

3 Ergebnisse

Der Ergebnisteil gliedert sich in sechs Kapitel. In Kapitel 3.1 wird auf die Bewegungen des Rüssels während eines Fresszyklus eingegangen. Besondere Beachtung finden dabei die Unterschiede zwischen Reichen und Zurückführen. In den darauf folgenden Kapiteln konzentrieren sich die Analysen auf den dorsalen Rüsselfinger als Effektor der Bewegungen. Kapitel 3.2 ist der Analyse der Bewegungsbahnen des Rüsselfingers beim Objektkontakt, Reichen und Zurückführen gewidmet. In Kapitel 3.3 wird die für die Bewegungen benötigte Zeit untersucht. Kapitel 3.4 enthält die Analysen der Geschwindigkeiten und Kapitel 3.5 die der Beschleunigungen und Verzögerungen des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen und Zurückführen. Die für jeden Parameter aufgeführten Einflüsse der funktionellen Rüssellänge werden jeweils in einem Unterkapitel zusammengefasst. Die Veränderungen der Apertur beim Reichen werden in Kapitel 3.6 beschrieben. Schließlich wird auf die annäherungsweise Berechnung der wirkenden Kräfte in Kapitel 3.7 eingegangen.

3.1 Bewegungen des Rüssels

Die qualitative Beschreibung der Rüsselbewegungen in den Bewegungskategorien Objektkontakt, Zurückführen, Maul und Reichen während eines Fresszyklus führte jeweils deren mechanische Unterschiede vor Augen. Im proximalen Bereich des Rüssels, der sich in seinen Bewegungen vom distalen Bereich unterschied, dehnten und kontrahierten sich die „äußeren Segmente“ teleskopartig. Vertikal gerichtete Kopfbewegungen erwiesen sich als vergleichsweise gering.

3.1.1 Qualitative Beschreibung der Rüsselbewegungen während eines Fresszyklus'

Während eines Fresszyklus folgten Reichen, Objektkontakt, Zurückführen und Maul aufeinander. Befand sich die Rüsselspitze im Maul, bildete der nach ventral gekrümmte Rüssel etwa zur Hälfte seiner Länge eine Biegestelle im Bereich der größten Krümmung. Beim Reichen (Abb. I-3.1 oben), der Bewegung des Rüsselfingers vom Maul zum Objekt, verschob sich diese Biegestelle (siehe Pfeil) entlang des Rüssels nach distal. An einer determinierten Stelle des Rüssels formierte sie ein funktionelles Gelenk zwischen einem proximalen und einem distalen funktionellen Segment. Das distale funktionelle Segment schwang um das funktionelle Gelenk nach vorne. Dabei drehte sich die Rüsselhand um 180°, so dass sich die Rüsselfinger zielorientiert dem Objekt nähern konnten. Gleichzeitig wurde der gesamte Rüssel durch Vergrößerung der Abstände zwischen den proximalen Rüsselfalten

verlängert. Auch der Kopf bewegte sich geringfügig abwärts. Beim Objektkontakt umgriffen beide Rüsselfinger das Objekt. Es fanden zahlreiche kleine Bewegungen statt. Gegen Ende des Objektkontaktes schob sich der dorsale Rüsselfinger unter das Objekt. Das Zurückführen begann mit dem Anheben der Rüsselhand mit dem Objekt vom Boden (Abb. I-3.1 unten). Gleichzeitig dreht sich die Rüsselhand um 180° um die Transversalachse nach ventral. Zum Maul orientiert wurde die Rüsselhand infolge der senkrechten Verschiebung der im distalen Bereich des Rüssels entstehenden Biegestelle nach proximal parallel zum Rüssel nach oben gestemmt. Anders als beim Reichen wurde, statt ein distales funktionelles Segment um die Biegestelle nach oben zu drehen, ein „sukzessiver Biegemechanismus“ angewandt, der auf einer Abfolge sich nach hinten und oben biegender kurzer Segmente beruhte, deren jeweils nur kurzer Lastarm den länger werdenden distalen Rüsselabschnitt gegen die Schwerkraft stemmen und dabei balancieren konnte. Währenddessen verringerten die Rüsselfalten des proximalen Bereichs ihre Abstände. Auch der Kopf folgte der Bewegung in geringerem Umfang. Am Maul angelangt wurde das Objekt mit der Rüsselhand weit nach hinten auf die Zunge geschoben.



Abb. I-3.1: Rüsselbewegungen Reichen und Zurückführen. Während eines Fresszyklus wird der Rüssel beim Reichen (oben) zum Objekt und beim Zurückführen (unten) zum Maul geführt. Die Pfeile markieren die Biegestelle, die weißen Linien in Bild 3 oben das sich bildende proximale (gestrichelt) und distale (durchgezogen) funktionelle Segment.

3.1.2 Bewegungen des proximalen Rüsselabschnitts

Die Bewegungen des proximalen Rüsselabschnitts umfassten Kontraktionen und Dehnungen der von den Rüsselfalten begrenzten „äußeren Segmente“ sowie Verschiebungen der Rüsselfalten in der Medianebene.

3.1.2.1 Beweglichkeit der Rüsselfalten

Die Änderungen der Abstände aufeinanderfolgender Rüsselfalten zeigten, dass sich die „äußeren Segmente“ des proximalen Rüsselabschnitts je nach Bewegungskategorie unterschiedlich stark dehnten oder kontrahierten. Sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen unterschieden sich die äußeren Segmente im Ausmaß ihrer Längenveränderung.

Beim Reichen nahmen die Spannweiten der Abstände zweier aufeinanderfolgender Rüsselfalten von proximal nach distal ab (Abb. I-3.2). Die Länge des äußeren Segments t4-t5 verringerte sich mit $5,22 \pm 1,20$ mm geringfügiger als die des t1-t2 mit $8,31 \pm 2,45$ mm ($T_{df=8} = 2,866$, $p = 0,021$) und t2-t3 mit $6,92 \pm 1,88$ mm ($T_{df=8} = 2,854$, $p = 0,021$). Beim Zurückführen hingegen verkürzten sich die Segmente erst ab t2-t3 mit $12,90 \pm 4,55$ mm nach distal, so dass sich nur zwischen t3-t4 mit $11,58 \pm 3,37$ mm und t4-t5 mit $9,49 \pm 2,10$ mm ein signifikanter Unterschied ergab ($T_{df=8} = 2,615$, $p = 0,031$).

Die Abstandsveränderungen zwischen zwei sukzessiven Rüsselfalten waren beim Zurückführen jeweils signifikant größer als beim Reichen ($T_{df=8} = 4,42$, $p = 0,002$ für t1-t2; $T_{df=8} = 5,284$, $p = 0,001$ für t2-t3; $T_{df=8} = 4,491$, $p = 0,002$ für t3-t4; $T_{df=8} = 5,636$, $p = 0,000$ für t4-t5). Beim Zurückführen verkürzten sich die äußeren Segmente stärker im Vergleich zum Objektkontakt ($T_{df=8} = 2,761$, $p = 0,025$ für t1-t2; $T_{df=8} = 6,641$, $p = 0,000$ für t2-t3; $T_{df=8} = 4,29$, $p = 0,003$ für t3-t4; $T_{df=8} = 3,74$, $p = 0,006$ für t4-t5). Die Spannweiten der Rüsselfaltenabstände zwischen Reichen und Objektkontakt unterschieden sich kaum voneinander.

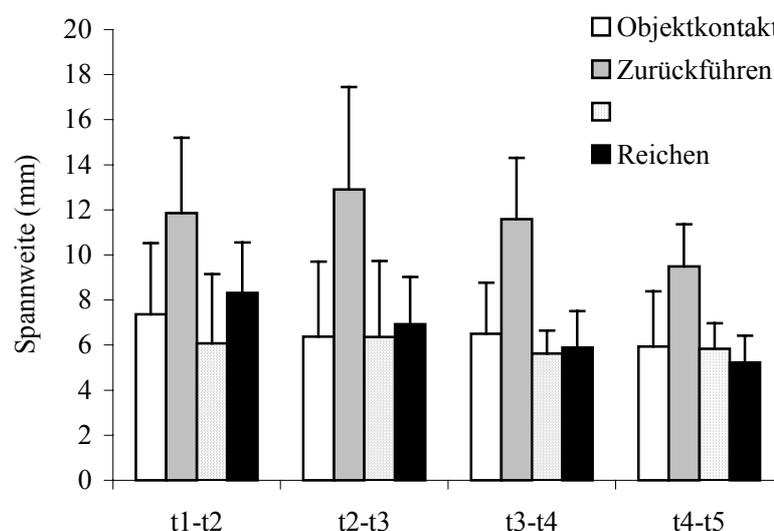


Abb. I-3.2: Längenveränderungen der „äußeren Segmente“. $M \pm SD$ ($N = 90$) in mm der Spannweiten der Abstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Rüsselfalten t1 bis t5 in den einzelnen Bewegungskategorien.

Die Differenzen der Abstände zweier aufeinander folgender Rüsselfalten zwischen Beginn und Ende der Bewegung zeigten eine teleskopartige Dehnung der äußeren Segmente beim Reichen und eine Kontraktion beim Zurückführen (Abb. I-3.3). Von proximal nach distal verringerte sich das Ausmaß der Dehnung um das 6-fache und das Ausmaß der Kontraktion um die Hälfte.

Beim Reichen erwiesen sich die Unterschiede zwischen t2-t3 mit $4,03 \pm 5,10$ mm als signifikant größer als bei t3-t4 mit $2,39 \pm 4,09$ mm ($T_{df=16} = 2,748$, $p = 0,025$). Die Kontraktion der äußeren Segmente beim Zurückführen übertraf deren Dehnung beim Reichen signifikant in jedem der Segmente ($T_{df=16} = 2,32$, $p = 0,034$ für t1-t2; $T_{df=16} = 4,123$, $p = 0,001$ für t2-t3; $T_{df=16} = 3,229$, $p = 0,005$ für t3-t4; $T_{df=16} = 2,614$, $p = 0,019$ für t4-t5), weshalb der Rüssel immer länger werden müsste. Diese Diskrepanz wurde im Maul und am Objekt korrigiert. Der Vergleich mit der gesamten Längenveränderung zeigte aber, dass sich die äußeren Segmente beim Zurückführen zuerst dehnten, bevor sie sich kontrahierten und sich beim Reichen zuerst kontrahierten, bevor sie sich dehnten.

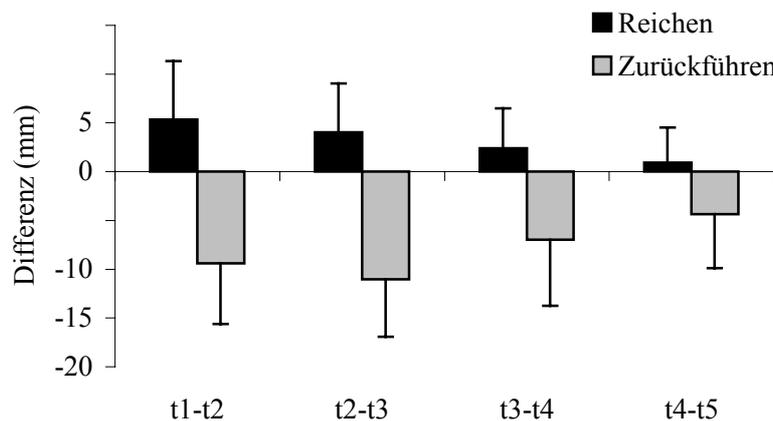


Abb. I-3.3: Dehnung und Kontraktion der „äußeren Segmente“. $M \pm SD$ ($N = 90$) in mm der Differenzen der Abstände von jeweils zwei aufeinander folgenden Rüsselfalten t1 bis t5 zwischen Beginn und Ende des Reichens und Zurückführens. Positive Werte entsprechen einer Dehnung, negative einer Kontraktion.

3.1.2.2 Vertikal und horizontal gerichtete Bewegungen der Rüsselfalten

Die Bewegungen der Rüsselfalten beim Reichen und Zurückführen bestanden aus einer Kombination von vertikalen Verschiebungen im Bereich zwischen $2,85 \pm 4,65$ mm und $17,50 \pm 6,73$ mm und horizontalen Positionsveränderungen zwischen $7,65 \pm 11,71$ mm und $24,65 \pm 11,30$ mm (Abb. I-3.4).

Beim Reichen erwiesen sich die horizontalen Bewegungen als signifikant größer im Vergleich zu den vertikalen Bewegungen ($T_{df=16} = 7,63$, $p = 0,000$ bei t2-t3; $T_{df=16} = 8,094$, $p = 0,000$ bei t3-t4; $T_{df=16} = 3,184$, $p = 0,013$ bei t4-t5). T1-t2 zeigte umgekehrt größere vertikale als horizontale Verschiebungen ($T_{df=16} = 8,236$, $p = 0,000$). Die Dehnung der äußeren Segmente in vertikaler Richtung nahm von proximal nach distal um das 3,6-fache ab, wobei sich die Unterschiede meist als signifikant herausstellten ($T_{df=16} = 3,52$, $p = 0,008$

bei t2-t3 – t3-t4; $T_{df=16} = 4,68$, $p = 0,002$ bei t3-t4 – t4-t5). T1-t2 schien beim Reichen mit der höchsten vertikalen Dehnung von $10,32 \pm 5,83$ mm eine Sonderrolle zuzukommen. Die horizontalen Dehnungen nahmen von proximal (t1-t2 mit $9,02 \pm 7,00$ mm) nach distal (t3-t4 mit $17,30 \pm 9,62$ mm) zu ($T_{df=16} = 4,538$, $p = 0,002$ bei t1-t2 – t2t3; $T_{df=16} = 2,5$, $p = 0,037$ bei t2-t3 – t3-t4; $T_{df=16} = 3,344$, $p = 0,01$ bei t3-t4 – t4-t5). Folglich wurde der proximale Rüsselbereich von t1 bis t4 um die 1. Rüsselfalte nach unten und hinten gedreht. Die 5. Rüsselfalte bildete bereits den Übergang zum proximalen funktionellen Segment des Rüssels entsprechend Abb. I-3.1.

Beim Zurückführen kontrahierten sich die ersten beiden „äußeren Segmente“ signifikant weiter entlang der Vertikalen nach oben, die letzten beiden hingegen weiter entlang der Horizontalen nach vorne ($T_{df=16} = 10,887$, $p = 0,000$ bei t1-t2; $T_{df=16} = 11,608$, $p = 0,000$ bei t2-t3; $T_{df=16} = 10,576$, $p = 0,000$ bei t3-t4; $T_{df=16} = 7,03$, $p = 0,000$ bei t4-t5). Die vertikal gerichteten Längenveränderungen nahmen vom t2-t3 mit $17,50 \pm 6,73$ mm zum t4-t5 mit $8,36 \pm 6,72$ mm ab, wobei sich nur die Unterschiede zwischen t3-t4 und t4-t5 als signifikant herausstellten ($T_{df=16} = 4,411$, $p = 0,002$). Die horizontal gerichteten Längenveränderungen nahmen vom t1-t2 mit $8,08 \pm 6,54$ mm bis zum t3-t4 mit $24,65 \pm 11,30$ mm zu, wobei sich signifikante Unterschiede zwischen aufeinanderfolgenden Segmenten ergaben ($T_{df=16} = 5,798$, $p = 0,000$ bei t1-t2 – t2-t3; $T_{df=16} = 3,966$, $p = 0,004$ bei t2-t3 – t3-t4; $T_{df=16} = 3,895$, $p = 0,005$ bei t3-t4 – t4-t5). Entgegengesetzt zum Reichen drehte sich der proximale Teil des Rüssels beim Zurückführen um die 1. Rüsselfalte nach oben und vorne.

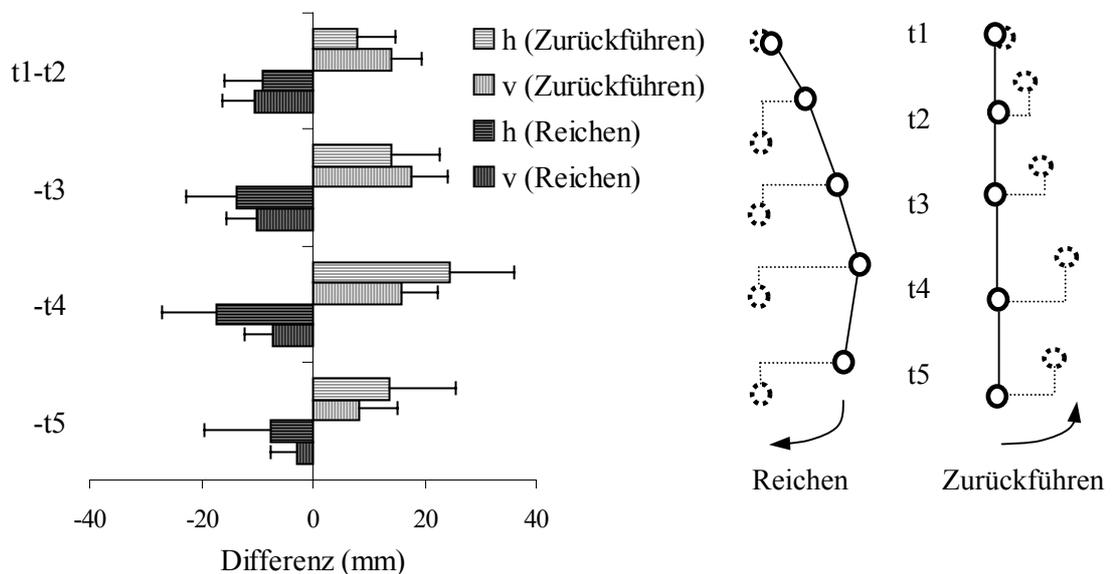


Abb. I-3.4: Horizontal und vertikal gerichtete Längenveränderungen der „äußeren“ Segmente. $M \pm SD$ ($N = 90$) in mm der Differenzen der Abstände von jeweils zwei aufeinander folgenden Rüsselfalten t1 bis t5 zwischen Beginn und Ende des Reichens und Zurückführens, unterteilt in horizontale (h) und vertikale (v) Komponenten. Positive Werte entsprechen einer Verschiebung nach oben in der Vertikalen bzw. nach vorne in der Horizontalen; negative Werte entsprechen einer Verschiebung nach unten in der Vertikalen bzw. nach hinten in der Horizontalen. Die schematische Darstellung rechts zeigt die Verschiebungen der Rüsselfalten beim Reichen und Zurückführen. Durchgezogene Kugeln symbolisieren die Startposition, gestrichelte Kugeln die Zielposition der Markierungen.

3.1.3 Kopfbewegungen

Ausmaß und Zeitpunkt vertikaler Kopfbewegungen ließen auf deren nur marginalen Einfluss auf die Anfangsbeschleunigung der Rüsselbewegungen schließen.

3.1.3.1 Ausmaß der Kopfbewegungen

Gemessen an den vertikalen Verschiebungen eines Stoßzahnes zwischen Beginn und Ende der Bewegung (Abb. I-3.5) senkte sich der Kopf mit $78,20 \pm 34,07$ mm beim Reichen tiefer als er sich beim Zurückführen mit $59,87 \pm 29,33$ mm hob ($T_{df=8} = 4,457$, $p = 0,002$). Die Differenzen konnten durch das Senken des Rüssels zu Beginn des Zurückführens kompensiert werden, was sich in den Differenzen zwischen der Start- und Endposition in der Vertikalen nicht bemerkbar machte. Während des Objektkontaktes senkte und hob sich der Kopf jeweils nur $19,13 \pm 0,85$ mm und damit in geringerem Ausmaß als beim Zurückführen ($T_{df=8} = 3,325$, $p = 0,01$) und Reichen ($T_{df=8} = 4,800$, $p = 0,001$).

