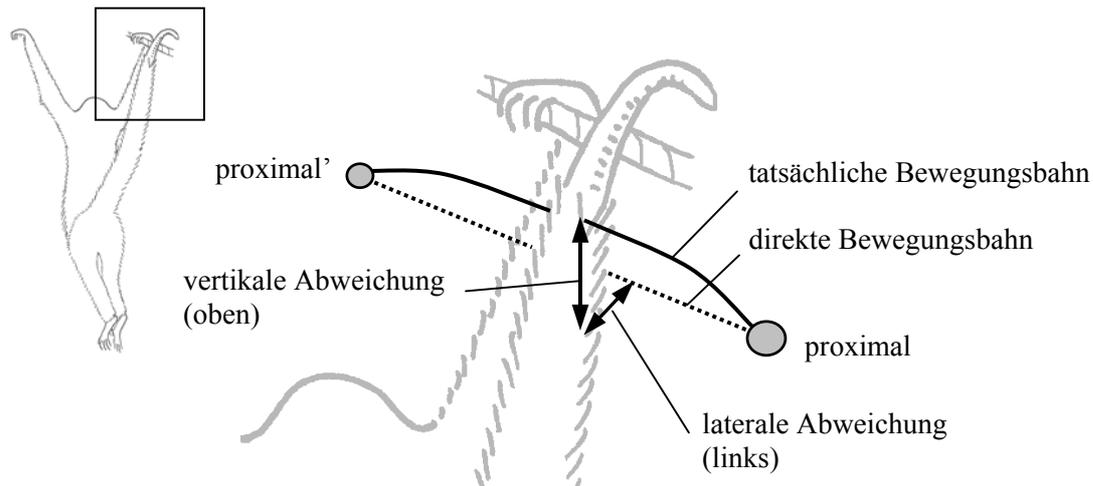
Die Amplituden wurden für die Kontakt- und Vorschwingphase jedes Markers gemittelt. Anhand der Variationskoeffizienten (V) konnten die Schwankungsbreiten interpretiert werden.

- **Laterale und vertikale Abweichungen innerhalb der Frontalebene**

Die tatsächlichen Bewegungsbahnen können innerhalb der Frontalebene vertikal und lateral von der direkten Bewegungsbahn abweichen (Abb. II-2.8). Daher wurde die jeweils größte laterale und vertikale Abweichung nach folgender Formel berechnet:

$$\text{lateral} = x - x_{\text{dir}}$$

$$\text{vertikal} = y - y_{\text{dir}}$$



*Abb. II-2.8: Schematische Darstellung der Berechnungen von lateralen und vertikalen Abweichungen der tatsächlichen von den direkten Bewegungsbahnen innerhalb der Frontalebene. Lateral und vertikal gerichtete maximale Abweichungen der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn, exemplarisch für die Greifschwanzmitte (proximal) in der Vorschwingphase von der Start- zur Zielposition (?) dargestellt.*

## 2.5.3 Dauer der Greifschwanzbewegungen

### 2.5.3.1 Beträge der Dauer

Die Dauer der Kontakt- und Vorschwingphasen ergab sich aus der Bildanzahl multipliziert mit 0,02 s. Berechnet wurde daraus der prozentuale Anteil der Kontaktphase an der Gesamtbewegung.

### 2.5.3.2 Vergleich mit der Dauer eines mathematischen Pendels

Um zu überprüfen, inwiefern die Bewegungen des Greifschwanzes einer Pendelbewegung entsprechen, wurde die gemessene Dauer mit der halben Periodendauer verglichen, die ein mathematisches Pendel mit entsprechender Länge für die Kontakt- und Vorschwingphase benötigen würde. Für eine annäherungsweise Berechnung kann trotz des größeren Auslenkungswinkel das Modell des mathematischen Pendels genutzt werden (PREUSCHOFT & DEMES, 1984). Die Periodendauer berechnet sich nach der Formel

$$T = 2 \cdot \pi \cdot [l / g]^{1/2}.$$

Diese Dauer wurde für den Greifschwanz, das proximale Segment des Greifschwanzes und den Tierkörper bestimmt. Als Pendellänge wurde jeweils der Abstand des Massenschwerpunkts  $m$  von seinem jeweiligen Aufhängepunkt eingesetzt. Zur Bestimmung der Lage des Massenschwerpunkts des Greifschwanzes wurde dieser in ein proximales ( $l_{\text{proximal}}$ ) und distales ( $l_{\text{distal}}$ ) zylinderförmiges Segment unterteilt, deren Längen sich aus den Distanzen zwischen den Markierungen distal (d), proximal (p) und sacral (s) berechnen ließen. Die Pendellänge des Greifschwanzes als Abstand des Massenschwerpunkts  $m_s$  vom Aufhängepunkt entsprach der Hälfte der proximalen plus der Hälfte der distalen Zylinderlänge:

