

2 Methoden

Zur 3-D-Aufnahme und Analyse der Rüsselbewegungen wurde das *Peak5 Motion Analysis System* verwendet. Mit Hilfe dieses Systems war es möglich, die auf Video aufgezeichneten Bewegungen der am Rüssel definierten Markierungen in ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem zu transformieren. Anhand der x-, y- und z-Koordinaten der Markierungen konnten deren Bewegungsbahnen, Dauer, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen für verschiedene Bewegungskategorien des Rüssels analysiert werden. Mit den Parametern Länge, Amplitude und Integral konnten die Bewegungsbahnen quantifiziert werden. Korreliert mit der funktionellen Rüssellänge und einer approximativen Berechnung der wirkenden Kräfte konnte abgeschätzt werden, welche Bewegungsanteile rein mechanisch zustande kommen können.

2.1 Versuchstiere

Für die Analyse der Rüsselbewegungen wurden neun Afrikanische Elefantenkühe (*Loxodonta africana*, Blumenbach, 1797) verschiedenen Alters aus zwei unterschiedlichen Zoos ausgewählt (Tabelle I-2.1). Die Tiere wurden nach KURT (1986) in die Altersgruppen juvenil und adult eingeteilt. Bullen wurden für die Analyse der Rüsselbewegungen nicht einbezogen, da zu wenige Individuen zur Verfügung standen und ein geschlechtsspezifischer Unterschied in den Rüsselbewegungen im Zusammenhang mit der Körpergröße und dem unterschiedlichen Nahrungsbedarf zu erwarten gewesen wäre (STOKKE, 1999). Die beiden Kühe Bibi und Sabah führten ein 1 und 1,5 Jahre altes Kalb. In beiden Zoos wurden die Elefanten nachts in einem Stall angekettet und tagsüber auf einer mit Sandboden aufgeschütteten Außenanlage gehalten, wo sich die Tiere gelegentlich mit Futterobjekten beschäftigen konnten. Ihre Hauptmahlzeit erhielten die Tiere abends im Stall. Sie bestand jahreszeitlich bedingt aus Gras oder Heu, ergänzt durch diverse Obst- und Gemüsesorten.

Tabelle I-2.1: Name, Alter und Standort der untersuchten Afrikanischen Elefantenkühe

Name	Alter	Altersgruppe	Zoo
Csami	6	juvenil	Zoo Erfurt
Seronga	6	"	"
Safari	30	adult	"
Marina	42	"	"
Bibi*	15	"	Tierpark Friedrichsfelde, Berlin
Sabah*	15	"	"
Mafuta	19	"	"
Lilak	29	"	"
Dashi	32	"	"

* *Mutterkühe*

2.2 Versuchsaufbau und Videoaufnahme

In beiden Zoos erfolgten die Videoaufnahmen mit dem gleichen Versuchsaufbau auf der Außenanlage (Abb. I-2.1). Drei Panasonic Profi S-VHS Videokameras wurden im Abstand von etwa 10 m und einem Winkel von jeweils ca. 60° zueinander im Besucherareal vor der Außenanlage auf stabilen Stativen montiert, wobei die mittlere Kamera das Gehege frontal erfasste. Über die Fernbedienungsfunktion mit einem gemeinsamen Schaltkästchen verkabelt konnten alle Kameras synchron betrieben werden. Zur Synchronisation der Einzelbilder wurde vor jedes der Kameraobjektive eine LED (Light Emission Diode) derart montiert, dass sie während der Filmaufnahmen in einer Ecke des Bildausschnitts sichtbar blinkte.

Bevor die Elefanten morgens zwischen 8 und 9 Uhr auf die Außenanlage gelassen wurden, konnte der für das *Peak5 Motion Analysis System* konzipierte große Kalibrierkubus zur Eichung des Raumes am Futterplatz montiert werden. Mit der x-Achse quer, der z-Achse längs und der y-Achse senkrecht zur Richtung der mittleren Kamera ausgerichtet, wurde der Kubus zur optimalen Raumerfassung den Bildausschnitt füllend gefilmt. Am Standort des Kubus wurden über 20 Äpfel pro Individuum in zufälliger Anordnung ausgelegt. Anschließend konnte der Kubus abgebaut werden. Die Videokameras wurden auf manuellen Betrieb umgestellt, um die Verschlusszeit je nach wetterbedingten Lichtverhältnissen auf 1/1000 s bzw. 1/2000 s einzustellen. Dies gewährleistete eine möglichst klare Auflösung. Die Blendeneinstellung richtete sich nach dem aktuellen Lichteinfall und wurde auch während der Aufnahmen manuell angepasst. Anschließend konnten die Elefanten auf die Anlage gelassen werden.

Im Zoo Erfurt führten die Pfleger die Elefanten einzeln an die Futterstelle und richteten das Tier frontal zur mittleren Kamera aus. Im Tierpark Friedrichsfelde war dies nicht möglich. Hier kamen die Mütter mit ihren Kälbern einzeln hintereinander auf die Anlage, bevor die gesamte Herde folgte. Die Tiere waren daher häufig verdeckt, weshalb sich die Aufnahmen über mehrere Wochen erstreckten, um garantiert aus mindestens zwei Kameraperspektiven gleichzeitig gut sichtbare Rüsselbewegungen zu filmen.

Sobald sich die Elefanten den Äpfeln näherten, wurden per Knopfdruck am Schaltkasten alle drei Kameras gleichzeitig in den Aufnahmemodus versetzt, so dass alle Rüsselbewegungen gefilmt wurden. Die Aufzeichnungen erfolgten auf S-VHS Videokassetten mit 180 min Aufnahmedauer. Sobald das Fokustier den Rüssel mit dem gegriffenen Apfel zum Maul führte, wurden die LED für den Bruchteil einer Sekunde per Knopfdruck eingeschaltet, um das Lichtsignal am Bildrand jeder Kamera mit zu filmen.

Die Videoaufzeichnungen erstreckten sich im Sommer 2001 über drei Wochen im Tierpark Berlin Friedrichsfelde und über einen Vormittag im Zoo Erfurt. Sie umfassten pro Tier mindestens 20 Fresszyklen, um geeignetes Material für die Datenauswertung auswählen zu können. Insgesamt standen jeweils acht Stunden an Videomaterial zur Verfügung, aus denen die optimalen Einstellungen und Aufnahmen selektiert wurden.

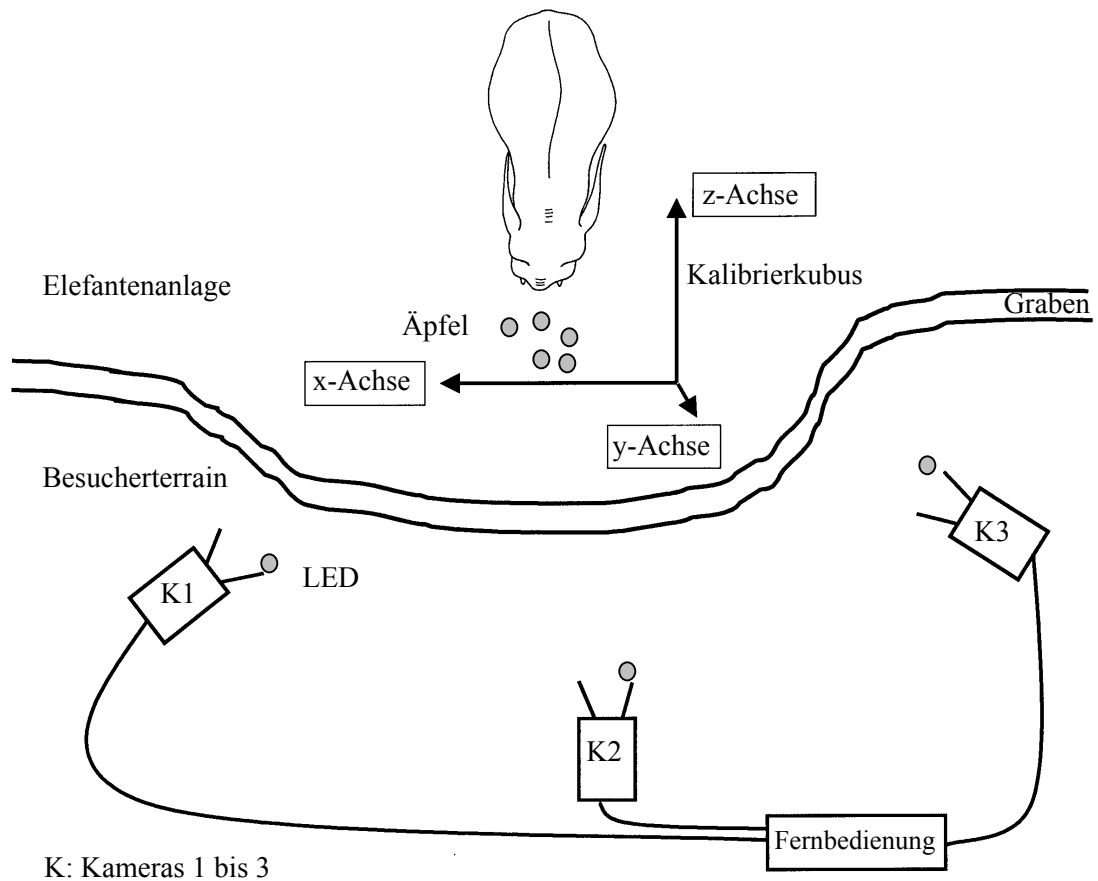


Abb. I-2.1: Schema des Aufbaus für die Videoaufnahmen der Rüsselbewegungen. Der projizierte Kalibrierkubus gibt die Orientierung der Achsen des kartesischen Koordinatensystems wieder.