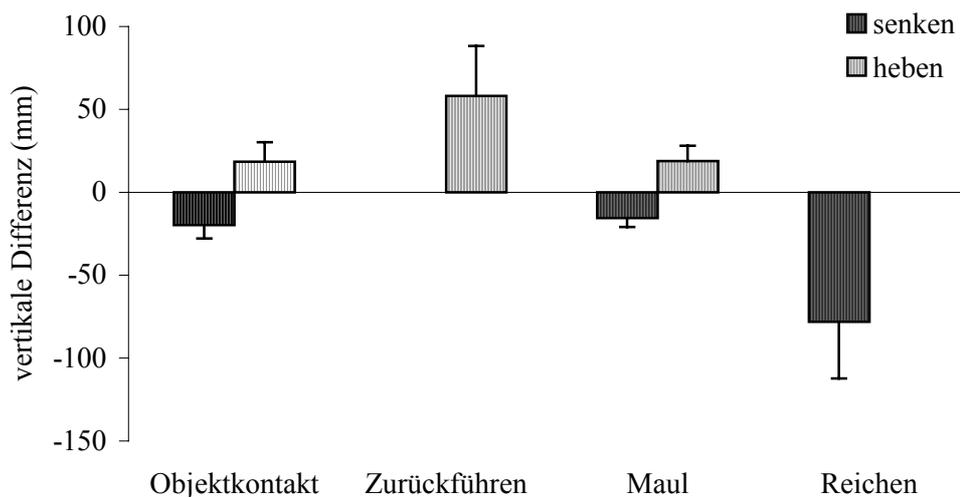


Abb. I-3.5: Vertikale Kopfbewegungen. $M \pm SD$ ($N = 90$) in mm der vertikal nach unten (senken) und oben (heben) orientierten Differenzen der Positionen des Stoßzahns bei den verschiedenen Bewegungskategorien.

3.1.3.2 Zeitpunkt der Kopfbewegungen

Die Bewegungsrichtungen des Kopfes unmittelbar vor Beginn des Reichens und Zurückführens erwiesen sich als uneinheitlich. Jedes Individuum hob den Kopf $3,33 \pm 1,73$ mal im Mittel $0,13 \pm 0,06$ s ($N = 10$) vor dem Beginn des Zurückführens. Dem standen $6,56 \pm 1,8$ Kopfbewegungen nach unten gegenüber, die im Mittel $0,13 \pm 0,03$ s ($N = 10$) vor dem Zurückführen einsetzten. Die Unterschiede in den Häufigkeiten von Kopfheben und -senken waren gering (Binomialtest, ns). Eine Initialisierung der Rüsselbewegungen durch den Einsatz des Kopfes konnte daher nicht eindeutig nachgewiesen werden.

3.2 Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers

Die folgenden Analysen konzentrieren sich auf den dorsalen Rüsselfinger. Anhand der sich zwischen Reichen und Zurückführen unterscheidenden Formen der Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers ließen sich unter Berücksichtigung des Einflusses der Rüssellänge auf die bei der Analyse verwendeten Bewegungsparameter Rückschlüsse auf dessen unterschiedliche Raumnutzung ziehen.

3.2.1 Die funktionelle Rüssellänge als physikalische Einflussgröße

Die funktionelle Rüssellänge entsprach dem Abstand zwischen Start- und Zielposition des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen bzw. Zurückführen und rangierte von $942,77 \pm 68,32$ mm bis $1489,85 \pm 38,87$ mm. Abb. I-3.6 zeigt, dass sich die funktionellen Rüssellängen zwischen Reichen und Zurückführen kaum voneinander unterschieden (t-Test, ns). Beide Kurven nahmen, einer quadratischen Anpassungskurve folgend, mit dem Alter der Tiere zu ($R^2 = 0,806$, $F_{df=6} = 12,43$, $p = 0,007$ beim Reichen; $R_2 = 0,908$, $F_{df=6} = 29,48$, $p = 0,001$ beim Zurückführen). Die funktionelle Rüssellänge wurde als allometrischer Faktor in den folgenden Berechnungen berücksichtigt. Da das Alter in keinem linearen Verhältnis zur Rüssellänge stand, wurde es nicht für die Korrelation mit den Bewegungsparametern verwendet.

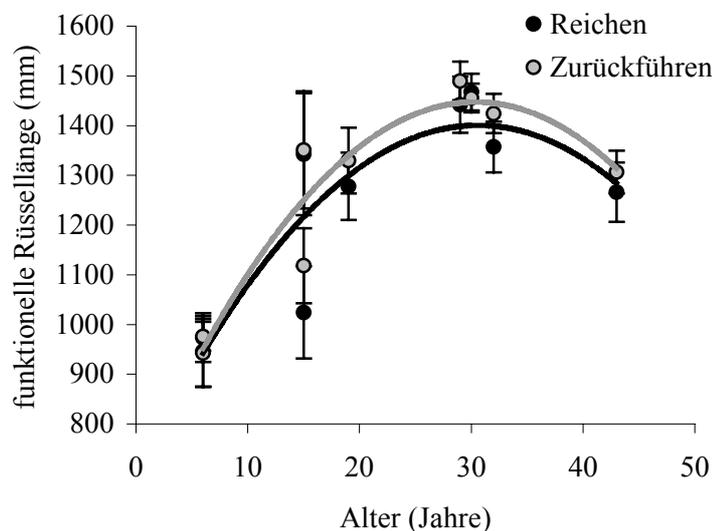
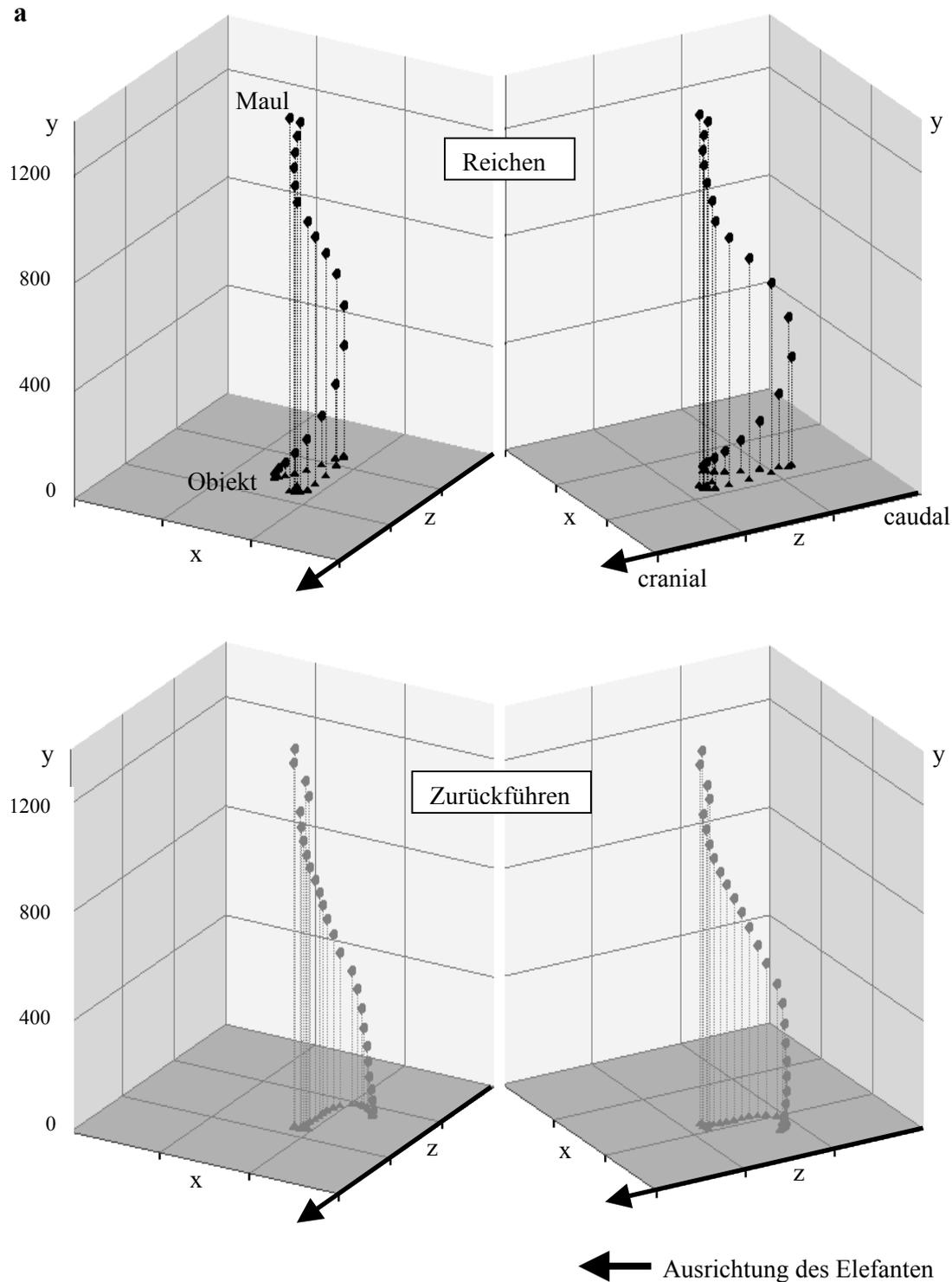


Abb. I-3.6: Zusammenhang zwischen funktioneller Rüssellänge und Alter. $M \pm SD$ ($N = 10$) in mm der funktionellen Rüssellänge als Funktion des Alters in Jahren. Angegeben sind die Regressionskurven beim Reichen (schwarz, $R^2 = 0,806$, $p = 0,007$) und Zurückführen (grau, $R^2 = 0,908$, $p = 0,001$).

3.2.2 Trajektorien des dorsalen Rüsselfingers

Der dorsale Rüsselfinger beschrieb gebogene Trajektorien in jeder der analysierten Bewegungskategorien (Abb. I-3.7a-d). Beim Reichen und Zurückführen trat die stärkste, vorwiegend nach hinten gerichtete Krümmung im distalen Bereich der Bewegung auf. In Anpassung an die unterschiedlichen Zielpositionen beim Reichen bzw. Startpositionen beim Zurückführen durchquerte der Rüsselfinger mehrere Ebenen. Während des Objektkontaktes ebenso wie im Maul blieb der Rüsselfinger vergleichsweise konzentriert auf einer Stelle.



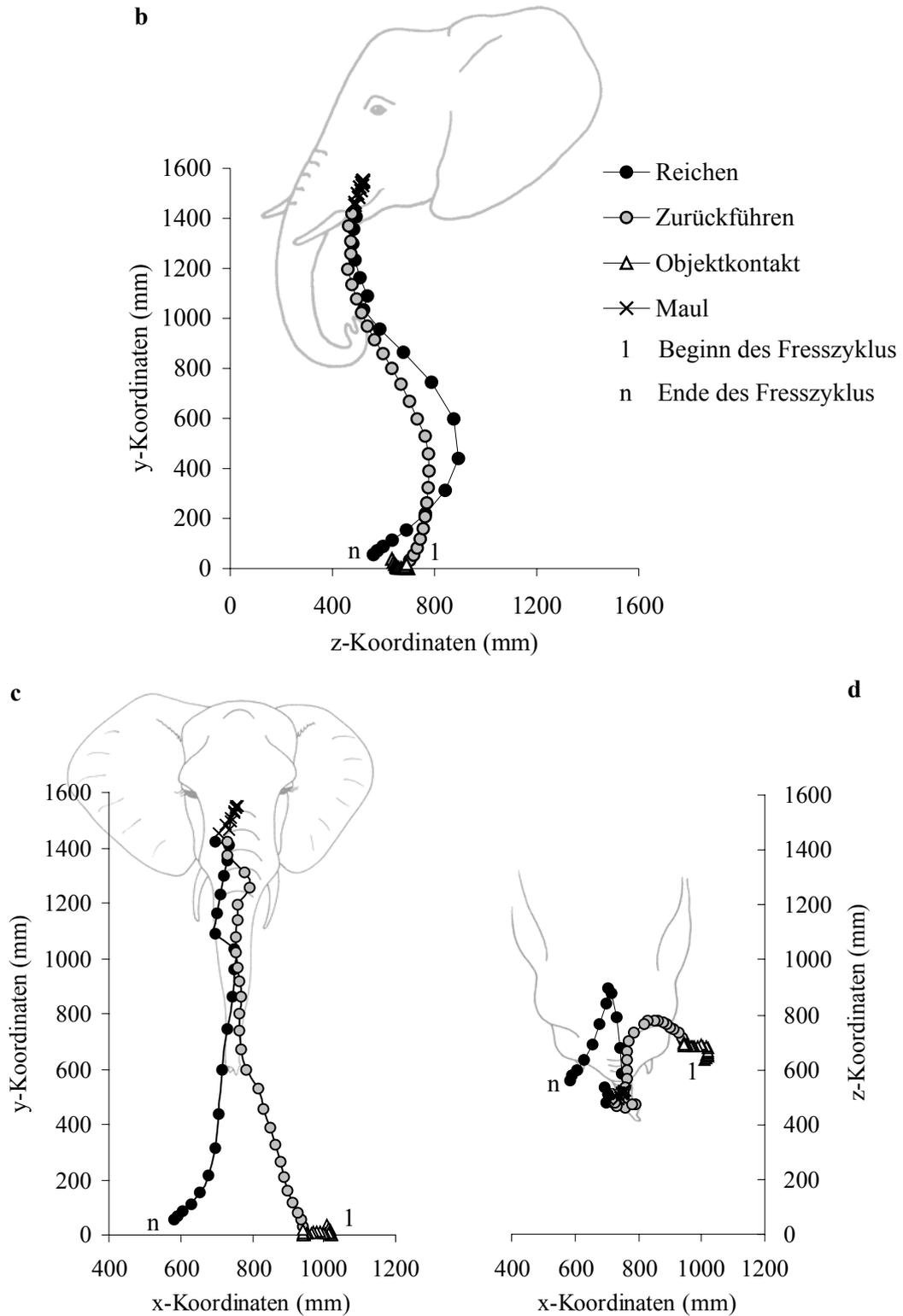


Abb. 1-3.7: Darstellung der Raumnutzung des dorsalen Rüsselfingers. (a) Exemplarische 3-D-Darstellung des Reichens und Zurückführens aus verschiedenen Perspektiven. Die Achsenabschnitte entsprechen jeweils 400 mm. Jeder Marker repräsentiert die Position des Rüsselfingers von „Safari“ alle 20 ms. (b, c, d) Projektionen des dorsalen Rüsselfingers während eines Fresszyklus auf die (b) Median-, (c) Frontal- und (d) Horizontalebene. Die Symbole entsprechen der Position des Rüsselfingers von „Safari“ alle 20 ms, beginnend beim Objektkontakt (1) eines links liegenden Apfels, gefolgt von Zurückführen, Maul und Reichen zu einem rechts liegenden Objekt (n).

3.2.3 Eigenschaften der Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers

Zur weiteren Analyse der vom dorsalen Rüsselfinger beschriebenen Wege wurden deren Längen und Krümmungen berechnet. Da hierfür die komplexe räumliche Orientierung keine Rolle spielt, wurde für die Darstellung der folgenden Ergebnisse der Begriff der Bewegungsbahn verwendet.

3.2.3.1 Länge der Bewegungsbahnen

Die Längen der Bewegungsbahnen unterschieden sich nicht nur zwischen den Transportkomponenten Reichen und Zurückführen und der Manipulationskomponente Objektkontakt, sondern auch zwischen den Transportkomponenten Reichen und Zurückführen.

Wie aus Tabelle I-3.1 hervorgeht, erwiesen sich die Bewegungsbahnen des Rüsselfingers beim Reichen als signifikant länger im Vergleich zum Zurückführen ($T_{df=8} = 6,975$, $p = 0,000$). Während des Objektkontakts legte der dorsale Rüsselfinger einen um das 5-fache kürzeren Weg als beim Reichen ($T_{df=8} = 19,170$, $p = 0,000$) und um das 4,6-fache kürzeren Weg zurück als beim Zurückführen ($T_{df=8} = 17,654$, $p = 0,000$).

Anhand der höheren Variationskoeffizienten zeigte sich, dass die Bewegungsbahnlängen beim Objektkontakt beinahe sechsmal so hohen Schwankungen unterlagen verglichen mit Reichen ($T_{df=8} = 8,097$, $p = 0,000$) und Zurückführen ($T_{df=8} = 8,464$, $p = 0,000$). Beim Reichen variierten die Längen der Bewegungsbahnen 1,3-fach stärker als beim Zurückführen ($T_{df=8} = 2,932$, $p = 0,019$).

Während die in vertikaler Richtung zurückgelegten Bewegungsbahnen sich in ihrer Länge zwischen Reichen und Zurückführen aufgrund der gleich bleibenden Kopfstellung kaum unterschieden (t-Test, ns), legte der dorsale Rüsselfinger beim Reichen in der Horizontalen um etwa 28 cm längere Bewegungsbahnen zurück als beim Zurückführen ($T_{df=8} = 6,672$, $p = 0,000$).

Der beim Reichen im Vergleich zum Zurückführen signifikant höhere Index h/v ($T_{df=8} = 5,579$, $p = 0,001$) bestätigte, dass die Unterschiede der Bewegungsbahnlängen zwischen Reichen und Zurückführen auf dem horizontalen Anteil basierten.

Beim Objektkontakt erwiesen sich die in der Horizontalen zurückgelegten Wege zwar als signifikant kürzer gegenüber dem Reichen ($T_{df=8} = 13,115$, $p = 0,000$) und Zurückführen ($T_{df=8} = 6,795$, $p = 0,000$), sie bestritten aber angesichts des signifikant höheren Index h/v im Vergleich zum Reichen ($T_{df=8} = 6,211$, $p = 0,000$) und Zurückführen ($T_{df=8} = 7,241$, $p = 0,000$) den überwiegenden Anteil der Bewegung.

Die Variationskoeffizienten zeigen, dass die Länge der horizontal und vertikal gerichteten Wege beim Objektkontakt signifikant stärker variierten als beim Reichen ($T_{df=8} = 7,607$, $p = 0,000$ für horizontal; $T_{df=8} = 10,151$, $p = 0,000$ für vertikal) und Zurückführen ($T_{df=8} = 6,908$,

$p = 0,000$ für horizontal; $T_{df=8} = 10,151$, $p = 0,000$ für vertikal). Die Transportkomponenten Reichen und Zurückführen waren folglich in der Länge ihrer Bewegungsbahnen determinierter als die Manipulationskomponente Objektkontakt.

Tabelle I-3.1: Länge der Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers. $M \pm SD$ ($N = 90$) der statistischen Kennwerte (stat. Kenn.) Messwert (M) in cm und Variationskoeffizient (V) von gesamter bzw. horizontal und vertikal gerichteter Bewegungsbahnlänge des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen, Zurückführen und Objektkontakt, sowie der daraus folgende Index horizontal / vertikal (h/v)

stat. Kenn.	Parameter	Bewegungskategorien		
		Reichen	Zurückführen	Objektkontakt
M	gesamt (cm)	156,83 \pm 23,92***	140,05 \pm 22,76***	29,83 \pm 8,65***
	horizontal (cm)	78,22 \pm 12,63***	50,23 \pm 11,73***	26,45 \pm 9,77***
	vertikal (cm)	122,91 \pm 1,33	123,00 \pm 19,69	9,45 \pm 1,72***
	h/v	0,64 \pm 0,10***	0,41 \pm 0,06***	2,91 \pm 1,05***
V	gesamt	0,08 \pm 0,04*	0,06 \pm 0,03*	0,45 \pm 0,14***
	horizontal	0,17 \pm 0,06	0,22 \pm 0,07	0,48 \pm 0,14
	vertikal	0,04 \pm 0,02	0,03 \pm 0,02	0,42 \pm 0,11
	h/v	0,16 \pm 0,05	0,21 \pm 0,07	0,33 \pm 0,08

*: $p < 0,05$; ***: $p < 0,001$

Die Längen der Bewegungsbahnen unterschieden sich sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen signifikant zwischen den Altersgruppen (ANOVA, $F_{df=1} = 48,95$, $p = 0,000$ beim Reichen; $F_{df=1} = 16,896$, $p = 0,005$ beim Zurückführen), wobei die juvenilen Tiere mit $117,37 \pm 5,63$ cm ($N = 20$) kürzere Bewegungsbahnen zurücklegten als die adulten mit $168,11 \pm 9,49$ cm ($N = 70$). Da sich die Unterschiede zwischen den Altersgruppen als signifikant erwiesen, wurde die Korrelation der funktionellen Rüssellänge als Strecke zwischen Start und Ziel der Bewegung mit der Länge der Bewegungsbahn auf die adulten Tiere beschränkt.