$$\begin{aligned} m_s &= 1/2 l_{\text{proximal}} + 1/2 l_{\text{distal}}, & \text{wobei} \\ l_{\text{distal}} &= [(x_d - x_p)^2 + (y_d - y_p)^2 + (z_d - z_p)^2]^{1/2} & \text{und} \\ l_{\text{proximal}} &= [(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2 + (z_p - z_s)^2]^{1/2}. \end{aligned}$$

Analog wurde die Dauer berechnet, die ein mathematisches Pendel mit der Länge des proximalen Greifschwanzsegments für die Vorschwing- und Kontaktphase bräuchte. Hierfür ergab sich die Lage des Massenschwerpunkts  $m_p$  aus der halben Länge des proximalen Segments.

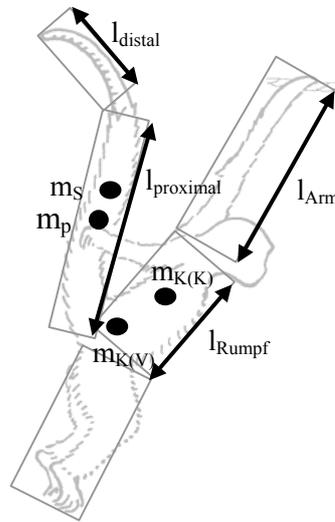
$$m_p = 1/2 l_{\text{proximal}}$$

Des weiteren wurde annäherungsweise die Dauer berechnet, die der Tierkörper (K) als Pendel um die Hand als Aufhängepunkt für eine Schwingung in der Vorschwing- und Kontaktphase bräuchte. Die Bestimmung der Lage des Massenschwerpunkts  $m_{(K)}$  erfolgte näherungsweise in Anlehnung an die von PREUSCHOFT & DEMES (1984) vorgestellte Unterteilung des Tierkörpers in Zylinder (Abb. II-2.9). In der Kontaktphase (K) trug sich der Greifschwanz selbst, weshalb der Massenschwerpunkt des Tierkörpers  $m_{(K)}$  in der Mitte des Rumpfes vermutet wurde. Wenn Arme und Beine in etwa gleich lang sind (Intermembral Index: 105; ROWE, 1996), ergab sich die Pendellänge des Tierkörpers  $l_{(K)}$  folglich aus der Armlänge ( $l_{\text{Arm}}$ ) plus der halben Rumpflänge ( $l_{\text{Rumpf}}$ ). Arm- und Rumpflänge berechneten sich aus den Distanzen zwischen den Markierungen Hand (h) und Nacken (n) bzw. Nacken und Schwanzbasis (s):

$$\begin{aligned} l_{(K)} &= l_{\text{Arm}} + 1/2 l_{\text{Rumpf}} \\ l_{\text{Arm}} &= [(x_h - x_n)^2 + (y_h - y_n)^2 + (z_h - z_n)^2]^{1/2} \\ l_{\text{Rumpf}} &= [(x_n - x_s)^2 + (y_n - y_s)^2 + (z_n - z_s)^2]^{1/2}. \end{aligned}$$

In der Vorschwingphase (V) wurde der Massenschwerpunkt  $m_{(V)}$  des um die Hand schwingenden Tierkörpers in Höhe der Schwanzbasis geschätzt, da der Greifschwanz mit 6 % des Körpergewichts (GRAND, 1977) schwerpunktsenkend einwirkt. Die Pendellänge  $l_{(V)}$  des Tierkörpers berechnete sich daher aus dem Abstand zwischen haltender Hand und Schwanzbasis nach der Formel

$$l_{K(V)} = [(x_h - x_s)^2 + (y_h - y_s)^2 + (z_h - z_s)^2]^{1/2}.$$



*Abb. II-2.9: Schematische Darstellung der Lage der Massenschwerpunkte. Die Berechnung der Lage der Massenschwerpunkte des Greifschwanzes  $m_s$ , des proximalen Segments  $m_p$  und des Tierkörpers  $m_k$  für die Vorschwingphase ( $m_{k(V)}$ ) und Kontaktphase ( $m_{k(K)}$ ) erfolgt anhand der Längen der zylinderförmigen Segmente.*