2.3 Konfiguration des *Peak5 Motion Analysis Systems* und Datenaufnahme

Die Analyse der auf die Videobänder aufgezeichneten Bewegungen fand mit Hilfe eines Zugriffsbords statt, über das jeweils acht Videobilder in den Computer (486er) eingespeist wurden. An einem externen Monitor (Sony, Trinitron) konnten die Positionen der definierten Markierungen per Mausklick digitalisiert werden. Um die drei Videobänder im Abstand von 20 ms Bild für Bild analysieren zu können (bei der im PAL System verwendeten Bildfrequenz von 50 Bildern/s), mussten sie zwecks Identifizierung mit dem systemeigenen Zeitcode auf der zweiten Tonspur bespielt werden.

Es folgte die Kalibrierung des Raumes, indem die 25 weißen Kugeln des Kalibrierkubus' in jeder der drei Kameraperspektiven per Mausklick digitalisiert wurden, so dass deren Positionen mit den in das Programm eingegebenen Abmessungen perspektivisch abgeglichen werden konnten. Für die Berechnung des Raumausschnitts aus den zweidimensionalen Eingaben wurden 11 Unbekannte zur Lösung der Gleichung für die DLT (**D**irect **L**inear

Transformation) bestimmt, wobei ein Standardfehler von 0,001 toleriert wurde. Neben der Definition des Raumes mussten die im folgenden erläuterten weiteren Parameter bestimmt werden.

2.3.1 Definition der Markierungen

Insgesamt wurden zehn Markierungen definiert. Da die Tiere nicht direkt markiert werden durften, mussten solche Punkte am Rüssel gewählt werden, die beim Digitalisieren eindeutig zu erkennen waren. Dies traf auf die in Abb. I-2.2 dargestellten Markierungen zu. Die vierte Rüsselfalte, t_4 , befand sich bei allen Tieren auf einer Linie mit den beiden Stoßzahnansätzen, weshalb sie als Orientierungspunkt für alle anderen Rüsselfalten genommen wurde.

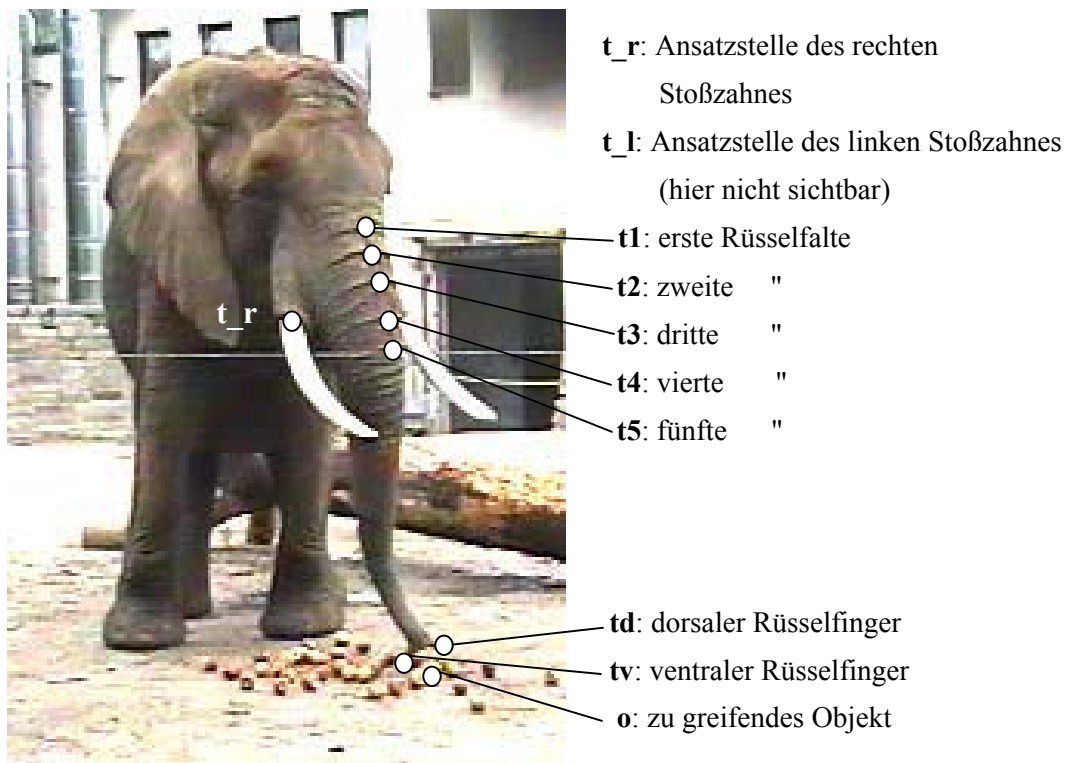


Abb. I-2.2: Digitalisierte Markierungen am Rüssel von *Loxodonta africana*.

Die Rüsselfalten konnten median gut gemessen werden, da der Verlauf des *M. maxillolabialis* eine mediane Struktur gut zu erkennen gab. Zwei aufeinander folgende Rüsselfalten begrenzten einen als „äußeres Segment“ bezeichneten Abschnitt des Rüssels. Die Stoßzahnansätze dienten als Markierungen des Schädels. Der Apfel als Ziel der Reichbewegung wurde als Referenzpunkt für etwaige Korrekturbewegungen des Rüsselfingers digitalisiert.

2.3.2 Definition von Ereignissen im Bewegungsablauf

Um die digitalisierten Bewegungen der Markierungen einem Kontext zuzuordnen, wurden die in der folgenden Liste aufgeführten Ereignisse gewählt und bei ihrem Auftreten über die Tastatur eingegeben. Das zweifelsfrei erkennbare Ereignis LED wurde zur Synchronisierung der digitalisierten Videosequenzen für die dreidimensionale Verrechnung verwendet.

LED	Beginn des Aufleuchtens der LED
rea_st:	der Rüsselfinger wird am Maul sichtbar und beginnt das Reichen
obj_st:	Berührung des Apfels mit dem Rüsselfinger (dorsal oder ventral).
ret_st:	der Rüssel verliert den Bodenkontakt, um zum Maul geführt zu werden.
mou_st	der dorsale Rüsselfinger erreicht das Maul.

2.3.3 Auswahl des Videomaterials

Aus den zahlreichen gefilmten Rüsselbewegungen wurden pro Individuum zehn Fresszyklen ausgesucht, die ungestört und reibungslos abliefen. Das Tier sollte weder den Kopf drehen, noch sichern oder mehrmals nach einem Apfel greifen, der Rüssel sollte nicht durch ein anderes Tier verdeckt sein und die Rüsselfinger sollten von mindestens zwei Kameraperspektiven aus gesehen werden. Auffällig langsam oder schnell erscheinende Bewegungen wurden nicht für die Analyse verwendet.

2.3.4 Digitalisierung

Die Digitalisierung aller definierten Punkte erfolgte Bild für Bild anhand der drei Videobänder manuell per Mausklick auf der Oberfläche des externen Monitors. Die automatische Positionierung des Cursors auf die im vorherigen Bild angeklickte Stelle verringerte den Fehler beim Digitalisieren, da nur eine kleine Korrektur der Punktposition notwendig war. Fehlerhaft angeklickte Stellen konnten sofort korrigiert werden. Jede Markierung wurde einmal pro Bild angeklickt. War sie in einer Perspektive schlecht oder gar nicht zu sehen, wurde dies mit der entsprechenden Eingabe vermerkt, so dass die Position dieses Punktes bei der Kalkulation vom Programm kompensiert werden konnte.

Nach dem ersten Digitalisierungsdurchgang konnten die eingegebenen Koordinaten grafisch dargestellt werden, um Unebenheiten in der Kurve ausfindig zu machen. Jeder Punkt wurde in dieser Prozedur nochmals überprüft und ein zweites Mal digitalisiert. Besonders berücksichtigt wurden hierbei die Markierungen des dorsalen und ventralen Rüsselfingers.

2.3.5 Bearbeitung der Rohdaten

Die kontrollierten und verbesserten Rohdaten wurden mit Hilfe des Butterworth Filters bei optimierter Schneidefrequenz der Digitalisierungsfrequenz von 50 Bildern/s geglättet, um zufällige Amplitudengeräusche und damit Digitalisierungsfehler zu filtern.

2.3.6 Kalkulation der Datensätze

Mit der *Direct Linear Transformation* (DLT) konnten die aus jeder der drei Kameraperspektiven jeweils zweidimensional erfassten Markierungspositionen zu dreidimensionalen Positionen im kartesischen Koordinatensystem miteinander verrechnet werden. Als Grundlage der Synchronisierung diente das per Tastatureingabe erfasste Ereignis des ersten Aufleuchtens der LED. Die kalkulierten Daten wurden zur Weiterverarbeitung in Excel-Tabellen exportiert.