Einflüsse der funktionellen Rüssellänge

Die Bewegungsbahnlängen der Transportkomponenten eines Fresszyklus, Reichen und Zurückführen, wurden auf verschiedene Weise von der funktionellen Rüssellänge beeinflusst. Die Manipulationskomponente Objektkontakt hingegen blieb unbeeinflusst.

Die Wege verlängerten sich mit zunehmender funktioneller Rüssellänge signifikant um rund 26 cm beim Reichen ($R^2 = 0,8294$; $F_{df=5} = 19,38$, $p = 0,007$) und 38 cm beim Zurückführen ($R^2 = 0,9857$, $F_{df=5} = 72,01$, $p = 0,000$). Die zurückgelegten Wege beim Objektkontakt erwiesen sich hingegen als unabhängig von den Rüssellängen (Regressionsanalyse, ns). Folglich legte die Rüsselhand von Elefanten mit kurzen Rüsseln eine verhältnismäßig längere Strecke zurück als jene von Individuen mit langen Rüsseln.

Differenziert in die horizontal und vertikal gerichteten Anteile der Bewegungsbahnen blieben die Längen der horizontal gerichteten Bewegungsbahnen auch mit zunehmender funktioneller Rüssellänge beim Reichen und Objektkontakt konstant (Regressionsanalyse,

ns). Tiere mit langen Rüsseln hatten daher eine relativ kürzere horizontale Bewegungsbahn im Vergleich zu Individuen mit kurzen Rüsseln. Beim Zurückführen verlängerten sich die horizontal gerichteten Bewegungsbahnen mit zunehmender Rüssellänge nur leicht (Regressionsanalyse, ns). Die vertikal gerichtete Komponente der Bewegungsbahn verlängerte sich erwartungsgemäß signifikant sowohl beim Reichen um 40 cm als auch beim Zurückführen um 37 cm mit zunehmender funktioneller Rüssellänge ($R^2 = 0,9839$, $F_{df=6} = 164,01$, $p = 0,000$ beim Reichen; $R^2 = 0,9934$, $F_{df=6} = 275,54$, $p = 0,000$ beim Zurückführen). Beim Objektkontakt ergaben sich keine analogen Korrelationen (Regressionsanalyse, ns). Das Längenverhältnis zwischen horizontaler und vertikaler Bewegungsbahn h/v (Abb. I-3.8) nahm beim Reichen mit zunehmender Rüssellänge signifikant ab ($R^2 = 0,8190$, $F_{df=5} = 22,62$, $p = 0,005$), während es beim Zurückführen konstant blieb (Regressionsanalyse, ns). Die Längen der Bewegungsbahnen verhielten sich beim Zurückführen entsprechend der Allometrie des Rüssels, während sie beim Reichen davon unbeeinflusst blieben. Beim Objektkontakt nahm h/v mit zunehmender funktioneller Rüssellänge signifikant zu ($R^2 = 0,701$, $F_{df=8} = 11,72$, $p = 0,011$).

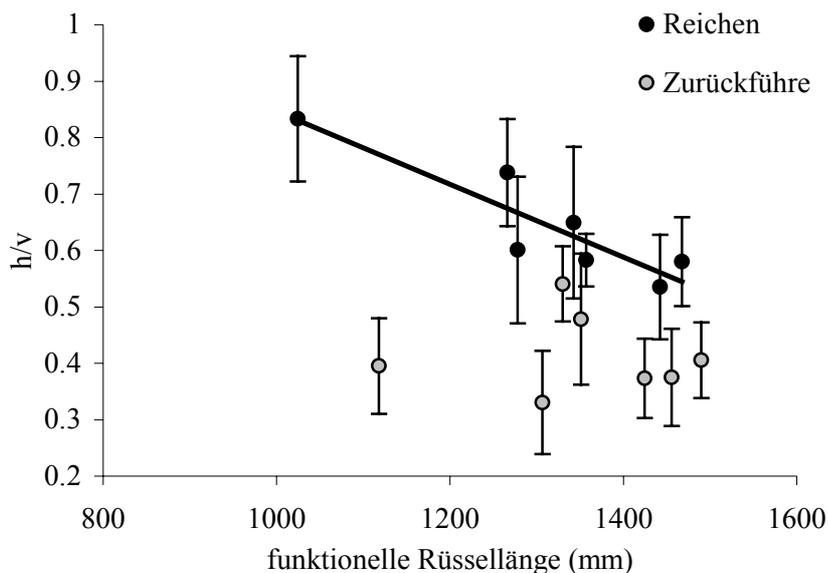


Abb. I-3.8: Zusammenhang zwischen Längenverhältnis der Bewegungsbahnen und funktioneller Rüssellänge. $M \pm SD$ ($N = 10$) des Index zwischen horizontal und vertikal gerichteter Bewegungsbahnlänge (h/v) des dorsalen Rüsselfingers von adulten Tieren als Funktion der funktionellen Rüssellänge in mm beim Reichen und Zurückführen. Die Regressionsgerade beim Reichen ($R^2 = 0,819$, $p = 0,005$) zeigt die konstante Länge der horizontalen Bewegungsbahn mit zunehmender funktioneller Rüssellänge.

3.2.3.2 Krümmung der Bewegungsbahnen

Die Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers waren stets länger als die funktionelle Rüssellänge als Strecke zwischen Start und Ende der Bewegung und krümmten sich folglich. Tabelle I-3.2 zeigt anhand des signifikant geringeren Index der Krümmung (IC), höheren Linearitätsindex (LI) und mittleren Fraktals (FractD) die stärkere Krümmung der Bewegungsbahn beim Reichen im Vergleich zum Zurückführen ($T_{df=8} = 5,316$, $p = 0,001$ beim IC; $T_{df=8} = 6,392$, $p = 0,000$ beim LI; $T_{df=8} = 3,375$, $p = 0,01$ bei FractD). Gemessen an der fraktalen Dimension verlief die Bewegungsbahn beim Objektkontakt gekrümmter als beim Zurückführen ($T_{df=8} = 2,369$, $p = 0,045$), jedoch gestreckter als beim Reichen (t-Test, ns).

Tabelle I-3.2: Krümmungen der Bewegungsbahnen. $M \pm SD$ ($N = 90$) des Index der Krümmung, des Linearitätsindex und der fraktalen Dimension der Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen, Zurückführen und Objektkontakt

Parameter	Bewegungskategorien		
	Reichen	Zurückführen	Objektkontakt
Index der Krümmung	$0,79 \pm 0,05^{***}$	$0,91 \pm 0,02^{***}$	
Linearitätsindex	$0,32 \pm 0,06^{***}$	$0,16 \pm 0,03^{***}$	
fraktale Dimension	$1,09 \pm 0,02$	$1,06 \pm 0,01^*$	$1,08 \pm 0,02^*$

***: $p < 0,001$; * $p < 0,05$

Einflüsse der funktionellen Rüssellänge

Nur beim Reichen hing die Krümmung der Bewegungsbahn von der funktionellen Rüssellänge ab. Beim Reichen nahm der Index der Krümmung bei den adulten Tieren mit zunehmender Rüssellänge linear zu ($R^2 = 0,8859$, $F_{df=5} = 43,14$, $p = 0,001$), blieb beim Zurückführen hingegen konstant (Regressionsanalyse, ns). Folglich streckte sich die Bewegungsbahn beim Reichen mit zunehmender Rüssellänge, während sich ihre Form beim Zurückführen allometrisch veränderte.

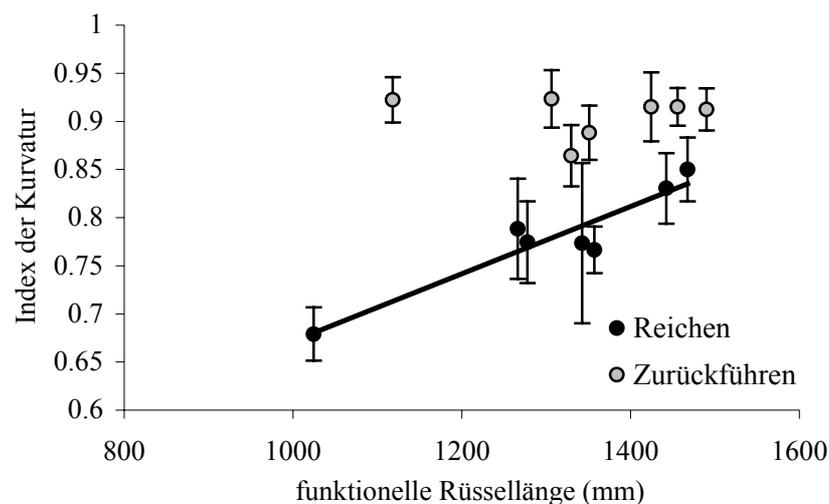


Abb. I-3.9: Zusammenhang zwischen Krümmung der Bewegungsbahnen und funktioneller Rüssellänge. $M \pm SD$ ($N = 10$) des Index der Krümmung bei adulten Tieren als Funktion der funktionellen Rüssellänge in mm beim Reichen und Zurückführen. Die Regressionsgerade beim Reichen ($R^2 = 0,8859$, $p = 0,001$) zeigt die mit zunehmender funktioneller Rüssellänge sich streckenden Bewegungsbahnen.

3.2.4 Tatsächliche Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen und Zurückführen

Als tatsächliche Bewegungsbahn des dorsalen Rüsselfingers wurde seine zur direkten Bewegungsbahn (die Strecke zwischen Start- und Zielposition der Bewegung) relativierte Bewegungsbahn beim Reichen und Zurückführen bezeichnet. Hierfür wurden die Abweichungen der Positionen des dorsalen Rüsselfingers von den Koordinaten der direkten Bewegungsbahn Bild für Bild berechnet.

Die Form der tatsächlichen Bewegungsbahnen erwies sich sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen als asymmetrisch bezogen auf den Zeitanteil von 50 % (Abb. I-3.10). Die maximale Abweichung trat jeweils im distalen Bereich auf, beim Reichen nach $60,74 \pm 5,47 \%$ und infolge der umgekehrten Bewegungsrichtung beim Zurückführen nach $40,3 \pm 4,36 \%$ der Bewegungszeit.

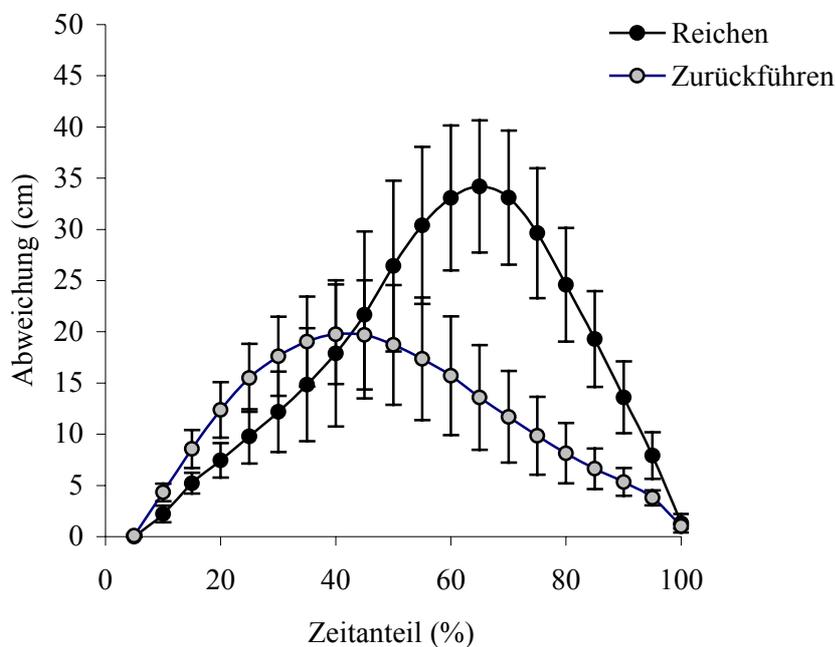


Abb. I-3.10: Tatsächliche Bewegungsbahnen des dorsalen Rüsselfingers. $M \pm SD$ ($N = 90$) der Abweichungen in cm der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn (Strecke zwischen Start und Ziel der Bewegung) des Rüsselfingers als Funktion des prozentualen Zeitanteils beim Reichen und Zurückführen.

Die tatsächlichen Bewegungsbahnen des Rüsselfingers zeigten sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen eine äußerst geringe Varianz (Tabelle I-3.3).

Tabelle I-3.3: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse für die Bewegungsbahnen. $M \pm SD$ ($N = 9$) von Bestimmtheitsmaß R^2 sowie F-Wert und Irrtumswahrscheinlichkeit p beim Reichen und Zurückführen

Testparameter	Bewegungskategorien	
	Reichen	Zurückführen
Bestimmtheitsmaß R^2	$892,53 \pm 56,92$	$904,57 \pm 59,53$
F-Wert	$> 16,76$	$> 6,87$
Irrtumswahrscheinlichkeit p	$> 0,001$	$> 0,017$

3.2.5 Amplituden der tatsächlichen Bewegungsbahnen

Die Amplitude als maximale Abweichung der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn des dorsalen Rüsselfingers unterschied sich in ihrer Länge, der Position ihres Auftretens und ihrer Ausrichtung zwischen Reichen und Zurückführen. Anhand dessen konnte die beim Reichen und Zurückführen unterschiedliche Organisation der tatsächlichen Bewegungsbahn quantifiziert werden.

3.2.5.1 Länge der Amplitude

Tabelle I-3.4 zeigt die beim Reichen im Vergleich zum Zurückführen 1,8-fach größere Amplitude ($T_{df=8} = 7,913$, $p = 0,000$). Im Hinblick auf die beschriebene Mechanik der Rüsselbewegungen entsprach die Amplitude annähernd der Länge des distalen funktionellen Segments und damit dem Abstand des Rüsselfingers von der Biegestelle. Angesichts der mittleren Variationskoeffizienten unterlag die Amplitude beim Reichen geringeren Schwankungen als beim Zurückführen ($T_{df=8} = 2,321$, $p = 0,049$).

Die tatsächliche Bewegungsbahn wich beim Reichen und Zurückführen signifikant weiter sagittal als frontal von der direkten Bewegungsbahn ab ($T_{df=8} = 2,804$, $p = 0,023$ beim Reichen; $T_{df=8} = 3,346$, $p = 0,01$ beim Zurückführen). Beim Reichen erreichte der dorsale Rüsselfinger doppelt so weite frontale und sagittale Abstände von der direkten Bewegungsbahn wie beim Zurückführen ($T_{df=8} = 10,19$, $p = 0,000$ für frontal; $T_{df=8} = 7,096$, $p = 0,000$ für sagittal).

Tabelle I-3.4 : Amplituden der tatsächlichen Bewegungsbahnen. $M \pm SD$ ($N = 90$) der Messwerte (M) in cm und Variationskoeffizienten (V) der maximalen Abweichung der Bewegungsbahn des dorsalen Rüsselfingers von der direkten Bewegungsbahn, differenziert in die gesamte sowie die innerhalb der Sagittal- (sagittal) und Frontalebene (frontal) orientierte maximale Abweichung beim Reichen und Zurückführen

statistische Kennwerte	Amplitude	Bewegungskategorien	
		Reichen	Zurückführen
M (cm)	gesamt	35,72 ± 0,94***	20,15 ± 5,06***
	sagittal	35,07 ± 6,10***	18,83 ± 4,76***
	frontal	31,52 ± 4,54***	16,15 ± 4,68***
V	gesamt	0,19 ± 0,08	0,27 ± 0,09
	sagittal	0,24 ± 0,09	0,32 ± 0,09
	frontal	0,23 ± 0,09	0,26 ± 0,07

***: $p < 0,001$

Beim Reichen zeigten juvenile Tiere mit $30,56 \pm 5,73$ cm signifikant geringere Amplituden als adulte Individuen mit $40,82 \pm 4,29$ cm (ANOVA, $F_{df=8} = 7,993$, $p = 0,026$). Hinsichtlich der frontal ausgerichteten Amplituden ergaben sich beim Reichen ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen juvenilen mit Amplituden von $25,16 \pm 0,59$ cm ($N = 20$) und adulten Tieren mit Amplituden von $33,34 \pm 2,90$ cm ($N = 70$) (ANOVA, $F_{df=8} = 3,442$, $p = 0,002$). Auch die sagittal orientierten Amplituden unterschieden sich zwischen Juvenilen mit

28,46 ± 3,74 cm und Adulten mit 36,96 ± 3,59 cm ($F_{df=8} = 4,827$, $p = 0,000$). Beim Zurückführen ergab sich hingegen kein signifikanter altersgruppenspezifischer Unterschied (ANOVA, ns).

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Abb. I-3.11 zeigt, dass die Amplituden beim Reichen unabhängig von der funktionellen Rüssellänge annähernd konstant blieben (Regressionsanalyse, ns), während sie beim Zurückführen mit zunehmender funktioneller Rüssellänge linear zunahm ($R^2 = 0,5648$, $F_{df=8} = 9,08$, $p = 0,02$). Die Amplitude und damit annähernd die Länge des distalen funktionellen Segments verhielt sich daher beim Zurückführen, nicht jedoch beim Reichen allometrisch.

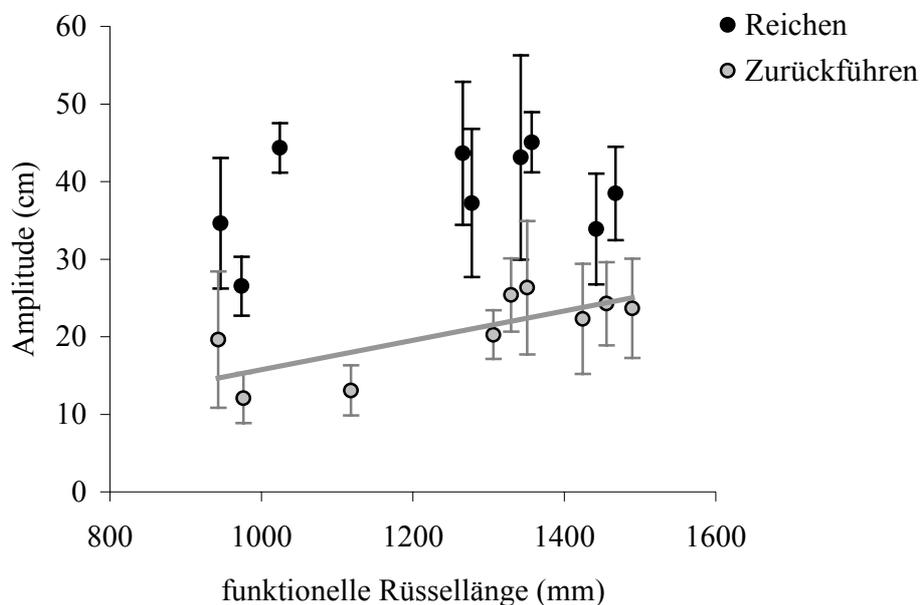


Abb. I-3.11: Zusammenhang zwischen Amplitude der Bewegungsbahnen und funktioneller Rüssellänge. $M \pm SD$ ($N = 10$) in cm der Amplitude des dorsalen Rüsselfingers als Funktion der funktionellen Rüssellänge in mm beim Reichen und Zurückführen. Die Regressionsgerade ($R^2 = 0,5648$, $p = 0,02$) zeigt die Vergrößerung der Amplitude mit zunehmender Rüssellänge beim Zurückführen.

Die frontal und sagittal orientierten Komponenten der Amplituden wurden ebenfalls auf unterschiedliche Weise von der funktionellen Rüssellänge beeinflusst. Trotz zunehmender Rüssellängen blieben die Amplituden konstant. Die Bewegungsbahnen des Rüsselfingers wichen demzufolge bei Tieren mit kürzeren Rüsseln verhältnismäßig weiter frontal sowie sagittal von der direkten Bewegungsbahn ab als bei Elefanten mit längeren Rüsseln.