## 2.5.4 Geschwindigkeiten der Greifschwanzmarkierungen

Die momentanen linearen Geschwindigkeiten ( $v$ ) der Greifschwanzmarkierungen wurden von *Peak5* anhand von Bild zu Bild zurückgelegten Strecken pro Zeiteinheit ( $t = 0,02$  s) kalkuliert nach der Formel

$$v = [(x_n - x_{(n-1)})^2 + (y_n - y_{(n-1)})^2 + (z_n - z_{(n-1)})^2]^{1/2} / t.$$

### 2.5.4.1 Geschwindigkeitsprofile der Greifschwanzmarkierungen

Um die Raum-Zeit-Koordination der Schwanzmarkierungen zu erfassen, wurden die Geschwindigkeitsprofile von Schwanzbasis, -mitte und -spitze berechnet. Dargestellt wurden die über Zeitanteile von jeweils 10 % in der Vorschwing- und 5 % in der Kontaktphase gemittelten Geschwindigkeiten als Funktion der Zeitanteile.

Die Varianz der Geschwindigkeitsprofile pro Markierung wurde für jedes Individuum mit der multiplen linearen Regressionsanalyse geprüft. Mit dem F-Test konnten das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  statistisch abgesichert werden.

### 2.5.4.2 Maximalgeschwindigkeiten

- **Beträge der Maximalgeschwindigkeiten**

Die maximalen Geschwindigkeiten jeder Markierung wurden über alle Geschwindigkeitsprofile für Vorschwing- und Kontaktphase gemittelt.

- **Erreichen der Maximalgeschwindigkeiten**

Hierfür wurde der Anteil der Bewegungszeit beim Erreichen der Maximalgeschwindigkeit in % der gesamten Vorschwing- bzw. Kontaktphase angegeben.

### 2.5.5 Beschleunigungen und Verzögerungen der Greifschwanzmarkierungen

Mit den Beschleunigungen und Verzögerungen als Geschwindigkeitsänderungen pro Zeiteinheit kann die Geschwindigkeits-Zeit-Organisation einer Bewegung erfasst werden. Die momentane lineare Beschleunigung der Schwanzspitze, -mitte und -basis wurde nach

$$a = \Delta v / t$$

berechnet, wobei  $t = 0,02$  s.

#### 2.5.5.1 Beschleunigungsprofile der Greifschwanzmarkierungen

Im Beschleunigungsprofil erfolgte die Darstellung der mittleren Beschleunigungen bzw. Verzögerungen als Funktion prozentualer Zeitabschnitte von jeweils 10 % in der Vorschwing- und 5 % in der Kontaktphase. Die beiden Bewegungsphasen wurden aneinandergereiht. Positive Werte gaben die Beschleunigungen an, negative die Verzögerungen.

#### 2.5.5.2 Maximale Beschleunigungen und Verzögerungen

- **Beträge der maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen**

Die maximale Beschleunigung wurde als der größte positive, die maximale Verzögerung als der größte negative Wert der Geschwindigkeitsänderung pro Zeiteinheit bestimmt und über die 40 analysierten Bewegungen der Kontakt- und Vorschwingphase für jede der Schwanzmarkierungen gemittelt.

- **Erreichen der maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen**

Hierfür wurde der prozentuale Anteil der Bewegungszeit beim Erreichen der maximalen Beschleunigung bzw. Verzögerung angegeben. Aufgrund des sich über die Vorschwing- und

Kontaktphase erstreckenden Beschleunigungsprofils der Schwanzbasis erwies sich hier nur die Angabe der Beschleunigung in der Vorschwingphase und die der Verzögerung in der Kontaktphase als sinnvoll.

## 2.6 Statistische Verfahren

Die statistischen Tests wurden mit Hilfe des Programm-Pakets SPSS 11.0 durchgeführt. Nach Prüfung der grafischen Darstellungen wurden die Mittelwerte als normalverteilt behandelt. Die für jedes Tier gemittelten Parameter konnten in einem abhängigen t-Test miteinander verglichen und die Prüfgröße  $T$  auf Signifikanz überprüft werden. Zur Überprüfung der Übereinstimmung der Profile wurde die lineare multiple Regressionsanalyse angewandt, wobei das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  als Prüfgröße für den F-Test genutzt wurde. Das Signifikanzniveau wurde bei allen Tests auf  $p < 0,05$  festgesetzt.