2.3.7 Datenbasis

Die Excel-Tabellen mit den x-, y- und z- Koordinaten jedes Punktes in jedem Bild boten die Grundlage für alle weiteren Berechnungen. Insgesamt flossen die Daten der zehn Markierungen von insgesamt 10.770 Bildern pro Kameraperspektive in die Kalkulationen ein. Es wurden also 32.310 Bilder mit jeweils 10 Markierungen digitalisiert, so dass insgesamt 323.100 Koordinatenpunkte vorlagen.

2.4 Definition von Bewegungskategorien

In Anlehnung an die bereits definierten Bewegungskategorien eines Fresszyklus Asiatischer Elefanten (MARTIN, 1999) wurden mit Hilfe der Ereignisse die vier Bewegungskategorien Reichen, Objektkontakt, Zurückführen und Maul eindeutig voneinander differenziert.

Reichen:	Rüsselbewegung vom Maul zum Objekt
Objektkontakt:	Manipulation des Objektes mit dem Rüssel
Zurückführen:	Rüsselbewegung vom Boden zum Maul
Maul:	Ablegen des Futterobjekts im Maul

Der Begriff „Bewegungskategorie“ wird hier definiert, um die Bewegungen des Rüssels im Kontext der Nahrungsaufnahme klar von den Bewegungen des Greifschwanzes im Kontext der Lokomotion (siehe Teil II) abzugrenzen, die in „Bewegungsphasen“ differenziert wurden. Für alle weiteren Analysen wurden jeweils zehn Bewegungen pro Bewegungskategorie verwendet.

2.5 Datenauswertung

Für die Datenauswertung lagen die x-, y- und z-Koordinaten jedes Punktes Bild für Bild vor. Mit Hilfe von Excel 2000 konnten diese Koordinaten zu weiteren Berechnungen herangezogen werden. Die Bewegungskategorien Reichen, Zurückführen, Objektkontakt und Maul wurden separat analysiert. Pro Tier standen jeweils zehn Bewegungen zur Verfügung, so dass insgesamt 90 Bewegungen pro Bewegungskategorie in die Analysen einbezogen wurden. Parameter dieser Bewegungen wie Eigenschaften der Bewegungsbahnen, Dauer, Maximalgeschwindigkeiten und -beschleunigungen, wurden separat für jede Bewegungskategorie gemittelt. Als statistische Kennwerte wurden jeweils Mittelwert und Standardabweichung ($M \pm SD$) des Messwertes (M) und des absoluten Variationskoeffizienten (V) angegeben. Letzterer gibt mit $V = SD/M$ das Verhältnis der Schwankungen der Werte relativ zum Mittelwert an. Die individuell gemittelten Parameter wurden jeweils mit der funktionellen Rüssellänge korreliert. Dies erlaubte, erweitert durch die näherungsweise Berechnung der wirkenden Kräfte, eine Einschätzung des Einflusses mechanischer Zwänge auf die Bewegungsparameter. Im folgenden wird die Vorgehensweise der Auswertung gemäß der Kapitelunterteilung im Ergebnisteil behandelt.

2.5.1 Bewegungen des Rüssels

Um einen Überblick zu gewinnen, wurden die Bewegungen des Rüssels zunächst qualitativ beschrieben. Darauf aufbauend konnten die mechanisch relevanten Parameter quantifiziert werden.

2.5.1.1 Qualitative Beschreibung der Rüsselbewegungen während eines Fresszyklus'

Bereits bei der qualitativen Beschreibung der Rüsselbewegungen in den einzelnen Bewegungskategorien Objektkontakt, Zurückführen, Maul und Reichen in Kapitel 3.1.1 fielen deutliche Unterschiede zwischen den Bewegungen des proximalen und distalen Rüsselbereichs auf. Diese Rüsselabschnitte wurden daher getrennt voneinander untersucht.

2.5.1.2 Bewegungen des proximalen Rüsselabschnitts

Zunächst konzentrierte sich die quantitative Analyse in Kapitel 3.1.2 auf den proximalen Bereich des Rüssels.

- **Beweglichkeit der Rüsselfalten**

Mit der Berechnung der Abstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Rüsselfalten t1 bis t5 (Abb. I-2.3), separat für jede der vier Bewegungskategorien, ließ sich die Beweglichkeit der proximalen „äußeren Segmente“ ermitteln. Die Abstände t1-t2, t2-t3, t3-t4 und t4-t5 wurden jeweils nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Abstand } (t_m-t_n) = [(x_{t_n} - x_{t_m})^2 + (y_{t_n} - y_{t_m})^2 + (z_{t_n} - z_{t_m})^2]^{1/2},$$

wobei m die jeweils proximal und n die jeweils distal gelegene Rüsselfalte eines „äußeren Segments“ angibt. Die Verkürzung der Abstände entsprach einer Kontraktion, die Verlängerung einer Dehnung der äußeren Segmente. Anhand der Spannweiten der Abstände konnte die Verschiebung der Rüsselfalten unabhängig von der Kopfbewegung insgesamt berechnet werden. Des Weiteren wurden die Abstände zwischen Beginn und Ende einer Bewegungskategorie angegeben, um die Bewegungsrichtung der Rüsselfalten zu erfassen.

- **Vertikal und horizontal gerichtete Bewegungen der Rüsselfalten**

Das Ausmaß der vertikal nach oben und unten bzw. horizontal nach vorne und hinten gerichteten Bewegungen der Rüsselfalten ließ Rückschlüsse auf die Mechanik des proximalen Rüsselabschnitts beim Reichen und Zurückführen zu. Berechnet wurden die Differenzen der vertikalen (v) und horizontalen (h) Entfernungen zweier aufeinanderfolgender Rüsselfalten (Abb. I-2.3) beim Reichen und Zurückführen anhand der Formeln:

$$v(t_m-t_n) = y_{t_n} - y_{t_m} \quad \text{und}$$

$$h(t_m-t_n) = [(z_{t_n} - z_{t_m})^2 + (x_{t_n} - x_{t_m})^2]^{1/2}.$$

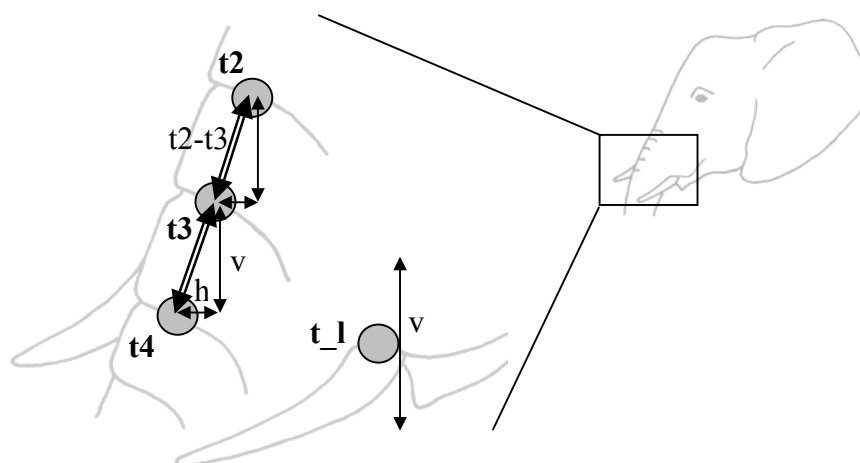


Abb. I-2.3: Schematische Darstellung der Berechnung von Rüsselfalten- und Kopfbewegungen. Exemplarisch skizziert sind die Abstände (Doppelpfeile) zwischen zwei sukzessiven Rüsselfalten t2 bis t4, die Vertikalverschiebungen (v) der Rüsselfalten nach oben bzw. unten und deren Horizontalverschiebungen (h) nach vorne bzw. hinten sowie die vertikalen Kopfbewegungen, exemplarisch ermittelt anhand der Verschiebungen des linken Stoßzahnes (t₁).

2.5.1.3 Kopfbewegungen

Ein Heben oder Senken des Kopfes während oder unmittelbar vor der Rüsselbewegung könnte deren Dynamik beeinflussen. Welches Ausmaß die Kopfbewegungen annahmen und welchen Beitrag sie zur Initialisierung der Rüsselbewegungen leisteten, wurde anhand der Verschiebungen der Stoßzahnmarkierungen (als Kopfskelettanteil) in Kapitel 3.1.3 ermittelt.

- **Ausmaß der Kopfbewegungen**

Die Differenzen der vertikalen Positionen eines Stoßzahnes t_1 (Abb. I-2.3) zwischen Beginn (1) und Ende (n) des Objektkontakts, Zurückführens, Reichens und im Maul gaben das Ausmaß der Kopfbewegungen an und wurden mit Hilfe der Formel

$$\text{vertikale Kopfbewegung} = y_{t_1(n)} - y_{t_1(1)}$$

bestimmt. Negative Differenzen entsprachen einem Heben, positive Differenzen einem Senken des Kopfes.

- **Zeitpunkt der Kopfbewegungen**

Um festzustellen, inwiefern Reichen und Zurückführen durch Kopfbewegungen initiiert werden könnten, z. B. durch Schwungholen vor Beginn des Zurückführens, wurde die Anzahl der unmittelbar vor dem Beginn des Reichens und Zurückführens nach oben und unten gerichteten Kopfbewegungen bestimmt. Gleichzeitig wurde die Dauer des Kopfhebens oder -senkens unmittelbar vor dem Beginn des Reichens bzw. Zurückführens anhand der Bildanzahl multipliziert mit 0,02 s bestimmt.