Beim Zurückführen hingegen vergrößerten sich mit zunehmender funktioneller Rüssellänge sowohl die frontalen Amplituden von $9,67 \pm 2,26$ cm auf $22,35 \pm 6,43$ cm ($F_{df=7} = 8,29$, $p = 0,03$) als auch die sagittalen Amplituden von $10,91 \pm 4,57$ auf $24,38 \pm 8,52$ cm ($F_{df=7} = 7,13$, $p = 0,032$).

3.2.5.2 Erreichen der Amplitude

Die Position des dorsalen Rüsselfingers beim Erreichen der Amplitude seiner Bewegungsbahn unterschied sich zwischen Reichen und Zurückführen. Dabei erwies sich die relative Lage der Amplitude zur Bewegungsbahn als entscheidend für die Organisation der Bewegung.

Tabelle 1-3.5 gibt die Parameter zur Bestimmung der Position des Rüsselfingers relativ zur direkten Bewegungsbahn und zum Boden beim Erreichen der Amplitude an. Beim Reichen erwies sich der Abstand des Rüsselfingers vom Boden (y_{bod}) beim Erreichen der Amplitude als signifikant geringer verglichen mit Zurückführen ($T_{df=8} = 2,397$, $p = 0,043$). Der Abstand des dorsalen Rüsselfingers vom Boden beim Erreichen der Amplitude war beim Reichen um ca. 10 cm geringer als die Amplitude selbst (Tab. I-3.4). Dies weist darauf hin, dass der distale Bereich der tatsächlichen Bewegungsbahn nach dem Erreichen der Amplitude vorwiegend horizontal orientiert ist. Beim Zurückführen hingegen betrug der Abstand des Rüsselfingers vom Boden zum Zeitpunkt des Erreichens der Amplitude etwa 15 cm mehr als der Betrag der Amplitude selbst. Infolge der engen Drehung der Rüsselhand ist der distale Bereich der Bewegungsbahn zu großen Anteilen vertikal orientiert.

Der prozentuale Anteil der direkten Bewegungsbahn proximal des Erreichens der Amplitude (dir_prox) war beim Reichen und Zurückführen gleich groß (t-Test, ns). Der prozentuale Anteil der tatsächlichen Bewegungsbahn proximal der Amplitude (tats_prox) hingegen war beim Reichen um rund 10 % und damit signifikant größer als beim Zurückführen ($T_{df=8} = 3,372$, $p = 0,01$).

Anhand der Variationskoeffizienten kann abgelesen werden, dass der Bodenabstand des Rüsselfingers und damit seine Orientierung im Raum beim Erreichen der Amplitude sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen bis zu doppelt so großen Schwankungen unterlag wie sein Aufenthalt bezogen auf die Entfernung zum Ziel der Bewegung, gemessen am prozentualen Anteil der direkten Bewegungsbahn ($T_{df=8} = 4,124$, $p = 0,003$ beim Reichen; $T_{df=8} = 5,509$, $p = 0,001$ beim Zurückführen) und der tatsächlichen Bewegungsbahn proximal der Amplitude ($T_{df=8} = 4,765$, $p = 0,001$ beim Reichen; $T_{df=8} = 5,498$, $p = 0,001$ beim Zurückführen). Die Planungen der Bewegungsbahnen basieren offenbar eher auf die zurückzulegenden Distanzen zum Ziel der Bewegung als auf räumliche Bezugspunkte.

Tabelle I-3.5: Position des dorsalen Rüsselfingers beim Erreichen der Amplitude. $M \pm SD$ ($N = 90$) der Messwerte (M) und Variationskoeffizienten (V) des prozentualen Anteils der tatsächlichen ($tats_prox$) und direkten (dir_prox) Bewegungsbahn proximal der Amplitude sowie der Abstand des dorsalen Rüsselfingers vom Boden (y_bod) in cm beim Erreichen der Amplitude seiner tatsächlichen Bewegungsbahn für die Bewegungskategorien Reichen und Zurückführen

statistische Kennwerte	Parameter	Bewegungskategorien	
		Reichen	Zurückführen
M	tats_prox (%)	72,52 ± 5,75**	63,33 ± 6,24**
	dir_prox (%)	59,76 ± 6,25	62,00 ± 4,54
	y_bod (cm)	25,80 ± 11,71*	34,85 ± 8,02*
V	tats_prox	0,12 ± 0,12	0,14 ± 0,06
	dir_prox	0,12 ± 0,05	0,12 ± 0,05
	y_bod	0,34 ± 0,21	0,32 ± 0,15

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$

Die frontal und sagittal gerichteten maximalen Abweichungen traten sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen in der gleichen Position und zur selben Zeit auf (t-Test, ns). Sie stimmten mit dem Erreichen der Amplitude überein (Tabelle I-3.6). Die Amplitude der tatsächlichen Bewegungsbahn setzte sich demnach gleichermaßen aus sagittalen und frontalen Komponenten zusammen.

Tabelle I-3.6: Vergleich der Positionen des dorsalen Rüsselfingers beim Erreichen der Amplitude zwischen den verschiedenen Ausrichtungen. $M \pm SD$ ($N = 90$) der Länge der Amplitude in cm und des Anteils in % der tatsächlichen ($tats_prox$) und direkten Bewegungsbahn (dir_prox) sowie der prozentualen Bewegungszeit (MT), jeweils proximal des Erreichens der Amplitude für die Bewegungskategorien Reichen und Zurückführen. Differenziert in frontal und sagittal orientierte sowie gesamte Amplitude

Bewegungskategorien	Parameter	Ausrichtungen der Amplitude		
		frontal	sagittal	gesamt
Reichen	tats_prox (cm)	86,60 ± 40,83	86,58 ± 40,09	85,35 ± 39,20
	tats_prox (%)	72,17 ± 7,34	73,98 ± 7,98	72,52 ± 5,75
	MT (%)	60,47 ± 7,12	61,52 ± 5,81	60,74 ± 5,47
	dir_prox (cm)	74,49 ± 20,14	75,30 ± 17,34	74,39 ± 17,50
	dir_prox (%)	59,50 ± 8,30	60,58 ± 6,34	59,76 ± 60,25
Zurückführen	tats_prox (cm)	80,84 ± 32,70	78,56 ± 38,02	79,73 ± 34,17
	tats_prox (%)	38,79 ± 7,27	35,11 ± 4,70	36,67 ± 6,24
	MT (%)	42,03 ± 5,80	38,94 ± 3,09	40,30 ± 4,36
	dir_prox (cm)	50,07 ± 8,54	46,31 ± 9,01	48,15 ± 9,93
	dir_prox (%)	39,95 ± 6,01	36,59 ± 3,29	38,00 ± 4,54

Beim Reichen ergaben sich signifikant größere Bodenabstände des Rüsselfingers bei den Adulten verglichen mit den Juvenilen (ANOVA, $F_{df=8} = 7,993$, $p = 0,026$). Die Längen des proximalen Streckenanteils der direkten Bewegungsbahn beim Erreichen der Amplitude unterschieden sich hingegen nicht. Beim Zurückführen unterschied sich keiner der Parameter zwischen den Altersgruppen (ANOVA, ns).

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Die funktionelle Rüssellänge wirkte sich unterschiedlich auf die Position der Amplitude beim Reichen und Zurückführen aus. Die Parameter der Amplitude der tatsächlichen Bewegungsbahn korrelierten beim Zurückführen, nicht jedoch beim Reichen mit der funktionellen Rüssellänge.

Der Bodenabstand blieb auch mit zunehmender Rüssellänge konstant (Regressionsanalyse, ns). Folglich vergrößerte sich, wie Abb. I-3.12 zeigt, der Streckenanteil der direkten Bewegungsbahn mit zunehmender funktioneller Rüssellänge ($R^2 = 0,4701$; $F_{df=8} = 6,21$, $p = 0,041$). Je länger der Rüssel eines Tieres, desto weiter distal relativ zur Rüssellänge verschob sich das Erreichen der Amplitude. Dies zeigt, dass die Länge des distalen funktionellen Segments konstant blieb. Direkt konnte dies nicht gemessen werden, da der Fehler bei der Datenerhebung infolge des dicken, eintönig grauen Rüssels groß geworden wäre.

Beim Zurückführen vergrößerte sich der Bodenabstand mit zunehmender Rüssellänge ($R^2 = 0,6033$; $F_{df=5} = 10,65$, $p = 0,014$). Damit übereinstimmend blieb der Streckenanteil der direkten Bewegungsbahn proximal der Amplitude (*dir_prox*) konstant. Der prozentuale Anteil der tatsächlichen Bewegungsbahn proximal der Amplitude (*tats_prox*) dagegen hing bei keiner der Bewegungen von der funktionellen Länge des Rüssels ab (Regressionsanalyse, ns). Der dorsale Rüsselfinger von Tieren mit längeren Rüsseln legte daher im Vergleich zu Individuen mit kurzen Rüsseln proportional längere tatsächliche Bewegungsbahnen bis zum Erreichen der Amplitude zurück.

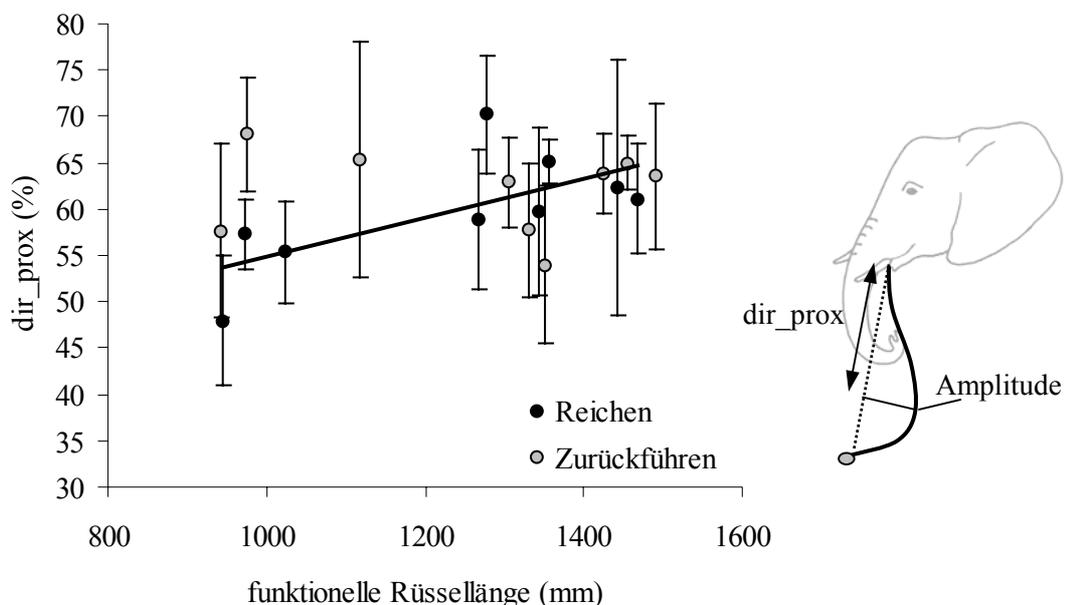


Abb. I-3.12: Zusammenhang zwischen der Position des dorsalen Rüsselfingers beim Erreichen der Amplitude und der funktionellen Rüssellänge. $M \pm SD$ ($N = 10$) des prozentualen Anteils der direkten Bewegungsbahn proximal der Amplitude (*dir_prox*) beim Reichen und Zurückführen als Funktion der funktionellen Rüssellänge in mm. Die Regressionsgerade ($R^2 = 0,4701$, $p = 0,041$) zeigt die mit zunehmender funktioneller Rüssellänge relativ weiter distal erreichte Amplitude beim Reichen. In der Skizze ist zur Verdeutlichung des analysierten Parameters *dir_prox* exemplarisch eine Bewegungsbahn für Reichen dargestellt.

3.2.5.3 Präferenzen der Abweichungen in der Sagittalebene

Sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen unterschied sich das Ausmaß zwischen allozentrisch (vom Individuum weg) und autozentrisch (zum Individuum hin) gerichteten Abweichungen der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn (Tabelle I-3.7). Sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen sind die autozentrischen etwa um das 2-fache und damit signifikant größer als die allozentrischen Abweichungen ($T_{df=8} = 8,738$, $p = 0,000$ beim Reichen; $T_{df=8} = 5,877$, $p = 0,000$ beim Zurückführen). Dass es sich bei den allozentrischen nur um spontan auftretende Abweichungen handelte, lässt sich anhand der signifikant kleineren Flächen ($T_{df=8} = 8,079$, $p = 0,000$ beim Reichen; $T_{df=8} = 5,117$, $p = 0,001$ beim Zurückführen) und der hohen Variationskoeffizienten zeigen.

In 74,4 % der Fälle fanden die allozentrisch orientierten maximalen Abweichungen unmittelbar vor dem Objektkontakt statt. Der Rüsselfinger glitt über das Objekt hinweg, bevor er den Kontakt aufnahm.

Tabelle I-3.7: Maximale Abweichungen des dorsalen Rüsselfingers von der direkten Bewegungsbahn innerhalb der Sagittalebene. $M \pm SD$ ($N = 90$) der statistischen Kennwerte Messwert (M) und Variationskoeffizient (V) von maximaler Abweichung in cm sowie der Fläche in dm^2 zwischen tatsächlicher und direkter Bewegungsbahn für die Bewegungskategorien Reichen und Zurückführen, differenziert in autozentrisch (zum Körper hin) und allozentrisch (vom Körper weg) gerichtete Abweichungen innerhalb der Sagittalebene

Parameter	statistische Kennwerte	Bewegungs-kategorien	Richtungen	
			autozentrisch	allozentrisch
maximale Abweichung	M	Reichen (cm)	27,00 \pm 5,48***	10,80 \pm 5,21***
		Zurückführen (cm)	14,12 \pm 3,33***	6,62 \pm 2,24***
	V	Reichen	0,54 \pm 0,12	0,86 \pm 0,09
		Zurückführen	0,57 \pm 0,09	1,04 \pm 0,29
Fläche	M	Reichen (dm^2)	10,69 \pm 3,42***	0,92 \pm 0,12***
		Zurückführen (dm^2)	7,36 \pm 3,83***	0,89 \pm 0,43***
	V	Reichen	0,40 \pm 0,16	1,37 \pm 0,48
		Zurückführen	0,57 \pm 0,14	1,66 \pm 0,62

***: $p < 0,001$

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Die funktionelle Rüssellänge als Strecke zwischen Start und Ziel der Bewegung beeinflusste die autozentrischen, nicht jedoch die allozentrischen maximalen Abweichungen, wobei sich dies beim Reichen und Zurückführen unterschied.

Während die autozentrisch orientierten maximalen Abweichungen beim Reichen auch mit zunehmender funktioneller Rüssellänge konstant blieben (Regressionsanalyse, ns), nahmen die entsprechenden Flächen linear zu ($R^2 = 0,683$, $F_{df=7} = 15,06$, $p = 0,006$).

Beim Zurückführen nahmen die autozentrisch gerichteten maximalen Abweichungen mit zunehmender funktioneller Rüssellänge linear zu ($R^2 = 0,632$, $F_{df=7} = 12,00$, $p = 0,01$), während die Flächen sich exponentiell vergrößerten ($R^2 = 0,690$, $F_{df=7} = 15,60$, $p = 0,006$).

Die allozentrischen Abweichungen und die korrespondierenden Flächen korrelierten weder beim Reichen noch beim Zurückführen mit der funktionellen Rüssellänge.

3.2.5.4 Präferenzen der Abweichungen in der Frontalebene

Weder beim Reichen noch beim Zurückführen ergaben sich signifikante Unterschiede in den maximalen Abweichung nach rechts oder links (Tabelle I-3.8). Die hohen Variationskoeffizienten zeigten die große Schwankungsbreite der lateralen Abweichungen.

Tabelle I-3.8: Maximale Abweichungen des dorsalen Rüsselfingers von der direkten Bewegungsbahn innerhalb der Frontalebene. $M \pm SD$ ($N = 90$) der statistischen Kennwerte Messwert (M) und Variationskoeffizient (V) maximaler Abweichungen in cm sowie der Flächen in dm^2 zwischen tatsächlicher und direkter Bewegungsbahn des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen und Zurückführen, differenziert in links und rechts gerichtete Abweichungen

statistische Kennwerte	Bewegungskategorien	maximale Abweichungen (cm)		Flächen (dm^2)	
		links	rechts	links	rechts
M	Reichen	16,73 \pm 4,71	16,84 \pm 3,57	3,11 \pm 1,54	4,15 \pm 1,67
	Zurückführen	9,54 \pm 3,29	8,45 \pm 2,18	3,67 \pm 2,83	1,98 \pm 1,05
V	Reichen	0,94 \pm 0,19	0,79 \pm 0,11	1,31 \pm 0,36	1,09 \pm 0,43
	Zurückführen	0,75 \pm 0,09	0,82 \pm 0,24	0,76 \pm 0,21	1,42 \pm 0,34

Bei keinem der neun Individuen konnten signifikante Unterschiede in Ausmaß und Fläche der nach rechts bzw. links gerichteten Abweichungen des Rüsselfingers von der direkten Bewegungsbahn festgestellt werden. Eine Ausnahme bildete Mafuta, deren Abweichungen beim Zurückführen nach links größer waren als die nach rechts ($N_{li} = 10$, $N_{re} = 7$, $T_{df=15} = 3,6$, $p = 0,003$).

Für die Richtungen der Abweichungen konnten keine signifikanten Präferenzen festgestellt werden (Binomialtest, ns).

3.2.6 Flächen zwischen tatsächlicher und direkter Bewegungsbahn

Beim Reichen und Zurückführen umschlossen tatsächliche und direkte Bewegungsbahn jeweils eine in Größe und Form sich unterscheidende Fläche.

Beim Reichen waren die Flächen in Übereinstimmung mit der größeren Abweichung der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn um etwa 1,5-fach und damit signifikant größer als beim Zurückführen ($T_{df=8} = 5,753$, $p = 0,000$), sowohl im proximalen ($T_{df=8} = 5,248$, $p = 0,001$) als auch im distalen ($T_{df=5} = 5,589$, $p = 0,001$) Bereich der Bewegungsbahn (Tabelle I-3.9). Während sich beim Zurückführen die Flächen proximal der Amplitude um etwa 20 cm^2 als signifikant größer erwiesen als jene distal der Amplitude ($T_{df=8} = 4,962$, $p = 0,001$), unterschieden sich beim Reichen weder Betrag noch Anteil der Teilflächen voneinander (t-Test, ns).

Beim Zurückführen war der Anteil der proximalen Teilfläche um rund 10 % größer als jener der distalen Teilfläche ($T_{df=8} = 5,267$, $p = 0,001$). Der Anteil der proximalen Teilfläche erwies sich beim Zurückführen um rund 5 % größer als beim Reichen ($T_{df=8} = 2,663$, $p = 0,029$).

