

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in fünf Kapiteln dargelegt. In Kapitel 3.1 wird die Bewegung des Greifschwanzes beim Hangeln beschrieben. Kapitel 3.2 stellt die Quantifizierung der Bewegungsbahnen jeder einzelnen Markierung dar. Die Dauer der Bewegungen wird in Kapitel 3.3, die Geschwindigkeiten in Kapitel 3.4 und die Beschleunigungen bzw. Verzögerungen in Kapitel 3.5 behandelt.

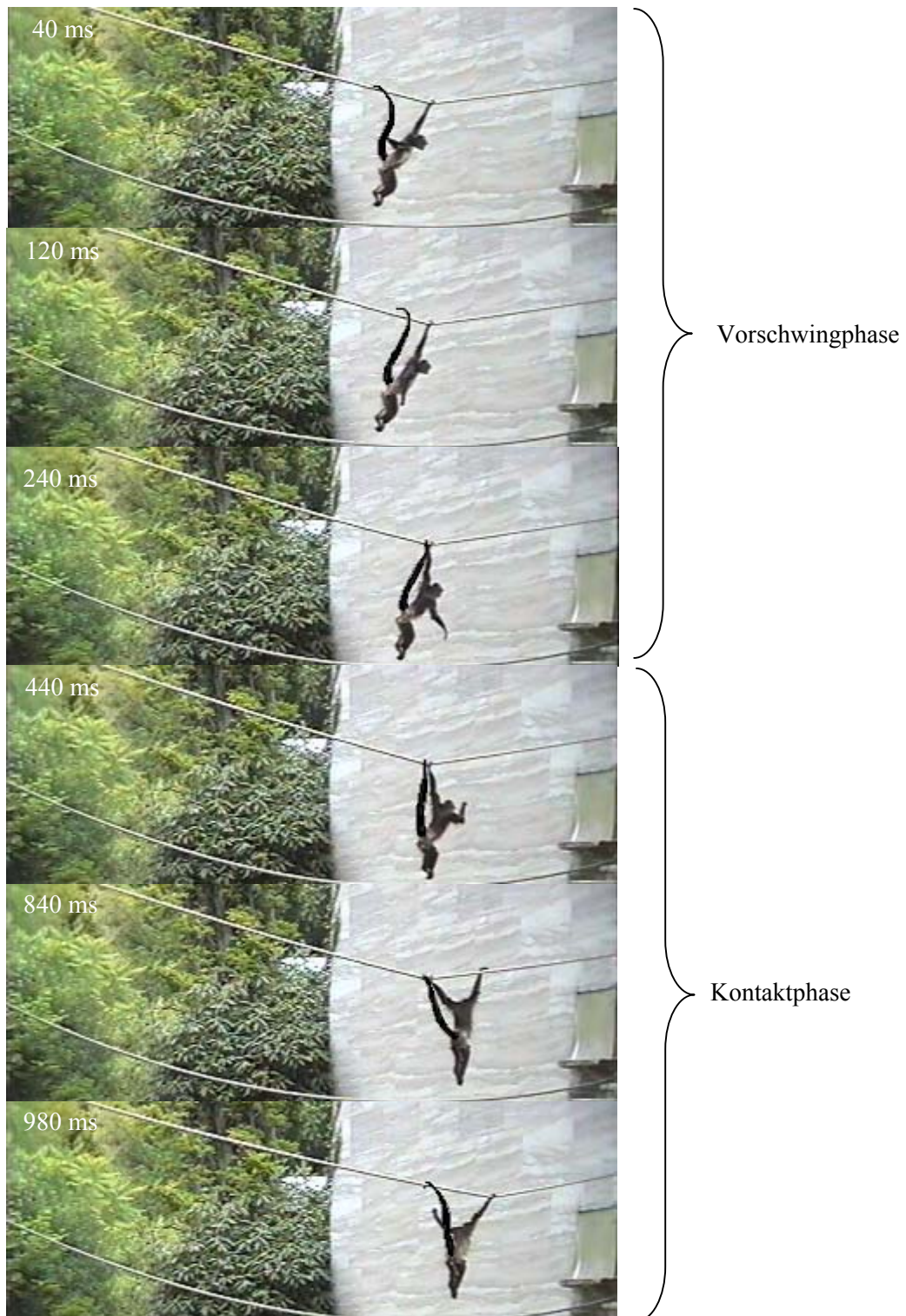
3.1 Bewegungen des Greifschwanzes

3.1.1 Qualitative Beschreibung der Greifschwanzbewegungen

Die Bewegungsabfolge des Greifschwanzes beim Hangeln, exemplarisch in Abb. II-3.1 abgebildet, konnte durch Projektion der drei Markierungen auf die Sagittal-, Frontal- und Horizontalebene schematisiert dargestellt werden (Abb. II-3.2 a bis c). Deutlich ist der Unterschied zwischen einer Kontakt- und einer Vorschwingphase zu sehen. Während der Kontaktphase schwang der Greifschwanz pendelähnlich mit der Schwanzbasis als Massepunkt um die Schwanzspitze als Aufhängepunkt am Seil von hinten nach vorne. Mit seiner Basis war der Greifschwanz dabei an die Pendelbewegung des Rumpfes um die Hand am Seil als Drehpunkt gekoppelt. Die vertikalen Verschiebungen des Aufhängepunktes ergaben sich aus den Biegungen des Seiles. Im Verlauf der Kontaktphase kam es zu einem Handwechsel. Gegen Ende der Kontaktphase krümmte sich der Schwanz durch Verschiebung der Schwanzmitte nach vorne