2.5.2 Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers

Da sich der Rüsselfinger als Effektor der Bewegungen erwies, konzentrierten sich die folgenden Analysen in Kapitel 3.2 auf diese Markierung. Die Eigenschaften von Bewegungsbahnen erlauben Rückschlüsse auf die Organisation und Koordination der Bewegungen. Daher wurden Länge und Krümmung berechnet, um daraus die Form der Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers beim Objektkontakt, Reichen und Zurückführen abzuleiten. Um zu überprüfen, welchen mechanischen Zwängen die Bewegungsbahnen beim Reichen und Zurückführen ausgesetzt waren, wurden die Parameter der Bewegungsbahn jeweils mit der funktionellen Rüssellänge korreliert.

2.5.2.1 Die funktionelle Rüssellänge als physikalische Einflussgröße

Um den Einfluss der Länge und morphologisch daran gekoppelt des Durchmessers und Gewichts des Rüssels auf seine Biomechanik zu untersuchen, wurde die funktionelle Rüssellänge berechnet. Diese entsprach beim Reichen und Zurückführen der Länge der

direkten Bewegungsbahn (dir) und wurde aus dem Abstand zwischen Start- (1) und Zielposition (n) des dorsalen Rüsselfingers nach der Formel:

$$\text{funktionelle Rüssellänge} = [(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2]^{1/2}$$

berechnet (Abb. I-2.4). Die anatomische Länge des Rüssels erwies sich infolge seiner Längenverschieblichkeit als nur ungenau bestimmbar und daher irrelevant. Die Koordinaten der imaginären Strecke zwischen Start- und Zielposition des dorsalen Rüsselfingers wurden als direkte Bewegungsbahn (dir) bezeichnet. Zu ihrer Bestimmung (x_{dir} ; y_{dir} ; z_{dir}) wurden die Differenzen der x-, y- und z-Koordinaten zwischen Start- (1) und Endposition (n) des Rüsselfingers anhand der Bildanzahl (N) in gleichgroße Abschnitte unterteilt und in jedem Bild mit einer Bildnummer (m) zu den Koordinaten der Startposition addiert:

$$x_{dir}(m) = x_1 + (m - 1) \cdot (x_n - x_1) / N.$$

Analog wurden die y- und z-Koordinaten der direkten Bewegungsbahn ermittelt.

2.5.2.2 Trajektorien des dorsalen Rüsselfingers

Um einen Überblick über die Bewegungen des dorsalen Rüsselfingers im dreidimensionalen Raum zu erhalten, wurden seine Trajektorien im Kapitel 3.2.2 exemplarisch für einen Fresszyklus dargestellt. Unter den Trajektorien sind dabei in Anlehnung an die Definition von ABEND et al. (1982) die Wege des Effektors bei der Positionsveränderung von der Start- zur Zielposition zu verstehen. Hierfür wurde die Position des dorsalen Rüsselfingers der adulten Kuh „Safari“ exemplarisch für einen Fresszyklus alle 20 ms auf die drei Ebenen, die Horizontal- (xz-), Frontal- (xy-) und Medianebene (yz-) projiziert. Der Begriff der Trajektorien beschränkt sich in dieser Arbeit auf die dreidimensionale Darstellung und Beschreibung des zurückgelegten Weges.

2.5.2.3 Eigenschaften der Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers

Für die quantitative Analyse der Positionsveränderungen des dorsalen Rüsselfingers wird der Begriff der Bewegungsbahn verwendet, um seine in ihrer Dimension zerlegten, normierten und relativierten Positionsveränderungen von seinen realen Trajektorien zu differenzieren. Die Eigenschaften der Bewegungsbahnen wurden in Kapitel 3.2.3 separat für die Bewegungskategorien Objektkontakt, Reichen und Zurückführen wie folgt quantifiziert (da der Rüsselfinger im Maul nicht zu sehen war, wurden seine Bewegungsbahnen in der Bewegungskategorie „Maul“ nicht berücksichtigt):

- **Länge der Bewegungsbahnen**

Die Länge der Bewegungsbahnen wurde jeweils durch Summierung der Strecken zwischen den Koordinaten des Rüsselfingers in zwei aufeinander folgenden Bildern (n) berechnet:

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

Die Länge der in horizontaler (h) und vertikaler (v) Bewegungsrichtung zurückgelegten Bewegungsbahnen (Abb. I-2.4) berechnete sich mit Hilfe der Formeln

$$h = \sum_{(1-n)} [(x_n - x_{(n-1)})^2 + (z_n - z_{(n-1)})^2]^{1/2} \quad \text{und}$$

$$v = \sum_{(1-n)} (y_n - y_{(n-1)}),$$

wobei n die Bildnummer angibt. Daraus ergibt sich zur Quantifizierung der Bewegungsbahnanteile der Index

$$h/v = h / v.$$

- **Krümmung der Bewegungsbahnen**

Die Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers waren stets länger als die funktionelle Rüssellänge, weshalb sie sich krümmten. Das Ausmaß der Krümmung wurde mit Hilfe des Index der Krümmung (IC), des Linearitätsindex (LI) und des mittleren Fraktals (FractD) bestimmt:

$$\text{IC} = \text{funktionelle Rüssellänge} / \text{Länge der Bewegungsbahn}$$

$$\text{LI} = \text{Amplitude} / \text{funktionelle Rüssellänge}$$

$$\text{FractD} = \text{fraktale Dimension der Bewegungsbahn}.$$

Beim Objektkontakt wurde nur das mittlere Fraktal bestimmt, da Richtungsumkehrungen während der Bewegung möglich gewesen wären, welche die Werte insbesondere des LI hätten verfälschen können. Das mittlere Fraktal gibt die fraktale Dimension der Bewegungsbahn an (MANDELROT, 1967), die zwischen 1 und 2 liegen kann. Ist die Bewegungsbahn gerade, ähnelt sie einer Linie mit der Dimension 1. Je stärker sich die Bewegungsbahn krümmt, desto eher füllt sie eine Fläche aus und nähert sich damit der 2. Dimension. Die Berechnung der Fraktale erfolgte mit Hilfe des Programms „fractal“ (NAMS, 1998), wobei das mittlere Fraktal unter Anwendung der Operation DFract bestimmt wurde.

2.5.2.4 Tatsächliche Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen und Zurückführen

Die Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers durchquerten Median-, Frontal- und Horizontalebene und waren infolge der variierenden Positionen der dargebotenen Äpfel verschieden ausgerichtet. Zur Standardisierung der Bewegungsbahnen wurde die Abweichung des dorsalen Rüsselfingers von der direkten Bewegungsbahn als Strecke

zwischen seiner Start- und Zielposition berechnet und in Kapitel 3.2.4 dargestellt. Dies erfolgte durch Subtraktion der Koordinaten der direkten Bewegungsbahn (dir) von den gemessenen Koordinaten des Rüsselfingers:

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

Die auf die direkte Bewegungsbahn relativierten Wege des dorsalen Rüsselfingers wurden im folgenden als tatsächliche Bewegungsbahn (tats) bezeichnet (Abb. I-2.4). Aufgrund der geringfügig variierenden Dauer der Bewegungen wurden die Kurven normiert, indem die Abweichungen über Zeitabschnitte von jeweils 5 % der Bewegungszeit gemittelt wurden. Die Varianz der tatsächlichen Bewegungsbahnen wurde mit Hilfe der multiplen linearen Regressionsanalyse für jedes Individuum bestimmt, wobei sich der Bestimmtheitsgrad R^2 als Prüfgröße für den F-Test ergab.

Die Form der tatsächlichen Bewegungsbahn wurde anhand der im folgenden erläuterten Parameter analysiert, die schematisch in Abb. 1-2.4 dargestellt sind.

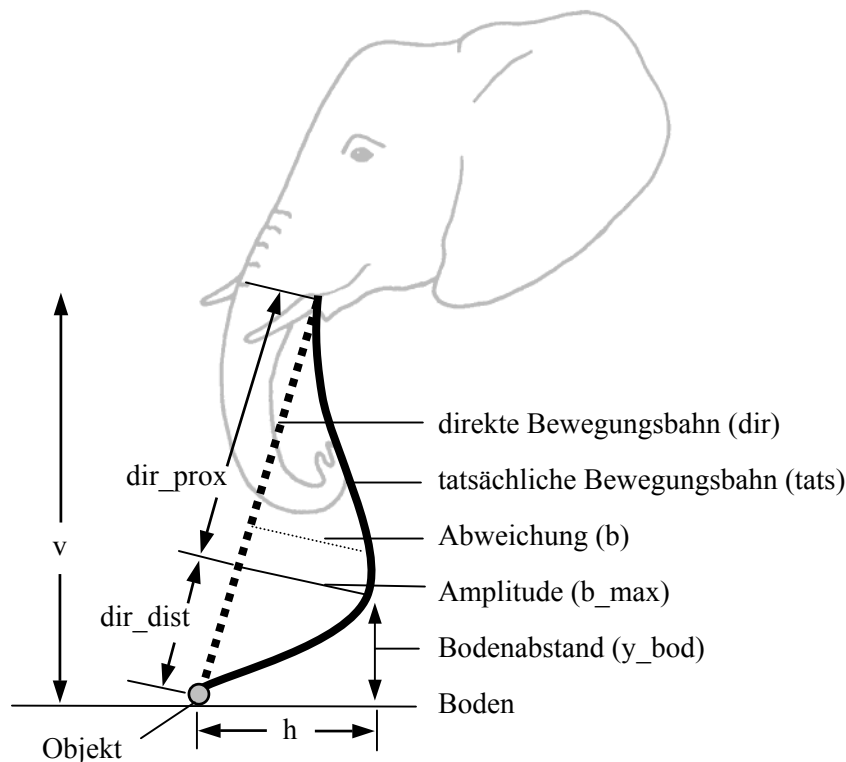


Abb. I-2.4: Schematische Darstellung der Parameter zur Analyse der tatsächlichen Bewegungsbahn des dorsalen Rüsselfingers. Dies gilt für Reichen und Zurückführen. v gibt die Länge der vertikal, h die der horizontal zurückgelegten tatsächlichen Bewegungsbahn an. dir_{prox} bezeichnet den Bereich der direkten Bewegungsbahn proximal des Erreichens der Amplitude (b_{max}), dir_{dist} den Bereich der direkten Bewegungsbahn distal des Erreichens der Amplitude (b_{max}) als maximale Abweichung (b). Mit y_{bod} wird der Abstand des dorsalen Rüsselfingers vom Boden beim Erreichen der Amplitude beschrieben.