Tabelle I-3.9: Flächen und Teilflächen zwischen tatsächlicher und direkter Bewegungsbahn. $M \pm SD$ ($N = 90$) der gesamten Fläche sowie der Teilflächen proximal (tats_prox) und distal (tats_dist) der Amplitude in dm^2 sowie deren prozentualer Anteil an der Gesamtfläche beim Reichen und Zurückführen

Flächen	Bewegungskategorien	
	Reichen	Zurückführen
gesamt (dm^2)	$2,31 \pm 0,61^{***}$	$1,55 \pm 0,57^{***}$
tats_prox (dm^2)	$1,18 \pm 0,35^{***}$	$0,87 \pm 0,30^{***}$
tats_prox (%)	$51,70 \pm 4,80^*$	$56,93 \pm 3,95^*$
tats_dist (dm^2)	$1,12 \pm 0,29^{***}$	$0,68 \pm 0,28^{***}$
tats_dist (%)	$48,30 \pm 4,80^*$	$43,07 \pm 3,95^*$

*: $p < 0,05$; ***: $p < 0,001$

Beim Reichen und Zurückführen erwiesen sich die Flächen und proximalen Teilflächen der Bewegungsbahn von juvenilen Tieren als jeweils signifikant kleiner als die von adulten Elefanten (ANOVA, $F_{df=8} = 33,66$, $p = 0,001$ für die Fläche; $F_{df=8} = 60,839$, $p = 0,000$ für die proximale Teilfläche beim Reichen; $F_{df=8} = 6,509$, $p = 0,038$ für die Fläche; $F_{df=8} = 7,613$, $p = 0,028$ für die proximale Teilfläche beim Zurückführen). Die prozentualen Anteile der proximalen Flächen unterschieden sich weder beim Reichen noch beim Zurückführen zwischen den Altersgruppen (ANOVA, ns)

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Der Einfluss der funktionellen Rüssellänge auf die Flächen zwischen direkter und tatsächlicher Bewegungsbahn unterschied sich zwischen Reichen und Zurückführen und ließ auf Unterschiede in der Organisation der Bewegungsbahnen schließen.

Abb. I-3.13a zeigt, dass die Flächen beim Reichen auch mit zunehmender Rüssellänge konstant blieben (Regressionsanalyse, ns). Dies galt auch für die proximalen Teilflächen (Regressionsanalyse, ns).

Beim Zurückführen hingegen vergrößerte sich die Fläche mit zunehmender funktioneller Rüssellänge ($R^2 = 0,7071$, $F_{df=7} = 12,07$, $p = 0,018$ bei der Fläche; $R^2 = 0,8357$, $F_{df=7} = 13,22$, $p = 0,008$ bei der proximalen Teilfläche).

Die prozentualen Anteile der proximalen Flächen hingen weder beim Reichen noch beim Zurückführen von der funktionellen Rüssellänge ab (Regressionsanalyse, ns).

Den Flächen zufolge behielten Tiere mit kurzen Rüsseln beim Reichen die Abweichung des Rüsselfingers von der direkten Bewegungsbahn über eine längere Strecke bei als Individuen mit langen Rüsseln, um dieselbe Fläche bei gleich großer Amplitude zu umschließen. Dies könnte mit konvex gebogenen Bewegungsbahnen bei Tieren mit kurzen und eher konkav gebogenen Bewegungsbahnen bei Individuen mit langen Rüsseln erreicht werden

(Abb. I-3.13b). Die mit der funktionellen Rüssellänge zunehmende Flächengröße beim Zurückführen deutet an, dass die Form der tatsächlichen Bewegungsbahn biomechanischen Zwängen unterliegt, die sich aus den Wechselwirkungen zwischen Schwerkraft und Gewebeeigenschaft ergeben.

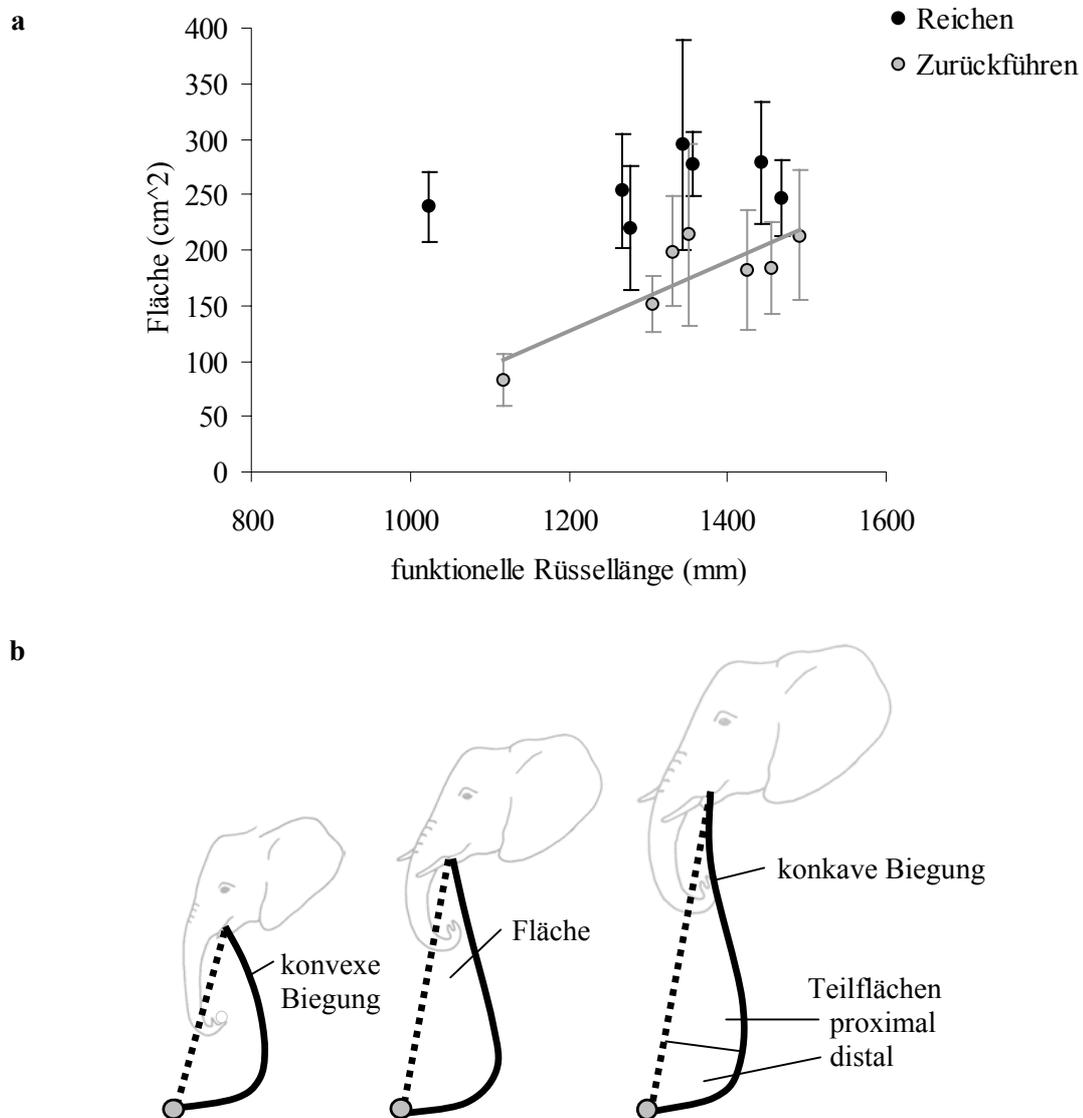


Abb. I-3.13: Zusammenhang zwischen Flächen und funktioneller Rüssellänge. (a) $M \pm SD$ ($N = 10$) der Flächen in cm² zwischen tatsächlicher und direkter Bewegungsbahn als Funktion der funktionellen Rüssellänge in mm beim Reichen und Zurückführen bei adulten Tieren. Die Regressionsgerade ($R^2 = 0,7071$, $p = 0,018$) zeigt die signifikante Zunahme der Flächen mit zunehmender Rüssellänge beim Zurückführen. (b) Schematische Darstellung der Veränderung der Fläche mit zunehmender Rüssellänge. Tiere mit kurzen Rüsseln haben eher konvex, Tiere mit längeren Rüsseln eher konkav gebogene Bewegungsbahnen.

3.2.6.1 Flächen der Abweichungen in der Sagittal- und Frontalebene

Die sagittal und frontal gerichteten Abweichungen der Bewegungsbahn des Rüsselfingers wiesen sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen jeweils unterschiedliche Charakteristika auf.

Tabelle I-3.10 zeigt, dass die Flächen in der Sagittalebene bei beiden Bewegungskategorien in Übereinstimmung mit den größeren Amplituden (Tab. 1-3.4) um das 1,6-fache größer waren als die Flächen in der Frontalebene ($T_{df=8} = 4,100$, $p = 0,003$ beim Reichen; $T_{df=8} = 2,837$, $p = 0,022$ beim Zurückführen). Die Flächen in der Frontalebene unterschieden sich kaum zwischen Reichen und Zurückführen (t-Test, ns). Die geringeren lateralen Abweichungen beim Zurückführen wurden offensichtlich über einen längeren Abschnitt der Bewegung beibehalten, um eine ähnlich große Fläche zu umschließen wie die lateral abweichende tatsächliche Bewegungsbahn beim Reichen mit größeren und nur temporären Amplituden.

Die Flächen innerhalb der Sagittalebene nahmen beim Reichen ein 1,6-fach und damit signifikant größeres Ausmaß an als beim Zurückführen ($T_{df=8} = 2,938$, $p = 0,019$).

Die Mittelwerte der Flächen variierten signifikant stärker als die der maximalen Abweichung (Tab. I-3.4). Dies traf mit dem Faktor 1,3 beim Reichen und 1,4 beim Zurückführen sowohl auf die Flächen in der Sagittalebene ($T_{df=8} = 2,828$, $p = 0,022$ beim Reichen; $T_{df=8} = 2,623$, $p = 0,031$ beim Zurückführen), als auch mit dem Faktor 2,3 beim Reichen und 2,2 beim Zurückführen auf die Flächen in der Frontalebene zu ($T_{df=8} = 5,095$, $p = 0,001$ beim Reichen; $T_{df=8} = 7,292$, $p = 0,000$ beim Zurückführen).

Beim Reichen ergänzten offenbar die temporär auftretenden Abweichungen des Rüsselfingers von der direkten Bewegungsbahn innerhalb der Frontalebene jene Abweichungen innerhalb der Sagittalebene, während beim Zurückführen die geringeren Abweichungen innerhalb der Sagittalebene kontinuierlich von lateralen Abweichungen begleitet wurden.

Tabelle I-3.10: Flächen der Abweichungen innerhalb der Sagittal- und Frontalebene. $M \pm SD$ ($N = 90$) von Messwerten (M) in dm^2 und Variationskoeffizienten (V) der Flächen zwischen tatsächlicher und direkter Bewegungsbahn des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen und Zurückführen, differenziert in Flächenanteile innerhalb der Sagittalebene (sagittal) und Frontalebene (frontal)

statistische Kennwerte	Flächen	Bewegungskategorien	
		Reichen	Zurückführen
M (dm^2)	sagittal	1,14 \pm 0,35*	0,81 \pm 0,39*
	frontal	0,71 \pm 0,23	0,53 \pm 0,28
V	sagittal	0,32 \pm 0,11	0,46 \pm 0,15
	frontal	0,54 \pm 0,16	0,58 \pm 0,12

*: $p < 0,05$

Beim Reichen unterschieden sich die größeren Flächen innerhalb der Frontal- und Medianebene bei den Adulten jeweils signifikant von denen der Juvenilen (ANOVA, $F_{df=8} = 8,889$, $p = 0,000$ für sagittal; $F_{df=8} = 3,406$, $p = 0,002$ für frontal).

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Die Flächen der Abweichungen in der Sagittal- und Frontalebene unterschieden sich in ihrer Abhängigkeit von der funktionellen Rüssellänge. Die Flächen der Abweichungen innerhalb der Sagittalebene wurden beim Reichen und Zurückführen in unterschiedlicher Weise von der funktionellen Rüssellänge bestimmt.

Beim Reichen blieben die Flächen sowohl in der Sagittalebene als auch in der Frontalebene mit zunehmender Rüssellänge konstant (Regressionsanalyse, ns). Beim Zurückführen vergrößerte sich die Fläche innerhalb der Sagittalebene linear mit der Rüssellänge ($R^2 = 0,6479$, $F_{df=8} = 12,88$, $p = 0,009$), während für die Flächenunterschiede in der Frontalen kein Zusammenhang mit der Rüssellänge nachweisbar war (t-Test, ns).

3.2.7 Einfluss der funktionellen Rüssellänge auf die Bewegungsbahnen des Rüsselfingers (Zusammenfassung)

Die Korrelationen der verschiedenen Bewegungsbahnparameter mit der funktionellen Rüssellänge als Strecke zwischen Start und Ziel der Bewegung zeigten, dass die Raumnutzung des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen und Zurückführen unterschiedlich organisiert ist (Abb. I-3.14). Während sich die biomechanischen Zwänge beim Reichen nur auf die Bewegungen des distalen funktionellen Segments auswirkten, beeinflussten sie beim Zurückführen die Bewegungsorganisation des gesamten Rüssels.

Beim Reichen streckte sich die tatsächliche Bewegungsbahn im proximalen Bereich mit zunehmender Rüssellänge. Dabei entsprach die konstante Amplitude der gleichbleibenden Länge des distalen funktionellen Segments, welches die Kinematik des Rüsselfingers bestimmte. Die bei zunehmender funktioneller Rüssellänge im gleichen Abstand vom Boden und mit zunehmender Länge des proximalen Abschnitts der direkten Bewegungsbahn erreichte Amplitude lässt vermuten, dass das funktionelle Gelenk unabhängig von der funktionellen Rüssellänge jeweils im gleichen Bereich der Bewegungsbahn etabliert wird.

Beim Zurückführen hingegen vergrößerte sich die tatsächliche Bewegungsbahn proportional zur funktionellen Rüssellänge. Die Amplitude nahm zu und verschob sich nach proximal. Das konnte am zunehmenden Abstand des Rüsselfingers vom Boden und der konstanten Länge des proximalen Abschnitts der direkten Bewegungsbahn abgelesen werden.

Tabelle I-3.11: Ergebnisse der Korrelationen zwischen der Position des Objekts und Parametern der Amplitude der Bewegungsbahnen beim Reichen. Pearson's Korrelationskoeffizient (r) und Irrtumswahrscheinlichkeit (p) des Zusammenhangs zwischen dem Abstand des Objekts vom Lot zur Startposition des dorsalen Rüsselfingers und folgenden Parametern: Amplitude (b_{max}), Abstand des dorsalen Rüsselfingers vom Boden (y_{bod}) sowie Länge der distalen (dir_{dist}) und proximalen (dir_{prox}) direkten Bewegungsbahn beim Erreichen der Amplitude. Jeweils $N = 10$

Parameter	statistische Testgrößen	Individuen				
		Bibi	Csami	Sabah	Safari	Seronga
b_max	r	0,858	ns	ns	ns	ns
	p	0,002				
y_bod		ns	ns	ns	ns	ns
dir_prox		ns	ns	ns	ns	ns
dir_dist	r	0,746	0,807	0,650	0,786	0,828
	p	0,013	0,005	0,042	0,007	0,003

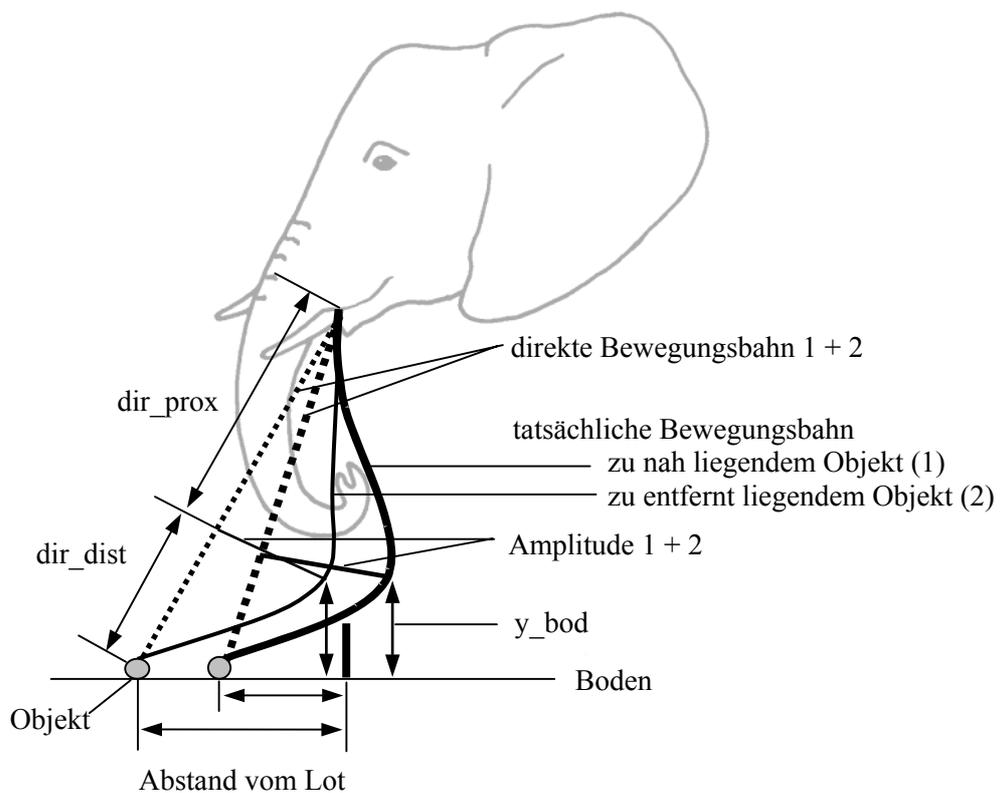


Abb. I-3.15: Schematische Darstellung des Verlaufs der tatsächlichen Bewegungsbahnen bei verschiedenen lokalisierten Objekten. Da die Amplitude der tatsächlichen Bewegungsbahn und der Bodenabstand (y_{bod}) des Rüsselfingers beim Erreichen der Amplitude konstant blieben, die Länge der direkten Bewegungsbahn distal der Amplitude (dir_{dist}) jedoch variierte, verschob sich die tatsächliche Bewegungsbahn in Anpassung an die Ausrichtung der direkten Bewegungsbahn.

3.3 Dauer der Rüsselbewegungen

Anhand der Dauer der einzelnen Bewegungskategorien und der zeitlichen Strukturierung von Reichen und Zurückführen konnten Rückschlüsse auf die temporäre Organisation der Rüsselbewegungen gezogen werden.

3.3.1 Dauer der Bewegungskategorien

Der gesamte Fresszyklus setzte sich aus verschiedenen lang dauernden Bewegungskategorien zusammen.

Wie Abb. I-3.16 zeigt, dauerte der Objektkontakt mit durchschnittlich $0,98 \pm 0,30$ s am längsten. Obwohl beim Reichen und Zurückführen längere Strecken vom dorsalen Rüsselfinger zurückgelegt wurden als beim Objektkontakt, nahmen die beiden Transportbewegungen mit $0,45 \pm 0,07$ s beim Reichen und $0,57 \pm 0,10$ s beim Zurückführen signifikant weniger Zeit in Anspruch ($T_{df=8} = 5,238$, $p = 0,001$ beim Reichen; $T_{df=8} = 4,459$, $p = 0,002$ beim Zurückführen). Die Zeit, die der Rüssel im Maul blieb, war mit $0,40 \pm 0,09$ s signifikant kürzer als beim Objektkontakt ($T_{df=8} = 5,343$, $p = 0,001$), unterschied sich jedoch nicht von Reichen und Zurückführen. Die Funktionen der Bewegungen bestimmten offenbar ihre Dauer, wobei die Manipulation mehr Zeit als der Transport benötigte. Innerhalb der Transportbewegungen ergaben sich ebenfalls unterschiedliche Zeitansprüche. Zurückführen dauerte signifikant länger als Reichen ($T_{df=8} = 5,336$, $p = 0,001$).

Der Objektkontakt zeigte mit einem Variationskoeffizienten von $0,52 \pm 0,13$ ($N = 9$) die größten Schwankungen im Zeitbudget verglichen mit Maul ($0,27 \pm 0,18$), Reichen ($0,17 \pm 0,08$) und Zurückführen ($0,20 \pm 0,016$).