und zur Seite, wodurch sich eine Biegestelle bildete. Diese diente als funktionelles Gelenk zwischen einem distalen funktionellen Segment (zwischen distaler und proximaler Markierung) mit einem proximalen funktionellen Segment (zwischen proximaler und sacraler Markierung). Dadurch entstand ein doppeltes Pendel mit dem proximalen funktionellen Segment als ein Pendel um die Schwanzbasis und dem distalen funktionellen Segment als einem weiteren Pendel um das funktionelle Gelenk. Mit der Verschiebung der Biegestelle wurde die Schwanzbasis nach hinten und oben gezogen. Die Greiffläche glitt über dem Substrat entlang, bevor sie sich davon löste und die Vorschwingphase einleitete.

In der Vorschwingphase wurde der gesamte Greifschwanz infolge der Pendelbewegung des Rumpfes um die Hand in Bewegungsrichtung transportiert. Gleichzeitig verhielten sich das distale und proximale funktionelle Segment als inverses doppeltes Pendel. Das proximale Segment pendelte um die Schwanzbasis nach vorne, während das distale funktionelle Segment gleichzeitig um die proximale Markierung als Biegestelle und damit funktionelles

Gelenk in Fortbewegungsrichtung geschwungen wurde. Dies hatte eine Streckung des Schwanzes als Überleitung in die nächste Kontaktphase zur Folge.



*Abb. II-3.1 Greifschwanzbewegungen beim Hangeln von *Ateles geoffroyi*. Exemplarische Abfolge einer Vorschwing- und Kontaktphase des Greifschwanzes.*