2.5.2.5 Amplituden der tatsächlichen Bewegungsbahnen

Als Amplitude wurde die maximale Abweichung der tatsächlichen Bewegungsbahn des Rüsselfingers von seiner (imaginären) direkten Bewegungsbahn bezeichnet. Länge, Richtung und räumliche sowie zeitliche Lage der Amplitude, dargestellt in Kapitel 3.2.5, charakterisierten die tatsächliche Bewegungsbahn. Jeweils korreliert mit der funktionellen Rüssellänge ließen sich die Einflüsse der Rüsselmorphologie auf die tatsächlichen Bewegungsbahnen ableiten.

• Länge der Amplitude

Die Länge der Amplitude gab den Betrag der maximalen Abweichung der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn an. Des weiteren wurde die maximale Abweichung der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn (dir) innerhalb der Sagittalebene (sagittal) anhand der Differenzen der z-Koordinaten sowie innerhalb der Frontalebene (frontal) anhand der Differenzen der x-Koordinaten berechnet (Abb. I-2.5) nach den Formeln

$$\begin{aligned} \text{sagittal} &= z - z_{\text{dir}} \quad \text{und} \\ \text{frontal} &= x - x_{\text{dir}}. \end{aligned}$$

• Erreichen der Amplitude

Um die Lage der Amplitude (b_{max}) in Relation zum Raum einerseits und zur Bewegungsbahn andererseits zu bestimmen, wurden jeweils folgende Parameter beim Erreichen der Amplitude erfasst:

- Abstand des dorsalen Rüsselfingers vom Boden (y_{bod}), mit Hilfe der Formel

$$\begin{aligned} y_{\text{bod}_{b_{\text{max}}}} (\text{Reichen}) &= y_n - y_{b_{\text{max}}} \quad \text{bzw.} \\ y_{\text{bod}_{b_{\text{max}}}} (\text{Zurückführen}) &= y_{b_{\text{max}}} - y_1, \end{aligned}$$

wobei 1 die Start- und n die Zielposition des dorsalen Rüsselfingers angibt,

- prozentualer Anteil der direkten Bewegungsbahn proximal der Amplitude (dir_{prox}), wobei sich die Länge von dir_{prox} unter Verwendung der Formel

$$\begin{aligned} \text{dir}_{\text{prox}_{b_{\text{max}}}} (\text{Reichen}) &= [(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2]^{1/2} / N \cdot n_{b_{\text{max}}} \quad \text{bzw.} \\ \text{dir}_{\text{prox}_{b_{\text{max}}}} (\text{Zurückführen}) &= [(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2]^{1/2} / N \cdot (n - n_{b_{\text{max}}}) \end{aligned}$$

berechnete. Dabei gibt n die Bildnummer, N die Anzahl der Bilder und $n_{b_{\text{max}}}$ die Anzahl der Bilder beim Erreichen der Amplitude an,

- prozentualer Anteil der tatsächlichen Bewegungsbahn proximal der Amplitude ($\text{tats}_{\text{prox}}$), wobei sich die Länge der tatsächlichen Bewegungsbahn proximal der Amplitude mit Hilfe der Formeln

tats_prox_{b_max} (Reichen) =

$$\sum (1 - b_{\max}) [(x_{b_{\max}} - x_{(b_{\max}-1)})^2 + (y_{b_{\max}} - y_{(b_{\max}-1)})^2 + (z_{b_{\max}} - z_{(b_{\max}-1)})^2]^{1/2}$$

tats_prox_{b_max} (Zurückführen) =

$$\sum (b_{\max} - n) [(x_{b_{\max}} - x_{(b_{\max}-1)})^2 + (y_{b_{\max}} - y_{(b_{\max}-1)})^2 + (z_{b_{\max}} - z_{(b_{\max}-1)})^2]^{1/2}$$

berechnete. 1 gibt die Startposition, b_max die Position beim Erreichen der Amplitude und n die Zielposition des dorsalen Rüsselfingers an.

Die Varianz der Position des Rüsselfingers, an welcher seine Bewegungsbahn ihre Amplitude erreichte, kann Hinweise auf die Planungsstrategie der Bewegung geben. Wird die Amplitude in konstantem Abstand zum Boden erreicht, könnte der Raum als Referenzsystem zur Koordination der Bewegung dienen. Ist die zu überwindende Distanz zum Ziel ausschlaggebend, ist eine geringe Varianz des prozentualen Anteils der direkten Bewegungsbahn beim Erreichen der Amplitude zu erwarten.

- **Präferenzen der Abweichungen in der Sagittalebene**

Die Abweichungen innerhalb der Sagittalebene ergaben sich aus den Differenzen der z-Koordinaten zwischen tatsächlicher und direkter Bewegungsbahn. Positive Werte kennzeichneten autozentrisch (zum Körper hin) gerichtete Bewegungen. Negative Werte kennzeichneten allozentrisch (vom Körper weg) gerichtete Bewegungen (Abb. I-2.5). Um beurteilen zu können, ob es sich eher um temporäre oder stetige Abweichungen handelte, wurden die Flächen zwischen tatsächlicher und direkter Bewegungsbahn jeweils für die autozentrische und allozentrische Abweichung berechnet. Dies erfolgte unter Berücksichtigung positiver und negativer sagittaler Abweichungen nach der in Kapitel 2.5.2.6 aufgeführten Formel für die Fläche (sagittal).

- **Präferenzen der lateralen Abweichungen in der Frontalebene**

Die Richtung der lateralen Abweichungen innerhalb der Frontalebene ergab sich aus den positiven (links) bzw. negativen (rechts) Differenzen zwischen den x-Koordinaten der tatsächlichen und direkten Bewegungsbahn (Abb. I-2.5). Die Fläche zwischen der tatsächlichen und der direkten Bewegungsbahn innerhalb der Frontalebene ergab sich unter Berücksichtigung der Vorzeichen nach der in Kapitel 2.5.2.6 aufgeführten Formel Fläche (frontal).

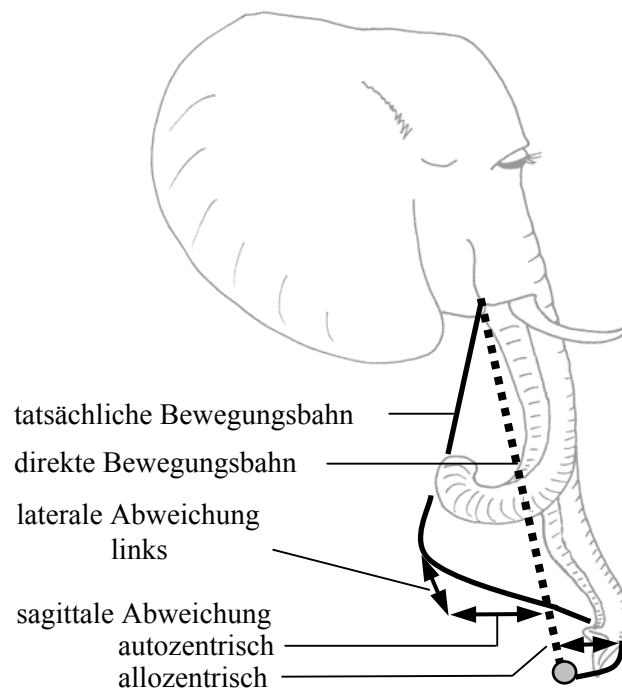


Abb. I-2.5: Schematische Darstellung der Abweichungen der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn des dorsalen Rüsselfingers innerhalb der Frontal- und Sagittalebene. Innerhalb der Frontalebene kann es zu lateralen Abweichungen nach links (hier dargestellt) und rechts kommen; innerhalb der Sagittalebene sind sagittale Abweichungen zum Körper hin (autozentrisch) und vom Körper weg (allozentrisch) möglich.