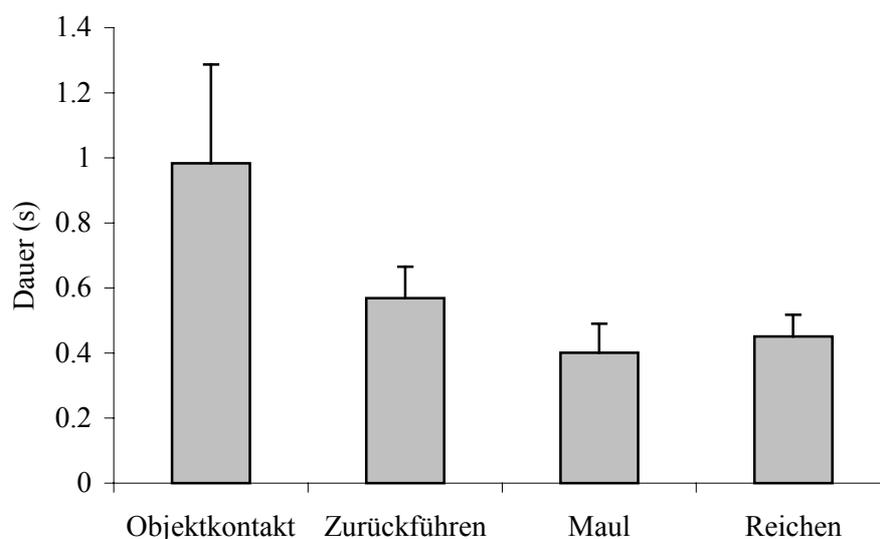


Abb. I-3.16: Dauer der Bewegungskategorien. $M \pm SD$ ($N = 90$) der Dauer in s beim Objektkontakt, Zurückführen, Maul und Reichen.

Die ANOVA einseitige Faktorenanalyse zeigte keine Unterschiede hinsichtlich der Dauer der Bewegungen zwischen den Altersgruppen (ANOVA, ns).

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Die Dauer von Reichen und Zurückführen blieb unabhängig von der Rüssellänge konstant (Regressionsanalyse, ns).

3.3.2 Zeitliche Struktur von Reichen und Zurückführen

Reichen und Zurückführen unterschieden sich hinsichtlich ihrer zeitlichen Strukturierung (Tabelle I-3.12). Beim Zurückführen wurde die Amplitude der tatsächlichen Bewegungsbahn des Rüsselfingers vor, beim Reichen hingegen nach der maximalen Geschwindigkeit erreicht, weshalb sich die Dauer bis zum Erreichen der Amplitude signifikant voneinander unterschied ($T_{df=8} = 2,588$, $p = 0,032$).

Beim Reichen benötigte der Rüsselfinger bis zur maximalen Verzögerung um ein Viertel weniger Zeit als beim Zurückführen ($T_{df=8} = 5,902$, $p = 0,000$). Beim Reichen wurden maximale Geschwindigkeit und maximale Beschleunigung jeweils nach der gleichen Zeit erreicht wie beim Zurückführen. Beim Zurückführen schwankten alle Parameter bis um das 1,8-fache stärker als beim Reichen ($T_{df=8} = 4,396$, $p = 0,002$ für Beschleunigung; $T_{df=8} = 6,987$, $p = 0,000$ für Verzögerung; $T_{df=8} = 4,152$, $p = 0,003$ für die Amplitude; $T_{df=8} = 5,684$, $p = 0,000$ für die Maximalgeschwindigkeit). Sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen variierte die Dauer bis zum Erreichen der maximalen Beschleunigung bis um das Doppelte mehr als die Dauer bis zum Erreichen der maximalen Verzögerung ($T_{df=8} = 4,93$, $p = 0,001$ beim Reichen; $T_{df=8} = 4,367$, $p = 0,002$ beim Zurückführen). Die Verzögerung war daher in ihrem Auftreten auf ein engeres Zeitfenster beschränkt als die Beschleunigung.

Gemessen an der Dauer zur Ausführung der Bewegungsbahn proximal und distal der Amplitude waren Reichen und Zurückführen ähnlich organisiert. Für den proximalen Abschnitt wurde um etwa 30 % mehr Zeit als für den distalen Teil der Bewegungsbahn benötigt, sowohl beim Reichen ($T_{df=8} = 3,34$, $p = 0,01$) als auch beim Zurückführen ($T_{df=8} = 4,043$, $p = 0,004$). Für den distalen Teil wurde beim Zurückführen ($T_{df=8} = 3,851$, $p = 0,005$) ebenso wie für den proximalen Teil ($T_{df=8} = 2,429$, $p = 0,041$) etwa 20 % mehr Zeit als beim Reichen benötigt.

Tabelle I-3.12: Zeitliche Strukturierung der tatsächlichen Bewegungsbahnen. $M \pm SD$ ($N = 90$) der Messwerte (M) und Variationskoeffizienten (V) der Dauer in s bis zum Erreichen folgender Parameter: maximale Beschleunigung (acc_max), maximale Verzögerung (dec_max), maximale Geschwindigkeit (v_max) sowie die Dauer für die Bewegungsbahn des dorsalen Rüsselfingers proximal ($tats_prox$) und distal ($tats_dist$) der Amplitude als größte Abweichung zwischen tatsächlicher und direkter Bewegungsbahn beim Reichen und Zurückführen

statistische Kennwerte	Parameter	Bewegungskategorien	
		Reichen	Zurückführen
M (s)	acc_max	0,15 ± 0,04	0,14 ± 0,05
	dec_max	0,31 ± 0,05***	0,41 ± 0,08***
	v_max	0,24 ± 0,04	0,28 ± 0,09
	tats_prox	0,27 ± 0,04*	0,34 ± 0,06*
	tats_dist	0,18 ± 0,04**	0,23 ± 0,05**
V	acc_max	0,37 ± 0,15***	0,70 ± 0,23***
	dec_max	0,15 ± 0,08***	0,36 ± 0,10***
	v_max	0,15 ± 0,07***	0,34 ± 0,12***
	tats_prox	0,13 ± 0,05	0,24 ± 0,22
	tats_dist	0,30 ± 0,17	0,26 ± 0,09

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Weder beim Reichen noch beim Zurückführen korrelierten die temporären Strukturen der Bewegung mit der funktionellen Rüssellänge (Regressionsanalyse, ns).

3.4 Geschwindigkeiten des dorsalen Rüsselfingers

Anhand der Analyse der Form des Geschwindigkeitsprofils konnte gezeigt werden, dass Reichen und Zurückführen sich im Hinblick auf die Raum-Zeit-Organisation des Rüsselfingers unterschieden.

3.4.1 Geschwindigkeitsprofile des dorsalen Rüsselfingers

Im Geschwindigkeitsprofil (Abb. I-3.17) ist der Verlauf der Geschwindigkeiten des Rüsselfingers als Funktion des prozentualen Zeitanteils dargestellt. Reichen und Zurückführen unterschieden sich in der Form ihres Geschwindigkeitsprofils.

Reichen zeichnete sich durch ein symmetrisches, unimodales Geschwindigkeitsprofil aus. Das Maximum wurde mit exponentiellem Anstieg nach $53,96 \pm 6,90$ % der Bewegungszeit erreicht, worauf die Geschwindigkeit umgekehrt exponentiell sank.

Zurückführen dagegen zeigte ein asymmetrisches, andeutungsweise bimodales Geschwindigkeitsprofil mit einem ausgedehnten Plateau in der zweiten Hälfte der Bewegung. Nach einer annähernd linearen Zunahme der Geschwindigkeit bis zum Maximum nach $48,02 \pm 7,52$ % der Bewegungszeit erfolgte eine zunächst flache lineare Abnahme bis zur steilen Geschwindigkeitsverringerng am Ende der Bewegung. Auf diese Weise deutete sich ein zweites lokales Maximum an. Sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen traten die maximalen Geschwindigkeiten in einem ähnlichen Zeitabschnitt der Bewegung auf (t-Test, ns).

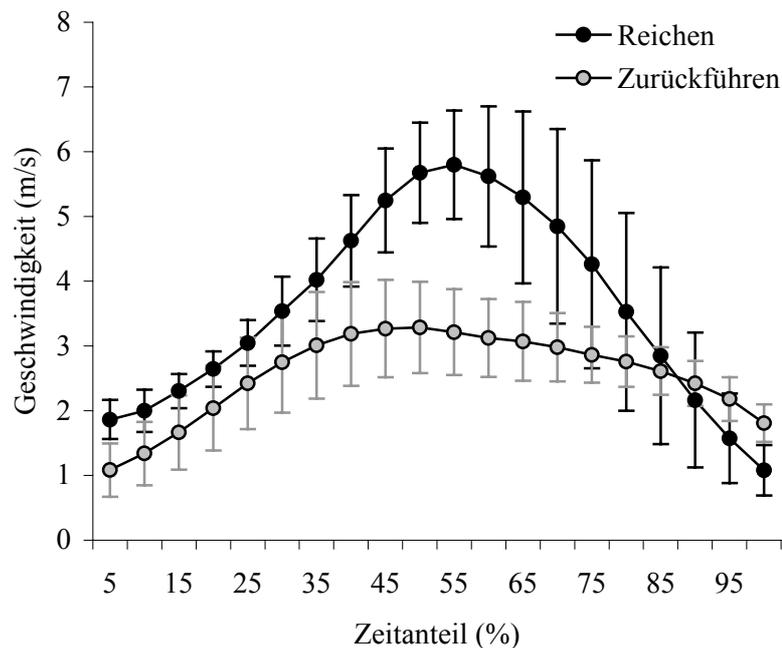


Abb. I-3.17: Geschwindigkeitsprofile des dorsalen Rüsselfingers. $M \pm SD$ ($N = 90$) der Geschwindigkeiten in m/s als Funktion des prozentualen Zeitanteils beim Reichen und Zurückführen.

Die Geschwindigkeitsprofile zeichneten sich sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen durch eine äußerst geringe Varianz aus (Tabelle I-3.13).

Tabelle I-3.13: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse für die Geschwindigkeitsprofile. $M \pm SD$ ($N = 90$) von Bestimmtheitsmaß R^2 sowie F-Wert und Irrtumswahrscheinlichkeit p für Reichen und Zurückführen

Testgrößen	Bewegungskategorien	
	Reichen	Zurückführen
Bestimmtheitsmaß R^2	$819,07 \pm 99,47$	$752,57 \pm 114,67$
F-Wert	$> 7,44$	$> 4,69$
Irrtumswahrscheinlichkeit p	$< 0,014$	$< 0,044$

3.4.2 Maximalgeschwindigkeiten

3.4.2.1 Beträge der Maximalgeschwindigkeiten

Reichen und Zurückführen erreichten unterschiedlich hohe Maximalgeschwindigkeiten (Tabelle I-3.14). Beim Reichen lag die Maximalgeschwindigkeit um das 1,8-fache und damit signifikant höher als beim Zurückführen ($T_{df=8} = 13,091$, $p = 0,000$). Die Schwankungen um den Mittelwert unterschieden sich kaum zwischen Reichen und Zurückführen (t-Test, ns).

Tabelle I-3.14: Maximale Geschwindigkeiten des dorsalen Rüsselfingers. $M \pm SD$ ($N = 90$) der Messwerte (M) in m/s und Variationskoeffizienten (V) beim Reichen und Zurückführen

statistische Kennwerte	Bewegungskategorien	
	Reichen	Zurückführen
M (m/s)	6,60 \pm 0,91***	3,68 \pm 0,69***
V	0,10 \pm 0,04	0,14 \pm 0,06

***: $p < 0,001$

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Die Maximalgeschwindigkeiten korrelierten weder beim Reichen noch beim Zurückführen mit der funktionellen Rüssellänge (Regressionsanalyse, ns). Demzufolge erreichten Tiere mit kürzeren Rüsseln eine relativ höhere Maximalgeschwindigkeit als Individuen mit langen Rüsseln.

3.4.2.2 Erreichen der Maximalgeschwindigkeiten

Beim Reichen wurde die maximale Geschwindigkeit bereits vor, beim Zurückführen hingegen erst nach der Amplitude der tatsächlichen Bewegungsbahn erreicht (Tabelle I-3.15). Die Geschwindigkeit beim Reichen ergab sich daher nicht rein mechanisch aus der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Pendelbewegung des distalen funktionellen Segments um die Biegestelle als funktionelles Gelenk. In diesem Fall hätte das Geschwindigkeitsmaximum zeitgleich mit der Amplitude erreicht werden müssen. Der dorsale Rüsselfinger erreichte seine Maximalgeschwindigkeit sowohl beim Reichen als auch beim Zurückführen im gleichen räumlichen Abstand zum Boden (y_{bod}) und im gleichen Streckenanteil der direkten Bewegungsbahn proximal der Amplitude (dir_{prox}) (t-Test, ns). Die um 0,10 größere Varianz des Bodenabstandes im Vergleich zum Streckenanteil deutet darauf hin, dass die Raum-Zeit-Organisation der Bewegung eher auf der Distanz zum Ziel als auf der Position des Rüssels im Raum beruht. Allerdings waren die Unterschiede nicht signifikant. Die beim Zurückführen um 0,05 bzw. 0,09 im Vergleich zum Reichen größeren Variationskoeffizienten ($T_{df=8} = 3,397$, $p = 0,009$) können auf die unterschiedliche funktionelle Rüssellänge zurückgeführt werden.

Tabelle I-3.15: Vergleich der Positionen des dorsalen Rüsselfingers beim Erreichen der maximalen Geschwindigkeit und der Amplitude. $M \pm SD$ ($N = 90$) der statistischen Kennwerte Messwert (M) und Variationskoeffizient (V) der Parameter Bodenabstand des Rüsselfingers (y_{bod}) in cm und prozentualer Anteil der direkten Bewegungsbahn proximal der Amplitude (dir_{prox}), jeweils beim Erreichen der Maximalgeschwindigkeit (v_{max}) und der Amplitude beim Reichen und Zurückführen

statistische Kennwerte	Parameter	Bewegungskategorien			
		Reichen		Zurückführen	
		v_{max}	Amplitude	v_{max}	Amplitude
M	y_{bod} (cm)	$42,55 \pm 5,36$	$25,80 \pm 11,71$	$48,34 \pm 13,30$	$34,85 \pm 8,02$
	dir_{prox} (%)	$52,51 \pm 7,86$	$59,76 \pm 6,25$	$54,02 \pm 8,03$	$62,00 \pm 4,54$
V	y_{bod}	$0,26 \pm 0,07^{**}$	$0,34 \pm 0,21$	$0,31 \pm 0,13^{**}$	$0,32 \pm 0,15$
	dir_{prox}	$0,15 \pm 0,06^{**}$	$0,12 \pm 0,05$	$0,24 \pm 0,10^{**}$	$0,12 \pm 0,05$

** : $p < 0,01$

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Die funktionelle Rüssellänge beeinflusste das Auftreten der Maximalgeschwindigkeit beim Zurückführen, nicht jedoch beim Reichen. Aus Abb. I-3.18 geht hervor, dass der Streckenanteil (dir_{prox}) beim Erreichen der Maximalgeschwindigkeit beim Reichen mit zunehmender funktioneller Rüssellänge signifikant anstieg ($R^2 = 0,7174$, $F_{df=7} = 6,04$, $p = 0,044$). Tiere mit langen Rüsseln erreichten die Maximalgeschwindigkeit verhältnismäßig weiter distal als Tiere mit kurzen Rüsseln. Beim Zurückführen hingegen blieb der Streckenanteil (dir_{prox}) konstant (Regressionsanalyse, ns). Während die Raum-Zeit-Koordination beim Zurückführen an die funktionelle Rüssellänge gekoppelt ist, bleibt sie beim Reichen offenbar auf das distale funktionelle Segment beschränkt.

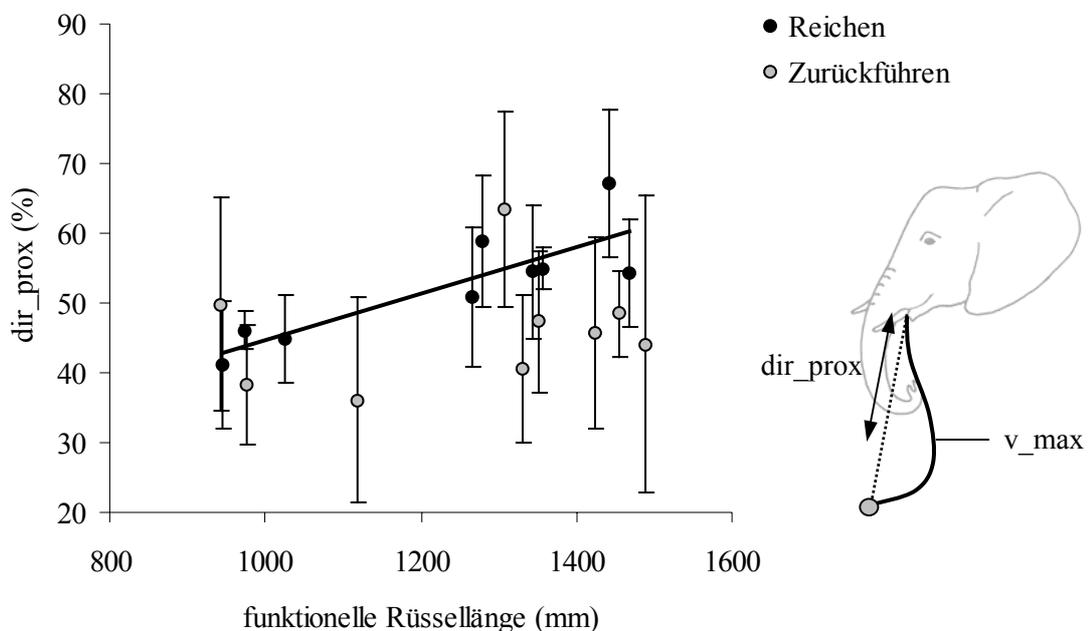


Abb. I-3.18: Zusammenhang zwischen der Position des dorsalen Rüsselfingers beim Erreichen der Maximalgeschwindigkeit und der funktionellen Rüssellänge. $M \pm SD$ ($N = 10$) des prozentualen Anteils der direkten Bewegungsbahn proximal der Amplitude (dir_{prox}) als Funktion der funktionellen Rüssellänge in mm beim Reichen und Zurückführen. Die Regressionsgerade ($R^2 = 0,7174$, $p = 0,044$) zeigt die mit zunehmender Rüssellänge relativ weiter distal erreichte Maximalgeschwindigkeit (v_{max}) des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen.

3.4.3 Integrale der Geschwindigkeitsprofile

Die Adulten zeigten ein signifikant größeres Integral der Geschwindigkeitsprofile als die Juvenilen (ANOVA, $F_{df=1} = 43,892$, $p = 0,000$ beim Reichen; $F_{df=1} = 16,551$, $p = 0,005$ beim Zurückführen).

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Abb. I-3.19 zeigt, dass sich die Flächen unter den Geschwindigkeitsprofilen beim Reichen und Zurückführen bezogen auf die adulten Tiere mit zunehmender Rüssellänge in signifikantem Maße vergrößerten ($R^2 = 0,94$, $F_{df=5} = 17,86$, $p = ,008$ beim Reichen; $R^2 = 0,7813$, $F_{df=5} = 78,31$, $p = 0,000$ beim Zurückführen). Die Steigung der Regressionsgeraden erwies sich beim Zurückführen mit 0,0011 als steiler im Vergleich zum Reichen mit 0,0006. Elefanten mit längeren Rüsseln behielten daher höhere Geschwindigkeiten ihres Rüsselfingers über einen längeren Zeitraum hinweg bei als Tiere mit kürzeren Rüsseln. Dadurch konnten beim Reichen die mit zunehmender Rüssellänge längeren Bewegungsbahnen unter Einhaltung konstanter Maximalgeschwindigkeiten zurückgelegt werden.