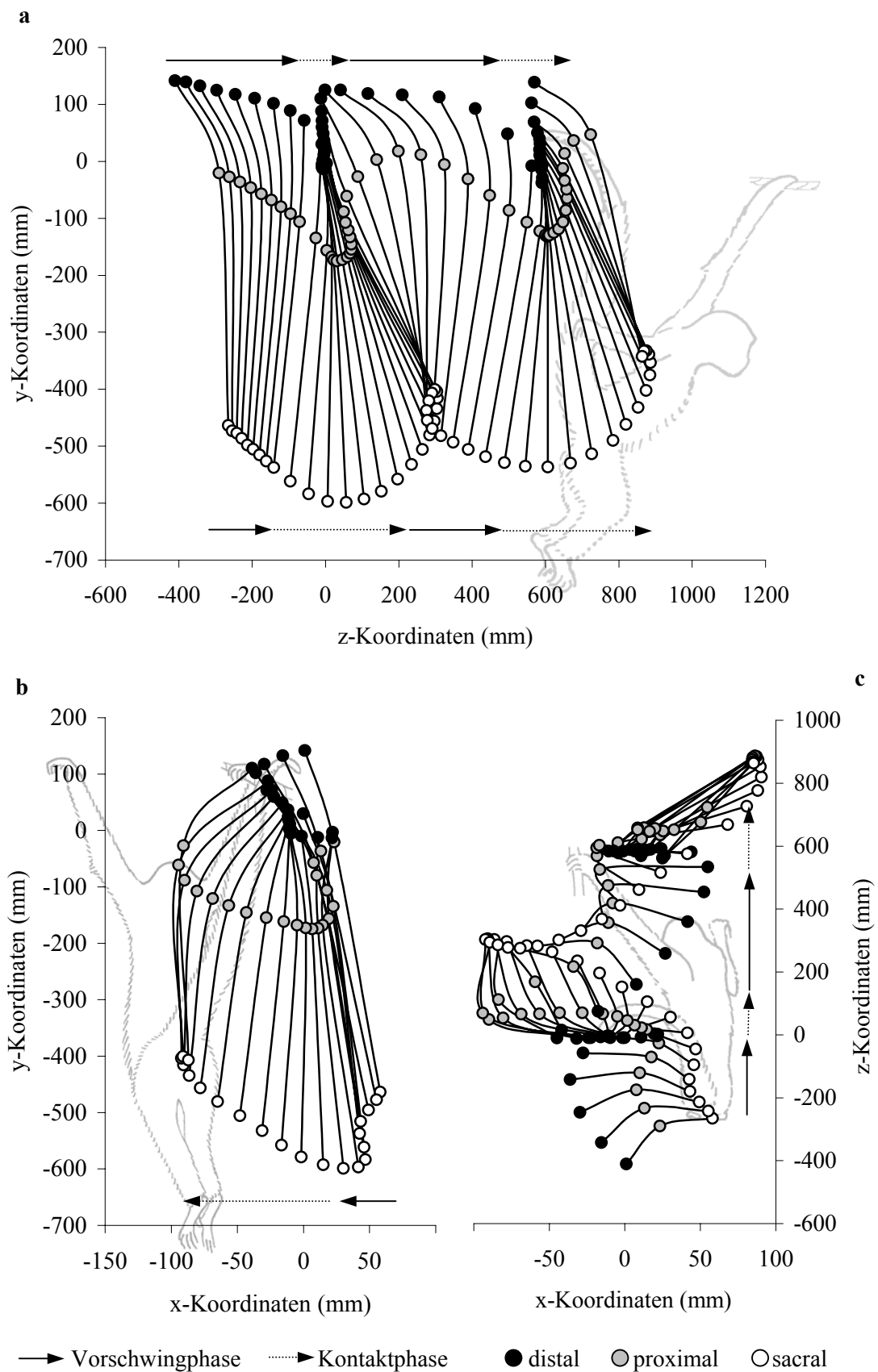


Abb. II-3.2: Raumnutzung des Greifschwanzes. Projektionen der distalen, proximalen und sacralen Schwanzmarkierung alle 40 ms auf (a) die Sagittalebene, (b) die Frontalebene und (c) die Horizontalebene exemplarisch für „Apura“ während zwei aufeinander folgender Vorschwing- und Kontaktphasen. Bei der Projektion auf die Frontalebene ist nur jeweils eine Phase dargestellt. Die Verbindungen zwischen den Markierungen entsprechen dem distalen und proximalen funktionellen Segment. Zur übersichtlicheren Darstellung sind die Skalierungen nicht maßstabsgerecht.

3.1.2 Biegsamkeit des Greifschwanzes

Mit einer Vielzahl an gelenkig miteinander verbundenen Wirbeln ausgestattet verfügt der Greifschwanz über eine hohe Biegsamkeit, die sich zwischen dem proximalen und distalen funktionellen Segment unterschied. Sowohl in der Vorschwing- als auch in der Kontaktphase blieben die Abstände zwischen Schwanzbasis und -mitte annähernd konstant bei $42,47 \pm 1,63$ cm (Abb. II-3.3). Demgegenüber variierten die Distanzen zwischen Schwanzbasis und -spitze um etwa 7,5 cm. Die Verringerung der Distanz zwischen Schwanzspitze und -basis um etwa 4 cm während der Vorschwingphase zeigt, dass das Schwanzende abknickte, um als Haken über das Seil geführt zu werden. Infolge des Umschlagens der Greiffläche um das Substrat zu Beginn der Kontaktphase verringerte sich die Distanz zwischen Aufhängung und Schwanzbasis auf $56,1 \pm 2,0$ cm. Im Verlauf der Kontaktphase nahm der Abstand zu, da sich der Griff um das Substrat auf den distalen Bereich der Greiffläche beschränkte und der Schwanz unter Zugkraft gestreckt wurde. Am Ende der Kontakt- und zu Beginn der Vorschwingphase erreichte die Schwanzspitze ihren maximalen Abstand von $63,6 \pm 2,9$ cm zur Schwanzbasis. Während das proximale Segment bereits vorzuschwingen begann, blieb der Kontakt der Greiffläche mit dem Substrat erhalten. Das distale funktionelle Segment bleibt folglich beweglich zur Ausübung der Greiffunktion, während das proximale funktionelle Segment relativ starr die Aufgabe des Greifschwanztransports in Bewegungsrichtung übernimmt.