2.5.2.6 Flächen zwischen tatsächlicher und direkter Bewegungsbahn

Die Berechnung der Flächen, die sich zwischen den tatsächlichen und direkten Bewegungsbahnen beim Reichen und Zurückführen aufspannen, ermöglichte eine Einschätzung der Kontinuität der Abweichungen. Je größer die Fläche, desto langfristiger wurden die Abweichungen beibehalten. Da die Flächen durch Addition der Teilflächen pro Bild berechnet wurden, ließen sich die Amplituden gegenüber Ausreißern puffern. Zur Flächenberechnung wurden die Abweichungen (b) der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn mit der Strecke des jeweiligen Abschnitts der direkten Bewegungsbahn (s_{dir}) pro Bild (n) multipliziert und die sich ergebenden Teilflächen addiert.

$$\text{Fläche} = \sum (1-n) [b \cdot s_{dir} - (b_n - b_{(n-1)}) \cdot s_{dir} / 2], \quad \text{wobei}$$

$$s_{dir} = [(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2]^{1/2} / N.$$

Dabei wurde zwischen den Teilflächen proximal und distal der Amplitude differenziert, um die Form der Bewegungsbahn in Kapitel 3.2.6 detaillierter quantifizieren zu können.

- **Flächen der Abweichungen in der Sagittal- und Frontalebene**

Um die Eigenschaften der Abweichungen innerhalb der sagittalen (b_{sag}) und frontalen Ebene (b_{fro}) vergleichen zu können, wurden die entsprechenden Flächen zwischen tatsächlicher und direkter Bewegungsbahn beim Reichen und Zurückführen berechnet mit Hilfe der Formeln

$$\begin{aligned} \text{Fläche (sagittal)} &= \sum_{(1-n)} b_{\text{sag}} \cdot s_{\text{dir}} - [(b_{\text{sag}_n} - b_{\text{sag}_{(n-1)}}) \cdot s_{\text{dir}} / 2] && \text{bzw.} \\ \text{Fläche (frontal)} &= \sum_{(1-n)} b_{\text{fro}} \cdot s_{\text{dir}} - [(b_{\text{fro}_n} - b_{\text{fro}_{(n-1)}}) \cdot s_{\text{dir}} / 2], && \text{wobei} \\ s_{\text{dir}} &= [(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2]^{1/2} / N. \end{aligned}$$

2.5.2.7 Anpassungen der tatsächlichen Bewegungsbahnen an verschiedene Positionen der Objekte

Um zufällig auf dem Boden verteilt liegende Objekte gezielt zu erreichen, müsste sich die tatsächliche Bewegungsbahn beim Reichen in ihrer Form verändern. Alternativ könnte sich die tatsächliche Bewegungsbahn an die auf das Objekt ausgerichtete direkte Bewegungsbahn anpassen. In Kapitel 3.2.7 werden daher die in Abb. I-2.6 gezeigten Bewegungsbahnparameter mit der Objektposition korreliert. Die Objektposition berechnete sich aus dem Abstand des Objektes vom Lot, welches senkrecht zur Position der dorsalen Rüsselspitze beim Start der Bewegung ($td(1)$) gefällt wurde, nach der Formel

$$\text{Objektlage} = [(x_{\text{obj}} - x_{\text{td}(1)})^2 + (z_{\text{obj}} - z_{\text{td}(1)})^2]^{1/2}.$$

Mit Hilfe des Pearson Korrelationskoeffizienten r konnte bestimmt werden, welche der Bewegungsbahnparameter für eine Anpassung an verschiedene Objektpositionen entscheidend waren. Hierfür wurden die Daten von fünf Tieren verwendet, die nach verschieden weit entfernten Äpfeln griffen.

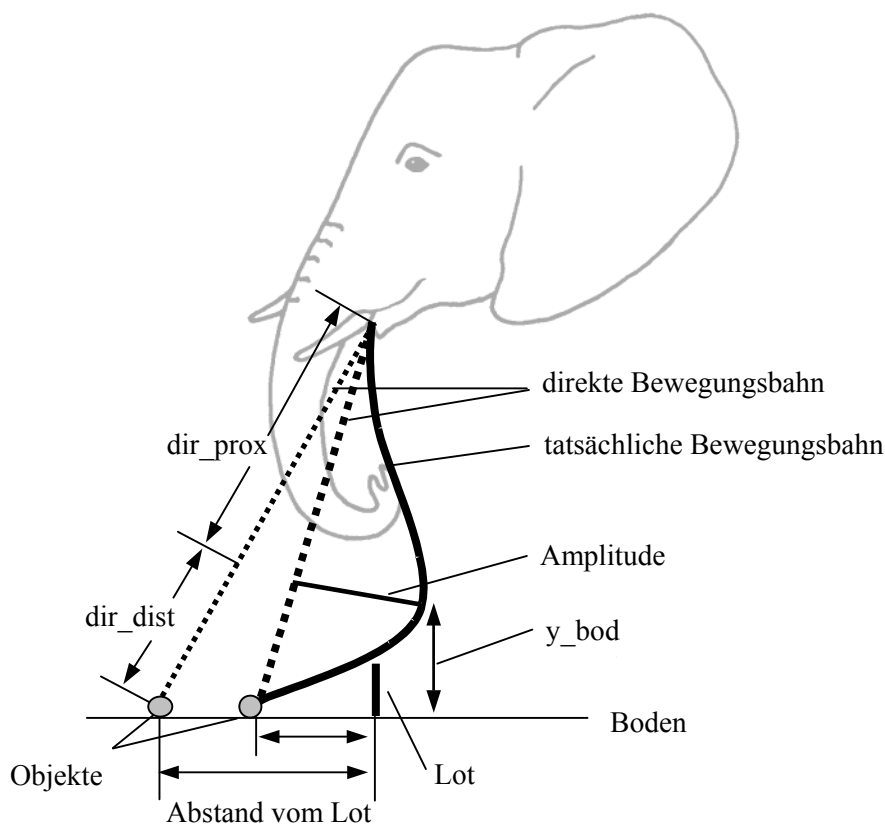


Abb. I-2.6: Schematische Darstellung der Parameter zur Berechnung der Anpassungen der tatsächlichen Bewegungsbahnen an verschiedene Objektpositionen beim Reichen.

2.5.3 Dauer der Bewegungen

Die Dauer und zeitliche Strukturierung einer Bewegung repräsentiert die für ihre Ausführung und temporäre Organisation zur Verfügung stehende Zeit. Davon hängt ab, in welchem Ausmaß Korrekturbewegungen physiologisch möglich wären und inwiefern die Ausführung der Bewegung von einer Planung im Vorfeld abhängt.

2.5.3.1 Dauer der Bewegungskategorien

Die Dauer der Bewegungskategorien Objektkontakt, Zurückführen, Maul und Reichen wurde anhand der Anzahl der Bilder multipliziert mit 0,02 s berechnet und in Kapitel 3.3.1 dargestellt.

2.5.3.2 Zeitliche Strukturierung von Reichen und Zurückführen

Um einen Eindruck von der Zeitstruktur des Reichens und Zurückführens zu erhalten, wurde die Dauer bis zum Erreichen der Maximalgeschwindigkeit, -beschleunigung und -verzögerung gemessen. Das Zeitbudget vor und nach dem Erreichen der Amplitude gab in Kapitel 3.3.2 Auskunft über die physiologischen Möglichkeiten von Kontroll- oder Korrekturbewegungen.

2.5.4 Geschwindigkeiten des dorsalen Rüsselfingers

Mit Hilfe der Geschwindigkeitsanalyse können Rückschlüsse auf die Raum-Zeit-Koordination des Rüsselfingers gezogen werden. Die momentanen linearen Geschwindigkeiten der dorsalen Rüsselspitze pro Bild wurden von *Peak5* anhand der zwischen zwei Bildern in der Zeit von $t = 0,02$ s zurückgelegten Strecke kalkuliert:

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

2.5.4.1 Geschwindigkeitsprofile des dorsalen Rüsselfingers

Das Geschwindigkeitsprofil, dargestellt in Kapitel 3.4.1, gibt den Verlauf der momentanen linearen Geschwindigkeit als Funktion der Zeit an. Zur Normierung der jeweils 90 Profile beim Reichen und Zurückführen wurden die momentanen Geschwindigkeiten jeder Kurve über Zeitabschnitte von jeweils 5 % der Bewegungszeit gemittelt.

Die Varianz der Geschwindigkeitsprofile wurde mit Hilfe der multiplen linearen Regressionsanalyse getestet, wobei R^2 als Bestimmtheitsmaß die Testgröße für den F-Test bot. Anhand der im folgenden aufgelisteten Parameter wurden die Formen und Eigenschaften der Geschwindigkeitsprofile analysiert, um unter Berücksichtigung der Formen der Bewegungsbahnen Rückschlüsse auf die Art der Bewegungen ziehen zu können.

2.5.4.2 Maximalgeschwindigkeiten

- **Beträge der Maximalgeschwindigkeiten**

Die Beträge der maximalen Geschwindigkeiten beim Reichen und Zurückführen wurden über die jeweils 90 Bewegungen gemittelt und in Kapitel 3.4.2 dargestellt.