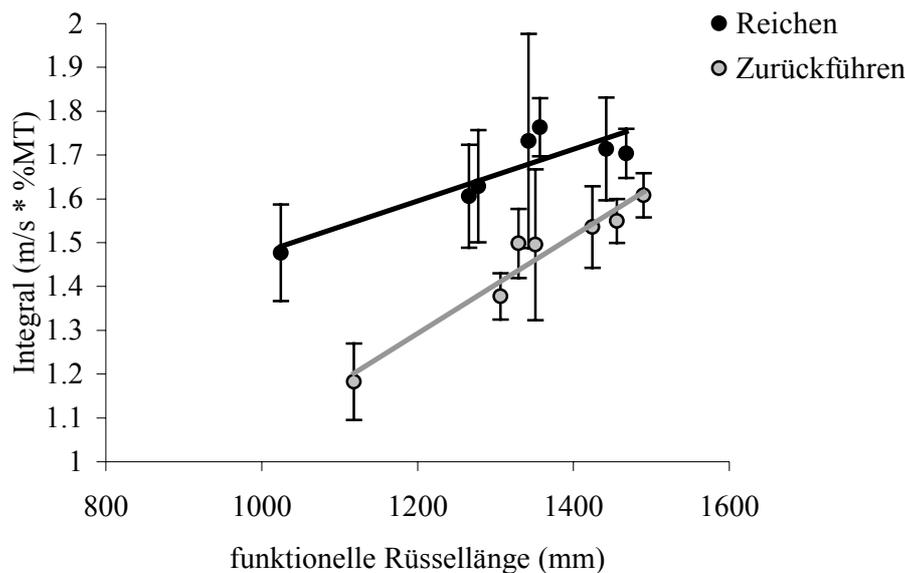


Abb. I-3.19: Zusammenhang zwischen Integral des Geschwindigkeitsprofils und funktioneller Rüssellänge. $M \pm SD$ ($N = 10$) der Integrale in $m/s * \%MT$ ($MT =$ Bewegungszeit) der Geschwindigkeitsprofile adulter Tiere als Funktion der funktionellen Rüssellänge beim Reichen und Zurückführen. Mit zunehmender Rüssellänge vergrößerten sich die Integrale beim Zurückführen (graue Regressionsgerade, $R^2 = 0,7813$, $p = 0,000$) stärker als beim Reichen (schwarze Regressionsgerade, $R^2 = 0,94$, $p = 0,008$).

3.4.4 Fallgeschwindigkeiten des Rüsselfingers beim Reichen

Beim Reichen wurde die theoretisch zu erwartende Fallgeschwindigkeit innerhalb eines engen Zeitfensters vor Beginn der Drehbewegung des funktionellen distalen Segments um die Biegestelle überschritten. Dies erbrachte einen Zeitgewinn.

3.4.4.1 Vergleich der Fall- mit der gemessenen Geschwindigkeit

Das Geschwindigkeitsprofil in Abb. I-3.20 zeigt die Differenzen zwischen gemessener Geschwindigkeit und theoretisch zu erwartender Fallgeschwindigkeit des dorsalen Rüsselfingers. Die Fallgeschwindigkeit wurde innerhalb eines engen Zeitfensters etwa zur Hälfte der Bewegung über einen relativen Zeitraum von etwa 30 % überschritten.

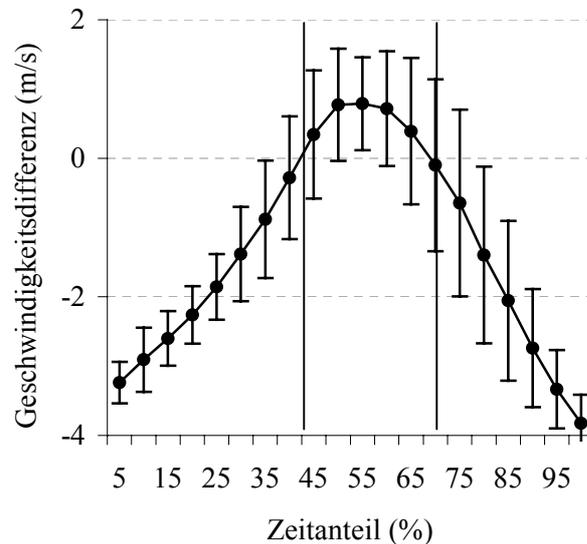


Abb. I-3.20: Vergleich der gemessenen Geschwindigkeit mit der erwarteten Fallgeschwindigkeit. $M \pm SD$ ($N = 90$) der Geschwindigkeitsdifferenzen in m/s zwischen gemessener Geschwindigkeit und berechneter Fallgeschwindigkeit des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen als Funktion des prozentualen Zeitanteils. Der Rahmen gibt den Bereich des Überschreitens der Fallgeschwindigkeit an.

Mit der Überschreitung der Fallgeschwindigkeit ergab sich bei nahezu allen Tieren ein Zeitgewinn, der bis zu 40 % betragen konnte (Abb. I-3.21). Dies betraf insbesondere Tiere mittleren Alters.

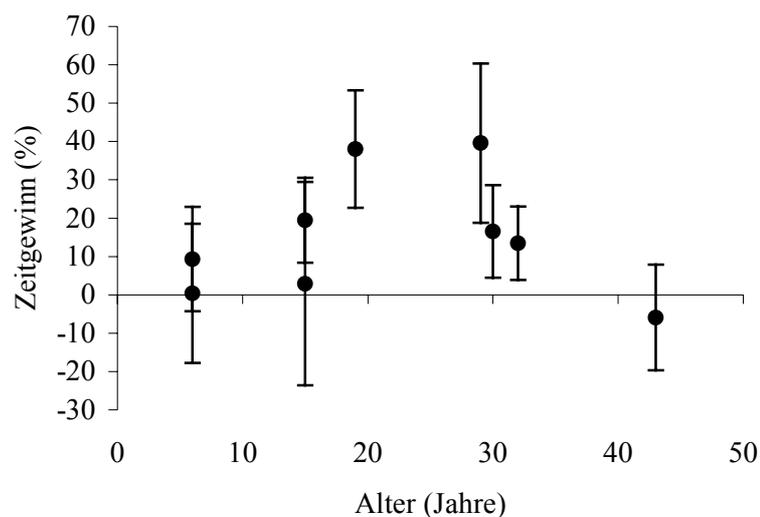


Abb. I-3.21: Zusammenhang zwischen Zeitgewinn und Alter beim Reichen. $M \pm SD$ ($N = 10$) des prozentualen Zeitgewinns durch Überschreitung der Fallgeschwindigkeit, berechnet aus der Differenz zwischen gemessener und bei Einhaltung der Fallgeschwindigkeit benötigter Dauer als Funktion des Alters in Jahren.

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Der Zeitgewinn korrelierte nicht mit der funktionellen Rüssellänge (Regressionsanalyse, ns).

3.4.4.2 Lokalisierung der Fallgeschwindigkeitsüberschreitung

Bezogen auf den Streckenanteil der direkten Bewegungsbahn (dir_prox) wurde die Fallgeschwindigkeit um 25 % eher als die Amplitude erreicht (Tabelle I-3.16). Die noch größeren Differenzen von 37 % bezogen auf den Anteil der tatsächlichen Bewegungsbahn (tats_prox) weisen darauf hin, dass die Fallgeschwindigkeit bereits vor dem Beginn der Drehung der Rüsselhand um die Transversalachse erreicht wurde, denn diese macht aufgrund der großen Krümmung den Großteil der Bewegungsbahn aus. Damit erreicht die Geschwindigkeit ihr Maximum, wenn der Rüssel beginnt, sich um die Biegestelle als funktionelles Gelenk zu drehen. Die größeren Variationskoeffizienten des Bewegungsbahnanteils beim Überschreiten der Fallgeschwindigkeit im Vergleich zum Erreichen der Amplitude folgen aus den verschiedenen Längen der Rüssel.

Tabelle I-3.16: Vergleich der Positionen des dorsalen Rüsselfingers beim Überschreiten der Fallgeschwindigkeit und beim Erreichen der Amplitude. $M \pm SD$ ($N = 90$) der Messwerte (M) und Variationskoeffizienten (V) des prozentualen proximalen Anteils der tatsächlichen (tats_prox) und direkten Bewegungsbahn (dir_prox) beim Überschreiten der Fallgeschwindigkeit (v_{Fall}) und beim Erreichen der Amplitude im Verlauf des Reichens

statistische Kennwerte	Parameter	Positionen des dorsalen Rüsselfingers	
		v_{Fall}	Amplitude
M (%)	dir_prox	35,47 ± 6,75	59,76 ± 6,25
	tats_prox	35,71 ± 8,66	72,52 ± 5,75
V	dir_prox	0,19 ± 0,08	0,12 ± 0,05
	tats_prox	0,24 ± 0,12	0,12 ± 0,12

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Die Strecke, die beim Überschreiten der Fallgeschwindigkeit zurückgelegt wurde, verlängerte sich signifikant mit zunehmender Rüssellänge ($R^2 = 0,8716$; $F_{df=7} = 9,62$, $p = 0,017$). Ein Teil des Reichens beruhte folglich auf der Nutzung physikalischer Gesetzmäßigkeiten.

3.4.5 Einfluss der funktionellen Rüssellänge auf die Geschwindigkeiten (Zusammenfassung)

Die analysierten Parameter der Geschwindigkeit zeigten unterschiedliche Raum-Zeit-Koordinationen beim Reichen und Zurückführen (Abb. I-3.22).

Die Fallgeschwindigkeiten beim Reichen wurden stets beim Übergang des dorsalen Rüsselfingers in den stärker gekrümmten Abschnitt der Bewegungsbahn zum Vorschwingen des distalen funktionellen Segments um die Biegestelle überschritten. Da die

Maximalgeschwindigkeit noch vor der Amplitude der Bewegungsbahn des Rüsselfingers erreicht wurde, kann sie nicht rein mechanisch auf der Pendelbewegung des distalen funktionellen Segments beruhen. Hierfür muss ein anderer Mechanismus diskutiert und berechnet werden. Beim Zurückführen hingegen wurde die maximale Geschwindigkeit erst nach der Amplitude der Bewegungsbahn erreicht und folglich auch nach der Rüsselhanddrehung. Dies lässt eine Differenzierung in Bewegungsabschnitte vermuten, die zuerst der Ausrichtung und anschließend dem Transport der Rüsselhand dienen.

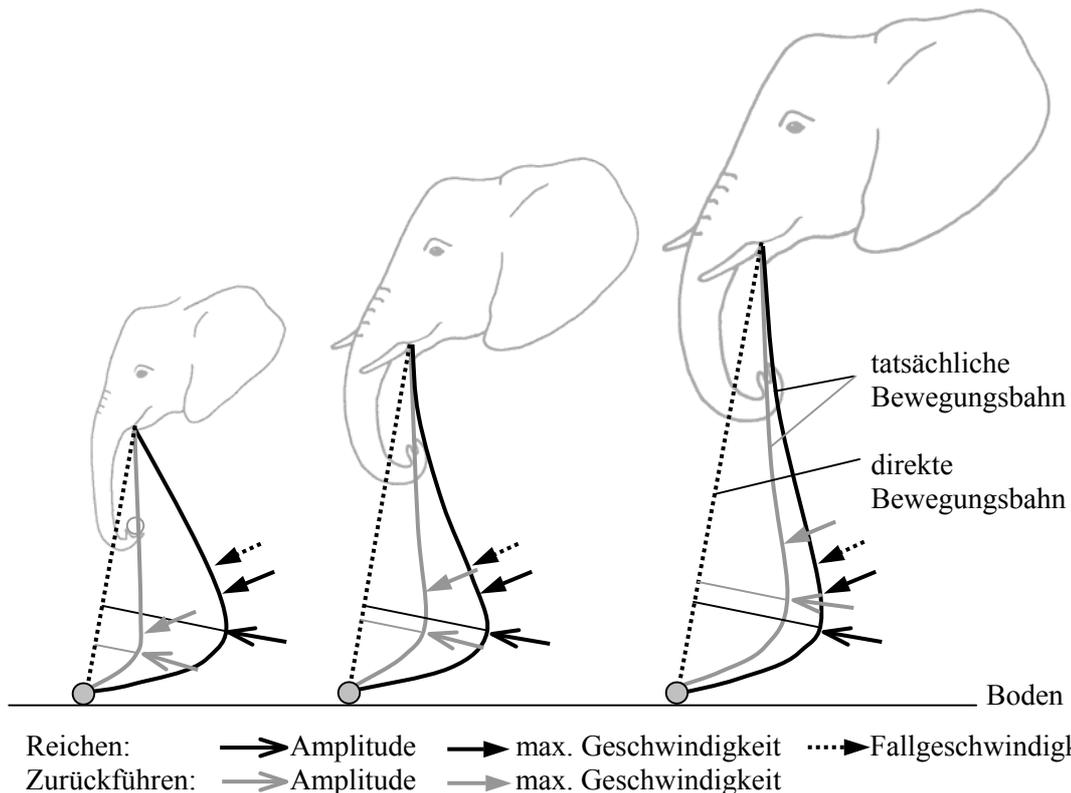


Abb. I-3.22: Schematische Darstellung des Erreichens der Geschwindigkeitsparameter bei verschiedenen funktionellen Rüssellängen. Beim Reichen (schwarz) werden die Maximalgeschwindigkeiten (max. Geschwindigkeiten anders als beim Zurückführen (grau) unabhängig von der Rüssellänge im selben Bereich der tatsächlichen Bewegungsbahn vor der Amplitude und nach der Fallgeschwindigkeit erreicht.

3.5 Beschleunigungen und Verzögerungen des Rüsselfingers

Beschleunigungen als Geschwindigkeitsänderungen pro Zeiteinheit können Anhaltspunkte über die Auswirkungen von Bewegungskontrollen vermitteln. Mit der Quantifizierung des Beschleunigungsprofils und den Korrelationen der Beschleunigungsparameter mit der funktionellen Rüssellänge zeigten sich unterschiedliche Geschwindigkeits-Zeit-Organisationen des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen und Zurückführen.

3.5.1 Beschleunigungsprofile des Rüsselfingers

Im Beschleunigungsprofil sind die mittleren Beschleunigungen des Rüsselfingers als Funktion des prozentualen Zeitanteils aufgetragen (Abb. I-3.23). Die Beschleunigungsprofile unterschieden sich dabei grundlegend zwischen Reichen und Zurückführen.

Beim Reichen zeichnete sich das Beschleunigungsprofil des Rüsselfingers durch eine annähernd sinusförmige Kurve aus, wobei die maximale Beschleunigung im ersten und nach steilem Abfall der Kurve die maximale Verzögerung im letzten Drittel der Bewegung erreicht wurde. Besonders während der Beschleunigung zeigten sich Unregelmäßigkeiten. Beim Zurückführen hingegen wurde das Beschleunigungsmaximum bereits zu Beginn der Bewegung erreicht, worauf die stete, flache Abnahme der Beschleunigung von der Andeutung eines lokalen Maximums in der zweiten Hälfte der Kurve unterbrochen wurde. Dies lässt darauf schließen, dass Muskelkräfte beim Reichen eher temporär und kräftig, beim Zurückführen hingegen verteilt über den ganzen Bereich der Bewegung eingesetzt wurden.

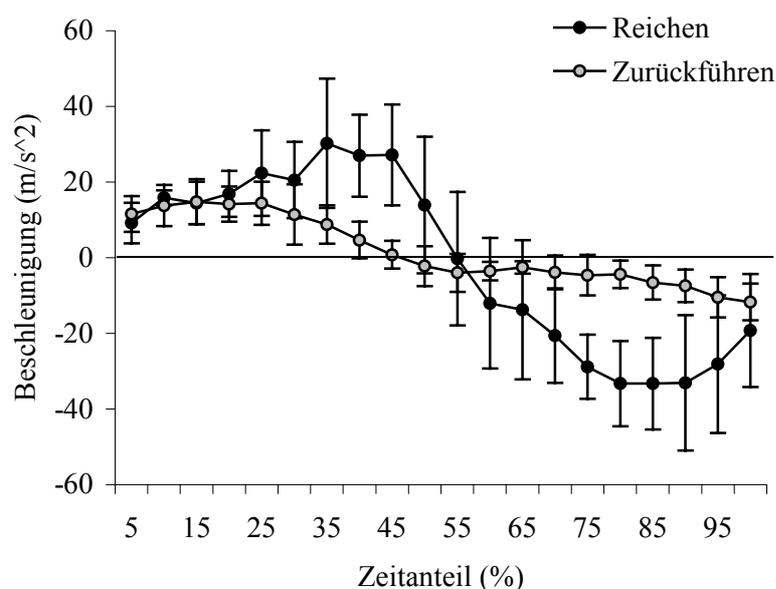


Abb. I-3.23: Beschleunigungsprofile des dorsalen Rüsselfingers. $M \pm SD$ ($N = 90$) in m/s^2 der Beschleunigungen als Funktion des prozentualen Zeitanteils beim Reichen und Zurückführen.

3.5.2 Maximale Beschleunigungen und Verzögerungen

3.5.2.1 Beträge der maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen

Beim Reichen und Zurückführen wurden unterschiedlich hohe Beschleunigungen und Verzögerungen in unterschiedlichen Bereichen der Bewegungsbahnen erreicht.

Tabelle I-3.17 zeigt, dass der dorsale Rüsselfinger beim Reichen doppelt so hoch beschleunigt wurde wie beim Zurückführen ($T_{df=8} = 8,449$, $p = 0,000$). Demzufolge war die Verzögerung beim Reichen auch signifikant größer als beim Zurückführen ($T_{df=8} = 7,952$, $p = 0,000$). Beim Reichen zeigten die Variationskoeffizienten 1,5-fach größere Schwankungen der Beschleunigung im Vergleich zur Verzögerung ($T_{df=8} = 2,369$, $p = 0,045$). Zur Verringerung der Geschwindigkeit mussten offenbar gezielt Muskelkräfte eingesetzt werden, um den Rüssel nicht auf den Boden aufschlagen zu lassen. Umgekehrt variierte beim Zurückführen die Verzögerung 1,3-fach stärker als die Beschleunigung ($T_{df=8} = 2,566$, $p = 0,033$). Zur Beschleunigung des dorsalen Rüsselfingers gegen die Schwerkraft ist der Einsatz gezielter Muskelkräfte erforderlich.

Tabelle I-3.17: Maximale Beschleunigungen und Verzögerungen des dorsalen Rüsselfingers. $M \pm SD$ ($N = 90$) der Messwerte (M) in m/s^2 und Variationskoeffizienten (V) der maximalen Beschleunigung (acc_max) und Verzögerung (dec_max) beim Reichen und Zurückführen

statistische Kennwerte	Parameter	Bewegungskategorien	
		Reichen	Zurückführen
M (m/s^2)	acc_max	58,05 \pm 24,23***	27,97 \pm 8,53***
	dec_max	55,44 \pm 12,49***	24,56 \pm 11,63***
V	acc_max	0,41 \pm 0,15	0,39 \pm 0,14
	dec_max	0,27 \pm 0,10	0,52 \pm 0,20

*** : $p < 0,001$

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Weder die maximale Beschleunigung noch Verzögerung korrelierten beim Reichen oder Zurückführen mit der funktionellen Rüssellänge (Regressionsanalyse, ns).

3.5.2.2 Erreichen der maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen

Die Beschleunigung fand beim Reichen in verschiedenen, die Verzögerung hingegen in äquivalenten Bereichen der Bewegungsbahn statt (Tabelle I-3.18).

Beim Zurückführen erreichte der dorsale Rüsselfinger seine maximale Beschleunigung bereits nach einem Fünftel, beim Reichen erst nach einem Drittel der direkten Bewegungsbahn ($F_{df=8} = 2,714$, $p = 0,027$). Gebremst wurde der dorsale Rüsselfinger bei beiden Bewegungen im gleichen Bereich gegen Ende der Bewegung (t-Test, ns), wobei die Geschwindigkeit bereits bei etwa 30 % der Strecke vor dem Ziel am stärksten gedrosselt wurde. Positive und negative Beschleunigungen einer Bewegung lagen jeweils signifikant

voneinander entfernt ($T_{df=8} = 23,931$, $p = 0,000$ beim Reichen; $T_{df=8} = 13,175$, $p = 0,000$ beim Zurückführen).

Wie aus den unterschiedlichen Variationskoeffizienten hervorgeht, beschränkte sich die maximale Verzögerung auf einen signifikant engeren Abschnitt der direkten Bewegungsbahn als die Maximalbeschleunigung ($T_{df=8} = 4,403$, $p = 0,002$ beim Reichen; $T_{df=8} = 5,198$, $p = 0,001$ beim Zurückführen). Die maximalen Geschwindigkeitsänderungen blieben beim Reichen im Vergleich zum Zurückführen auf einen engeren Bewegungsbahnabschnitt beschränkt. Dies traf sowohl auf die Beschleunigung ($T_{df=8} = 3,814$, $p = 0,005$) als auch auf die Verzögerung zu ($T_{df=8} = 5,777$, $p = 0,000$).