- **Erreichen der Maximalgeschwindigkeiten**

Die Position des dorsalen Rüsselfingers beim Erreichen seiner Maximalgeschwindigkeit (v_{\max}) wurde in Relation zur Bewegungsbahn und zum Raum ermittelt. Hierzu dienen folgende Parameter:

- Abstand des dorsalen Rüsselfingers vom Boden (y_{bod}), berechnet mit Hilfe der Formel

$$y_{\text{bod}_{v_{\max}}}(\text{Reichen}) = y_n - y_{v_{\max}} \quad \text{bzw.}$$

$$y_{\text{bod}_{v_{\max}}}(\text{Zurückführen}) = y_1 - y_{v_{\max}},$$

wobei 1 die Start- und n die Zielposition des dorsalen Rüsselfingers angibt,

- prozentualer Anteil der direkten Bewegungsbahn proximal des Erreichens der maximalen Geschwindigkeiten (v_{prox}). Dabei berechnete sich die Länge von dir_{prox} bei der Anzahl (N) der Bilder mit den Bildnummern n nach der Formel

$$\text{dir}_{\text{prox}_{v_{\max}}}(\text{Reichen}) = [(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2]^{1/2} / N \cdot n_{v_{\max}} \quad \text{bzw.}$$

$$\text{dir}_{\text{prox}_{v_{\max}}}(\text{Zurückführen}) = [(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2]^{1/2} / N \cdot (n - n_{v_{\max}}).$$

Die Positionen des Rüsselfingers beim Erreichen der Maximalgeschwindigkeit wurden mit jenen beim Erreichen der Amplitude verglichen, um die Maximalgeschwindigkeit in die räumliche Situation der Bewegung einordnen zu können.

Um einen Anhaltspunkt zu gewinnen, ob die Position des dorsalen Rüsselfingers im Raum oder die zurückzulegende Bewegungsbahn als Organisationsgrundlage für das Erreichen der maximalen Geschwindigkeit dient, wurde der Abstand des Rüsselfingers vom Boden (y_{bod}) einerseits und der proximale Anteil der direkten Bewegungsbahn (dir_{prox}) andererseits zum Zeitpunkt des Geschwindigkeitsmaximums bestimmt. Anhand des Vergleichs der Variationskoeffizienten konnte die Bedeutung der betreffenden Parameter für die Bewegungsplanung abgeschätzt werden. Je kleiner sich der Variationskoeffizient erwies, desto konstanter bleibt der betreffende Parameter und desto wahrscheinlicher sollte sein Beitrag zur Organisation der Bewegung sein.

2.5.4.3 Integrale der Geschwindigkeitsprofile

Um zu ermitteln, wie lange die Maximalgeschwindigkeit beibehalten wird, wie kontinuierlich sich die Geschwindigkeitsübergänge vollziehen und welche Form das Geschwindigkeitsprofil einnimmt, wurden die Flächen unter den Geschwindigkeitsprofilen

von Reichen und Zurückführen berechnet. Dies erfolgte, dargestellt in Kapitel 3.4.3, durch Addition der Teilflächen, die sich aus der Multiplikation der momentanen Geschwindigkeiten (v) mit der Zeit ($t = 0,02$ s) pro Bild (n) ergaben unter Verwendung der Formel

$$\int (1-n) = \sum(1-n) v_n \cdot 0,02 - [(v_n - v_{(n-1)}) \cdot 0,02 / 2].$$

2.5.4.4 Fallgeschwindigkeiten des Rüsselfingers beim Reichen

Beim Reichen steht der Rüsselfinger unter dem positiven Einfluss der Schwerkraft. Er könnte demnach einfach fallen gelassen werden, um auf diese Weise den Aufwand an Muskelkraft für eine koordinierte Abwärtsbewegung zu reduzieren. Gemäß dem Gesetz des freien Falls kann die für den Rüsselfinger zu erwartende Fallgeschwindigkeit nach der Formel

$$v_{\text{Fall}} = [(2 \cdot g \cdot h)]^{1/2}$$

berechnet werden, mit $g = 9,81 \text{ m/s}^{-2}$ und h = Betrag der funktionellen Rüssellänge.

- **Vergleich der Fall- mit der gemessenen Geschwindigkeit**

Durch Subtraktion der Fallgeschwindigkeit (v_{Fall}) von der tatsächlichen Geschwindigkeit (v) konnte in Kapitel 3.4.4 das Zeitfenster einer Fallgeschwindigkeitsüberschreitung innerhalb des Geschwindigkeitsprofils dargestellt werden. Der Zeitgewinn, der sich durch die Überschreitung der Fallgeschwindigkeit ergab, wurde anhand des Vergleichs der tatsächlichen Dauer und der bei Einhaltung der Fallgeschwindigkeit benötigten Zeit (t_{Fall}) berechnet, die nach der Formel

$$t_{\text{Fall}} = \text{funktionelle Rüssellänge} / v_{\text{Fall}}$$

ermittelt wurde.

- **Lokalisierung der Fallgeschwindigkeitsüberschreitung**

In welcher Position bezogen auf die Bewegungsbahn sich der Rüsselfinger beim Überschreiten seiner Fallgeschwindigkeit befand, ließ sich anhand der prozentualen direkten (dir_prox) und tatsächlichen Bewegungsbahnanteile (tats_prox) ermitteln, die bis zum Erreichen der Fallgeschwindigkeit zurückgelegt wurden. Auf diese Weise konnte die Überschreitung der Fallgeschwindigkeit mit dem Erreichen der Amplitude verglichen werden.

2.5.5 Beschleunigungen und Verzögerungen des dorsalen Rüsselfingers

Anhand der Geschwindigkeitsänderungen pro Zeiteinheit können die physiologischen Möglichkeiten der Bewegungskontrolle durch Muskelaktivität für Korrekturbewegungen abgeschätzt werden. Die momentane Beschleunigung des dorsalen Rüsselfingers wurde von *Peak5* über $a = \Delta v / t$ berechnet. Positive Werte charakterisierten eine Beschleunigung, negative eine Verzögerung.

2.5.5.1 Beschleunigungsprofile des Rüsselfingers

Der Verlauf der Beschleunigungen pro Zeiteinheit ließ sich in Kapitel 3.5.1 in Form eines Beschleunigungsprofils darstellen. Um die Beschleunigungsprofile zu normieren, wurden die Beschleunigungen über Zeitabschnitte von jeweils 5 % der Bewegungszeit gemittelt.

2.5.5.2 Maximale Beschleunigungen und Verzögerungen

- **Beträge der maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen**

Die maximale Beschleunigung wurde als der größte positive Wert, die maximale Verzögerung als der größte negative Wert der Geschwindigkeitsveränderung pro Zeiteinheit beim Reichen und Zurückführen bestimmt und über die 90 analysierten Bewegungen gemittelt.

- **Erreichen der maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen**

Um die Geschwindigkeitsveränderungen in Bezug zur Bewegungsbahn zu setzen, wurde in Kapitel 3.5.2 der prozentuale Anteil der direkten Bewegungsbahn proximal des Erreichens der maximalen Beschleunigung (acc_max) und analog der maximalen Verzögerung (dec_max) bestimmt mit Hilfe folgender Formeln:

$$\begin{aligned} \text{dir_prox}_{acc_max}(\text{Reichen}) &= [(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2]^{1/2} / N \cdot n_{acc_max}; & \text{bzw.} \\ \text{dir_prox}_{acc_max}(\text{Zurückführen}) &= [(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2]^{1/2} / N \cdot (n - n_{acc_max}). \end{aligned}$$

2.5.6 Die Apertur der Rüsselhand beim Reichen

Analog zu Primatenhänden hat die Rüsselhand des Elefanten die Möglichkeit, mit ihren Rüsselfingern Objekte zu umgreifen. Der als Apertur bezeichnete Abstand zwischen dorsalem (td) und ventralem (tv) Rüsselfinger (Abb. I-2.7) wurde in jedem Bild mit Hilfe folgender Formel berechnet:

$$\text{Apertur} = [(x_{td} - x_{tv})^2 + (y_{td} - y_{tv})^2 + (z_{td} - z_{tv})^2]^{1/2}.$$

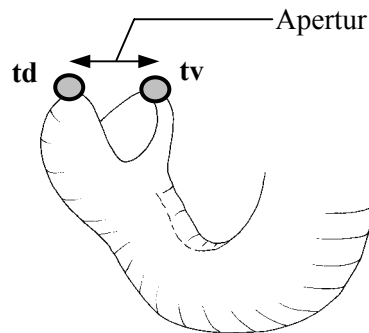


Abb. I-2.7: Schematische Darstellung der Apertur der Rüsselhand. Die Apertur entspricht der Distanz zwischen dorsalem (td) und ventralem (tv) Rüsselfinger.

2.5.6.1 Profil der Apertur

Die Veränderungen der Apertur während des Reichens wurden in Form ihres Profils in Kapitel 3.6.1 dargestellt. Dabei wurden die über Zeitabschnitte von jeweils 5 % gemittelten Aperturen angegeben.

2.5.6.2 Maximale Apertur

- **Betrag der maximalen Apertur**

Der Betrag der maximalen Apertur wurde aus den Mittelwerten der 90 größten Abstände zwischen den beiden Rüsselfingern berechnet.

- **Erreichen der maximalen Apertur**

Um das Erreichen der maximalen Apertur in den Bewegungskontext zu stellen, wurde der prozentuale Anteil der Bewegungszeit (MT), der direkten (dir_prox) und der tatsächlichen Bewegungsbahn (tats_prox) beim Erreichen der maximalen Apertur (ap_max) nach folgenden Formeln berechnet:

$$\text{dir_prox}_{\text{ap_max}} = [(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2]^{1/2} / N \cdot n_{\text{ap_max}}$$

$$\text{tats_prox}_{\text{ap_max}} =$$

$$\sum (1 - \text{ap_max}) [(x_{\text{ap_max}} - x_{(\text{ap_max}-1)})^2 + (y_{\text{ap_max}} - y_{(\text{ap_max}-1)})^2 + (z_{\text{ap_max}} - z_{(\text{ap_max}-1)})^2]^{1/2}.$$

2.5.6.3 Zusammenhang zwischen Apertur und Geschwindigkeit

Um den Zusammenhang zwischen Apertur und Geschwindigkeit zu zeigen, wurde der Verlauf der Apertur als Funktion der Geschwindigkeit dargestellt.