Tabelle I-3.18: Positionen des dorsalen Rüsselfingers beim Erreichen der maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen. $M \pm SD$ ($N = 90$) von Messwerten (M) und Variationskoeffizienten (V) der prozentualen direkten Bewegungsbahnlänge proximal des Erreichens der maximalen Beschleunigung (acc_max) bzw. Verzögerung (dec_max) des dorsalen Rüsselfingers beim Reichen und Zurückführen

statistische Kennwerte	Parameter	Bewegungskategorien	
		Reichen	Zurückführen
M (%)	acc_max	31,71 ± 8,89*	21,41 ± 6,61*
	dec_max	68,40 ± 10,71	71,93 ± 8,13
V	acc_max	0,35 ± 0,17**	0,74 ± 0,21**
	dec_max	0,17 ± 0,06***	0,34 ± 0,10***

* : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Reichen und Zurückführen unterschieden sich im Hinblick auf den Einfluss der funktionellen Rüssellänge auf das Erreichen der Beschleunigung bzw. Verzögerung (Abb. I-3.24).

Beim Reichen nahm der prozentuale Streckenanteil der direkten Bewegungsbahn proximal des Erreichens der Maximalbeschleunigung ($R^2 = 0,5043$, $F_{df=7} = 7,12$, $p = 0,032$) und der Maximalverzögerung ($R^2 = 0,5812$, $F_{df=7} = 9,71$, $p = 0,017$) signifikant mit der funktionellen Rüssellänge zu. Beim Zurückführen hingegen blieb dieser Anteil selbst bei verschiedenen Rüssellängen konstant (Regressionsanalyse, ns).

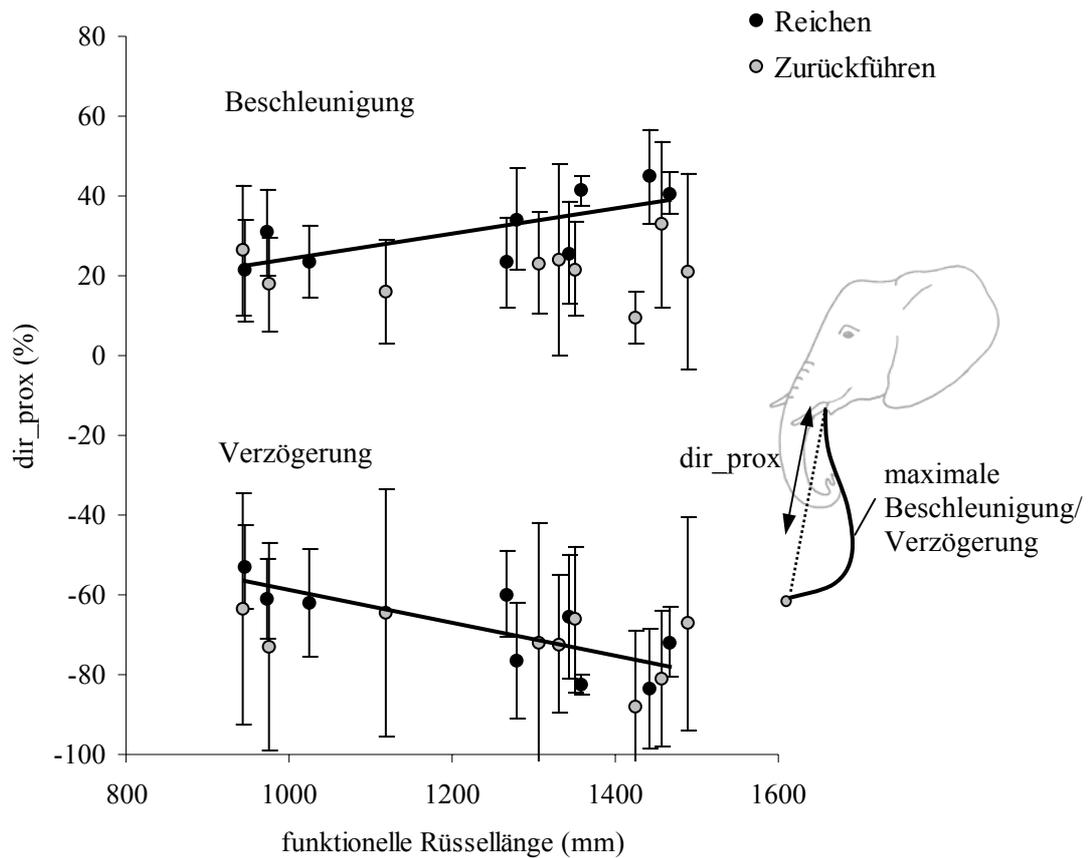


Abb. 1-3.24: Zusammenhang zwischen der Position des Rüsselfingers beim Erreichen der maximalen Beschleunigung bzw. Verzögerung und der funktionellen Rüssellänge. $M \pm SD$ ($N = 90$) der direkten proximalen Bewegungsbahnlänge (dir_prox) in % beim Erreichen der maximalen Beschleunigung (positive Werte) und Verzögerung (negative Werte) als Funktion der funktionellen Rüssellänge in mm beim Reichen und Zurückführen. Die Regressionsgeraden geben die mit zunehmender Rüssellänge beim Reichen weiter distal erreichte Maximalbeschleunigung ($R^2 = 0,5043$, $p = 0,032$) und Maximalverzögerung ($R^2 = 0,5812$, $p = 0,017$) an.

3.5.3 Einfluss der funktionellen Rüssellänge auf die Beschleunigungen und Verzögerungen (Zusammenfassung)

Beschleunigungen und Verzögerungen beim Reichen und Zurückführen wurden unterschiedlich von der funktionellen Rüssellänge beeinflusst (Abb. I-3.25).

Während das Erreichen der maximalen Beschleunigung und Verzögerung beim Reichen unabhängig von der Rüssellänge immer im gleichen Bereich der Bewegungsbahn stattfand, veränderte sich das Auftreten der Geschwindigkeitsveränderung beim Zurückführen proportional zur funktionellen Rüssellänge. Beschleunigung und Verzögerung beider Bewegungen waren folglich an die Amplituden der Bewegung gekoppelt.

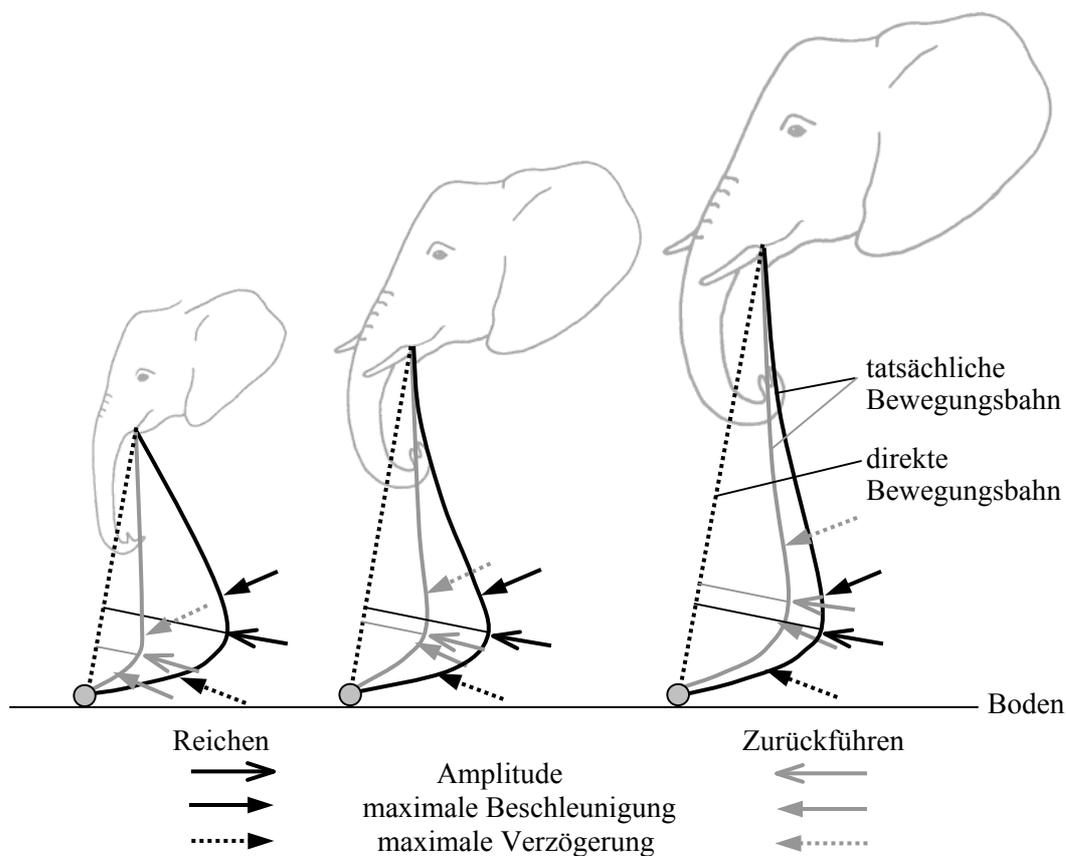


Abb. I-3.25: Schematische Darstellung des Erreichens der Beschleunigungsparameter bei verschiedenen funktionellen Rüssellängen. Beim Reichen (schwarz) werden Maximalbeschleunigung und -verzögerung unabhängig von der funktionellen Rüssellänge im gleichen Bereich der tatsächlichen Bewegungsbahn erreicht. Beim Zurückführen (grau) verändert sich die Position des dorsalen Rüsselfingers proportional zur funktionellen Rüssellänge. Beschleunigung und Verzögerung beider Bewegungen richten sich nach der Lage der Amplitude.

3.6 Die Apertur der Rüsselhand beim Reichen

Die Apertur der Rüsselhand als Abstand zwischen dorsalem und ventralem Rüsselfinger veränderte sich im Verlauf des Reichens in engem Zusammenhang mit der Geschwindigkeit.

3.6.1 Profil der Apertur

Die Veränderungen der Apertur beim Reichen (Abb. I-3.26) zeigten nach $48,22 \pm 13,41 \%$ ($N = 90$) der Bewegungszeit ein Minimum und nach $90,17 \pm 5,34 \%$ ($N = 90$) ein Maximum. Das Minimum der Apertur trat innerhalb eines signifikant variableren Zeitbereichs auf ($V = 0,42 \pm 0,27$) als das Maximum ($V = 0,13 \pm 0,10$) ($T_{df=8} = 4,455$, $p = 0,002$).

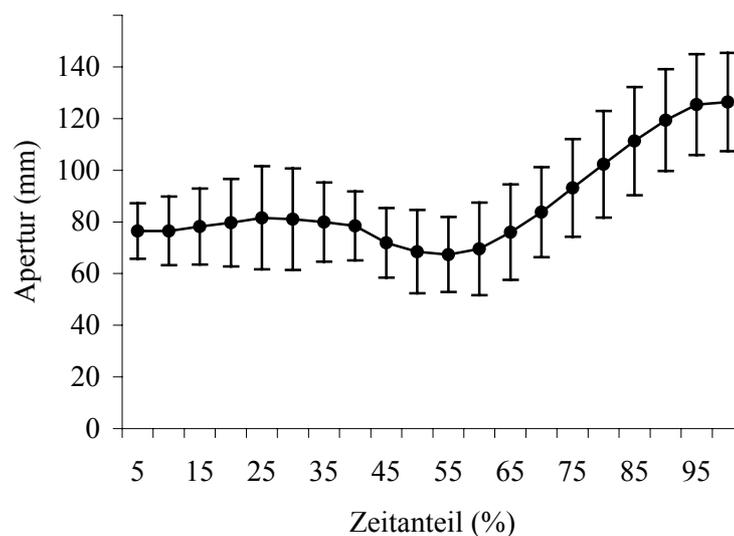


Abb. I-3.26: Aperturprofil der Rüsselhand. $M \pm SD$ ($N = 90$) in mm des Abstandes zwischen dorsalem und ventralem Rüsselfinger als Funktion des prozentualen Zeitanteils beim Reichen.

3.6.2 Maximale Apertur

3.6.2.1 Betrag der maximalen Apertur

Für die maximale Apertur wurden Werte zwischen 167,61 mm und 27,92 mm gemessen ($M \pm SD = 135,17 \pm 20,40$ mm; $N = 90$), wobei sich ein Variationskoeffizient von $V = 0,12 \pm 0,07$ ergab.

Die maximale Apertur unterschied sich nicht zwischen den Altersgruppen.

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Die maximale Apertur korrelierte nicht mit der funktionellen Rüssellänge (Regressionsanalyse, ns).

3.6.2.2 Erreichen der maximalen Apertur

Die maximale Apertur wurde am Ende der Bewegungsbahn des Rüsselfingers erreicht (Tabelle I-3.19). Dies entsprach einer Dauer von $0,40 \pm 0,06$ s. Die Schwankungen der prozentualen Anteile der tatsächlichen Bewegungsbahn waren um die Hälfte geringer als die der prozentualen Zeitanteile ($T_{df=8} = 2,473$, $p = 0,039$). Daher ist anzunehmen, dass die zurückzulegende Distanz, nicht jedoch die Bewegungszeit der bestimmende Faktor für die Öffnung der Apertur ist.

Tabelle I-3.19: Position des dorsalen Rüsselfingers beim Erreichen der maximalen Apertur. $M \pm SD$ ($N = 90$) der Messwerte (M) und Variationskoeffizienten (V) der prozentualen Bewegungszeit (MT), des Streckenanteils der direkten (dir_prox) und der tatsächlichen Bewegungsbahn ($tats_prox$) beim Erreichen der maximalen Apertur

statistische Kennwerte	Parameter	Reichen
M (%)	MT	$90,17 \pm 5,34$
	dir_prox	$91,40 \pm 4,49$
	tats_prox	$96,68 \pm 2,93$
V	MT	$0,13 \pm 0,10$
	dir_prox	$0,10 \pm 0,06$
	tats_prox	$0,06 \pm 0,06$

Einfluss der funktionellen Rüssellänge

Die Strecken-, Weg- und Zeitanteile beim Erreichen der maximalen Apertur standen in keinem Zusammenhang mit der funktionellen Rüssellänge (Regressionsanalyse, ns).

3.6.3 Zusammenhang zwischen Apertur und Geschwindigkeit

Die Änderungen der Apertur waren eng mit der Geschwindigkeit des dorsalen Rüsselfingers gekoppelt (Abb. I-3.27). Bis zur maximalen Geschwindigkeit verringerte sich die Apertur. Mit dem Erreichen der maximalen Geschwindigkeit begann sich die Rüsselhand zu öffnen.

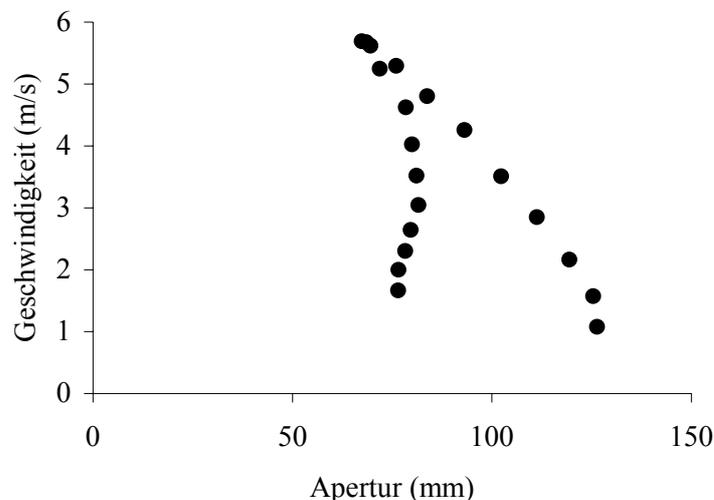


Abb. I-3.27: Zusammenhang zwischen Apertur und Geschwindigkeit beim Reichen. Jeder Datenpunkt repräsentiert die Geschwindigkeit in m/s des dorsalen Rüsselfingers und die Apertur in mm innerhalb eines Zeitabschnitts von jeweils 5 % des Reichens. Die Punkte repräsentieren Mittelwerte über $N = 90$.

3.7 Approximative Berechnung der Kräfte

Die Differenz der vom distalen Segment von hinten und der vom proximalen Segment von vorne auf die Senkrechte ausgeübten Kräfte während des Reichens und Zurückführens zeigt, dass die auf den Massenschwerpunkt im mittleren Segment einwirkende Kraft mit maximal $20,65 \pm 15,28$ N zu vernachlässigen ist bzw. im Bereich der hohen Fehlertoleranz liegt (Abb. I-3.28). Bis auf den Zeitpunkt zu Beginn des Reichens überwiegen die vom proximalen Segment auf die Senkrechte ausgeübten Kräfte jene des distalen Segments. Die höheren Standardabweichungen der Kraftdifferenzen beim Reichen lassen sich auf die verschiedenen Auslenkungen des Rüssels zum Erreichen der verteilt liegenden Objekte zurückführen.

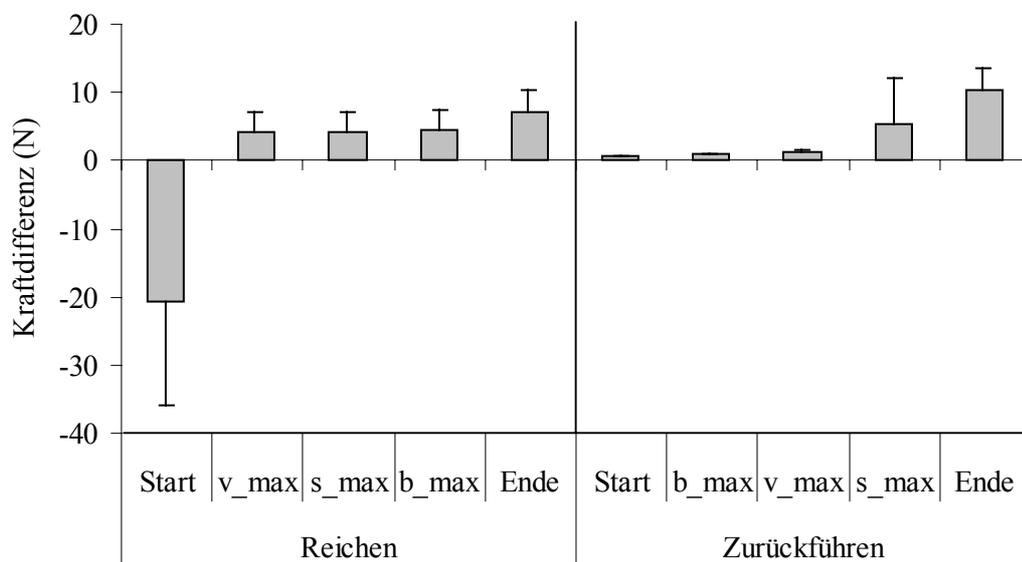


Abb. I-3.28: Kraftdifferenzen zwischen proximalem und distalem funktionellen Segment in fünf Phasen des Reichens und Zurückführens. $M \pm SD$ ($N = 70$) der Differenz zwischen der von vorne auf die Senkrechte ausgeübten Kräfte des proximalen Segments und der von hinten auf die Senkrechte ausgeübten Kräfte des distalen Segments zu fünf Zeitpunkten beim Reichen und Zurückführen. Bei negativen Werten überwiegt die Kraft des proximalen, bei positiven Werten die des distalen Segments. Start = Beginn der Bewegung; v_max = Erreichen der maximalen Geschwindigkeit des Rüsselfingers; s_max = Erreichen des maximalen Abstandes des Rüsselfingers zur Senkrechten; b_max = Erreichen der maximalen Amplitude des Rüsselfingers; Ende = Ziel der Bewegung.