2.5.7 Approximative Berechnung der Kräfte

Für die annäherungsweise Berechnung der auf den Massenschwerpunkt des Rüssels einwirkenden Kräfte wurde der Rüssel grob in ein proximales, mittleres und distales Segment unterteilt (Abb. I-2.8), die nicht als identisch mit den funktionellen Segmenten zu betrachten sind. Unter der Annahme, dass der Rüssel in Höhe seiner vierten Rüsselfalte (t4) frei beweglich am Schädel hängt, wurde in diesem Bereich die Senkrechte gefällt. Der Massenschwerpunkt des Rüssels, der im Idealfall der Senkrechten folgt, wurde im mittleren Segment lokalisiert. Die Kräftedifferenz zwischen dem von vorne auf die Senkrechte drückenden proximalen Segment und dem von hinten gegen die Senkrechte drückenden distalen Segment gibt die Kraft an, welche auf den Massenschwerpunkt einwirkt. Je kleiner diese Kraft ist, desto weniger Muskelkraft wird aufgewendet, um den Massenschwerpunkt aktiv aus seiner energetisch und mechanisch günstigen Gleichgewichtslage zu verlagern.

Für die Berechnung der Massen des proximalen (1) und distalen (2) Segments wurden zunächst dessen Volumina (V) berechnet anhand der Formel

$$V_1 = 1/3 \cdot 2H \cdot \pi \cdot (r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2) \quad \text{bzw.}$$

$$V_2 = 1/3 \cdot 2H \cdot \pi \cdot (r_3^2 + r_3 \cdot r_4 + r_4^2),$$

wobei für H der gemessene Abstand zwischen t4 und t5 im entspannten Zustand des Rüssels am Ende des Reichens genommen wurde und r dem Radius entspricht.

In der Literatur sind Dichten von $\zeta = 1180 \text{ kg/m}^3$ angegeben (WILSON et al., 1991), weshalb sich nach der Formel

$$m = V \cdot \zeta$$

die Massen (m) des proximalen und distalen Segments ergaben. Mit Hilfe der horizontalen Abstände der Massenschwerpunkte des proximalen (1) und distalen (2) Segments von der Senkrechten und der Gewichtskraft (G) konnte das Drehmoment (M) berechnet werden, welches auf den Aufhängepunkt des Rüssels wirkt:

$$M_1 = G_1 \cdot h_1 \quad \text{bzw.}$$

$$M_2 = G_2 \cdot h_2,$$

wobei G_1 und G_2 aus den berechneten Massen m_1 und m_2 der Teilstimente multipliziert mit $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ kalkuliert wurden. Die horizontalen Abstände zur Senkrechten ergaben sich aus den vektorieell verrechneten x- und z-Koordinatendifferenzen zwischen t5 und t4 für das proximale Segment bzw. zwischen td und t4 abzüglich h_1 für das distale Segment.

Die Kräfte (F) ergaben sich aus dem Drehmoment (M) dividiert durch den senkrechten Abstand (hs) des Massenschwerpunktes zum Aufhängepunkt t_4 nach der Formel

$$F_1 = M_1 / hs_1 \quad \text{bzw.}$$

$$F_2 = M_2 / hs_2.$$

Aus den von vorne (F_1) und von hinten (F_2) auf die Senkrechte und damit auf den dort im Idealfall lokalisierten Massenschwerpunkt des mittleren Segments einwirkenden Kräften wurde die Kräftedifferenz gebildet:

$$F = F_1 - F_2.$$

Ist F positiv, übt das proximale Segment Kraft auf die Senkrechte aus, ist F negativ, übt das distale Segment Kraft auf die Senkrechte aus. Nähert sich F dem Wert Null, ist von einem Gleichgewichtszustand des Massenschwerpunktes auszugehen. Die Kräftedifferenzen wurden zu fünf Zeitpunkten des Reichens und Zurückführens bestimmt und über sieben adulte Individuen gemittelt. Dies betraf den Start der Bewegung, das Erreichen der maximalen Amplitude (b_{\max}), das Erreichen der maximalen Geschwindigkeit (v_{\max}), das Erreichen des größten Abstandes zur Senkrechten (s_{\max}) und das Ende der Bewegung jeweils des dorsalen Rüsselfingers.

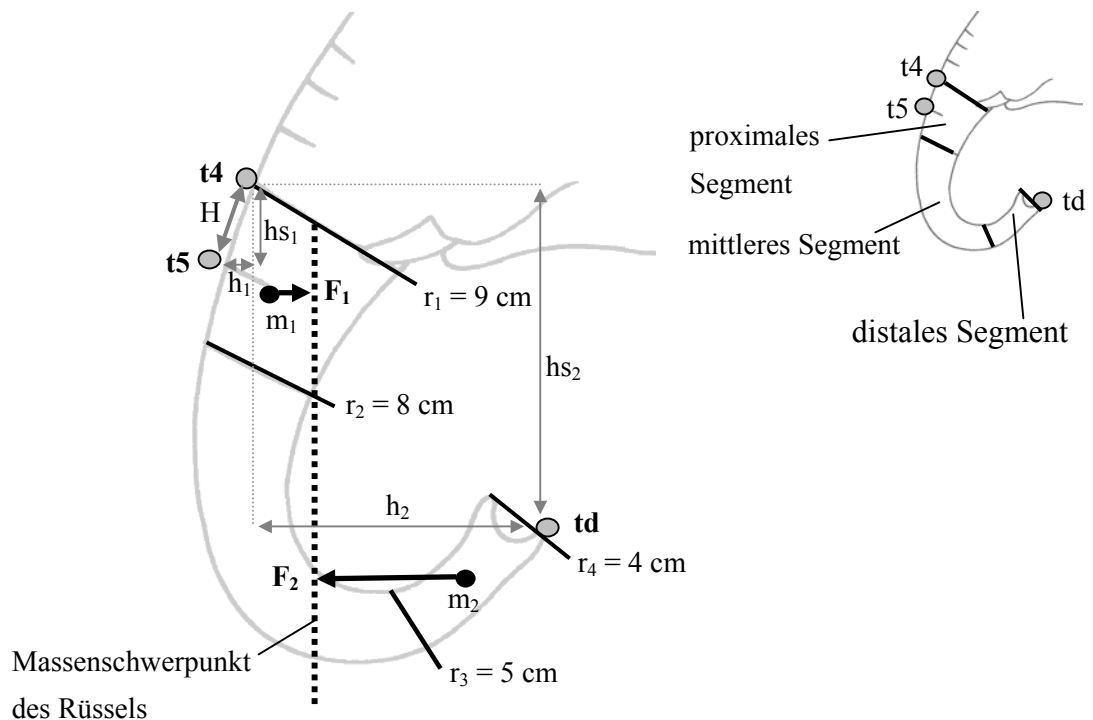


Abb. I-2.8: Schematische Darstellung der Berechnung der Kräfte. Auf den in der Senkrechten ruhenden Massenschwerpunkt des Rüssels wirken die Kräfte (F) des proximalen Segments (1) von vorne und des distalen Segments (2) von hinten. Eingezeichnet sind die im Text erläuterten Abkürzungen für die Berechnungen.

2.6 Statistische Verfahren

Die statistische Absicherung erfolgte mit Hilfe des Programmpakets SPSS 11.0. Nach Prüfung der grafischen Darstellungen konnten die berechneten Parameter als normalverteilt behandelt werden. Die Unterschiede in den Mittelwerten der Parameter zwischen den Bewegungskategorien wurden mit Hilfe des t-Tests statistisch abgesichert.

Die Anzahl der nach oben bzw. unten gerichteten Kopfbewegungen und der nach rechts bzw. links gerichteten Abweichungen der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn wurden mit dem Binomialtest auf signifikante Unterschiede geprüft.

Mit der ANOVA einseitigen Faktorenanalyse wurde der Einfluss des Faktors Altersgruppe auf die Parameter getestet. Unterschieden sich die Parameter juveniler und adulter Tiere signifikant voneinander, wurden sie getrennt voneinander analysiert. In diesem Fall bezogen sich die Korrelationen der Bewegungsparameter mit der funktionellen Rüssellänge nur auf die adulten Individuen ($N = 7$), da die Juvenilen mit $N = 2$ eine zu geringe Anzahl boten.

Die Korrelationen der Parameter mit der funktionellen Rüssellänge erfolgten mit Hilfe der Regressionsanalyse, wobei das Bestimmtheitsmaß R^2 als der Anteil der Gesamtvariation der abhängigen Variable die Prüfgröße für den F-Test lieferte.

Die multiple lineare Regressionsanalyse wurde angewandt, um die Übereinstimmung der gemessenen Profile von Bewegungsbahnen und Geschwindigkeiten pro Individuum jeweils untereinander zu vergleichen. Dabei diente das Bestimmtheitsmaß R^2 als Prüfgröße für den F-Test. Als Prüfgröße für den Zusammenhang zwischen Objektabstand und Bewegungsparameter wurde für jedes Individuum der Pearson Korrelationskoeffizient r verwendet. Das Signifikanzniveau wurde bei allen Tests auf $p < 0,05$ festgelegt.