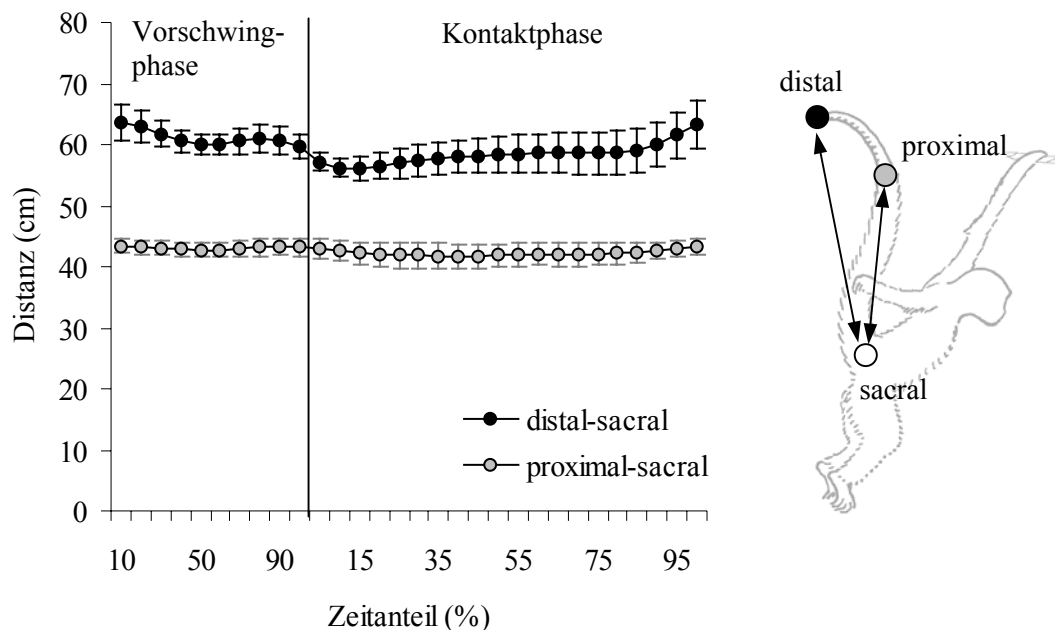


Abb. II-3.3: Biegsamkeit des Greifschwanzes. $M \pm SD$ ($N = 40$) in mm der Distanzen distal-sacral und proximal-sacral zwischen Schwanzspitze (distal) bzw. Schwanzmitte (proximal) und Schwanzbasis (sacral) als Funktion des prozentualen Zeitanteils während der Vorschwing- und Kontaktphase.

3.1.3 Winkel der Auslenkungen in der Sagittal- und Frontalebene

3.1.3.1 Gesamtwinkel der Auslenkungen

Abb. II-3.4 zeigt, dass sowohl das proximale (ps) mit $32,15 \pm 9,49^\circ$ als auch das distale Segment (dp) mit $60,22 \pm 13,38^\circ$ und der gesamte Greifschwanz von der Schwanzbasis zur –spitze (ds) mit $40,84 \pm 9,22^\circ$ in der Vorschwingphase signifikant weiter in Bewegungsrichtung als frontal mit $8,45 \pm 4,26^\circ$ (ps), $28,65 \pm 12,31^\circ$ (dp) bzw. $9,43 \pm 3,69^\circ$ (ds) ausgelenkt wurden ($T_{df=3} = 15,304$, $p = 0,001$ für ps; $T_{df=3} = 27,79$, $p = 0,000$ für dp; $T_{df=3} = 18,28$, $p = 0,000$ für ds). Das distale Segment wurde im Vergleich zum proximalen Segment signifikant weiter sowohl frontal ($T_{df=3} = 6,165$, $p = 0,009$) als auch in Bewegungsrichtung ausgelenkt ($T_{df=3} = 7,326$, $p = 0,005$). Während sich das proximale Segment nur in seinen sagittal signifikant geringeren Auslenkungen von der Auslenkung des gesamten Greifschwanzes (ds) unterschied ($T_{df=3} = 8,840$, $p = 0,003$), waren sowohl die frontalen ($T_{df=3} = 9,349$, $p = 0,003$) als auch die sagittalen Auslenkungen ($T_{df=3} = 6,614$, $p = 0,007$) des distalen Segments signifikant größer als die des gesamten Greifschwanzes.

In der Kontaktphase waren die sagittalen Auslenkungen aller funktioneller Segmente ebenfalls mit $49,90 \pm 10,18^\circ$ (ps), $58,79 \pm 16,61^\circ$ (dp) bzw. $49,99 \pm 10,97^\circ$ (ds) signifikant größer als die Auslenkungen in der Frontalebene mit $12,61 \pm 5,59^\circ$ (ps), $31,34 \pm 13,87^\circ$ (dp) bzw. $13,56 \pm 5,07^\circ$ (ds) ($T_{df=3} = 53,343$, $p = 0,000$ für ps; $T_{df=3} = 7,295$, $p = 0,005$ für dp; $T_{df=3} = 28,836$, $p = 0,000$ für ds). Nur das distale Segment unterschied sich mit einer signifikant größeren frontal gerichteten Auslenkung vom proximalen Segment ($T_{df=3} = 9,375$, $p = 0,003$) und vom gesamten Greifschwanz ($T_{df=3} = 12,329$, $p = 0,001$). Die sagittalen Auslenkungen blieben nahezu gleich groß.

Beim Vergleich der Winkel zwischen Vorschwing- und Kontaktphase traten kaum Unterschiede auf. Die frontalen und sagittalen Auslenkungen des proximalen Segments erwiesen sich als signifikant größer in der Kontakt- als in der Vorschwingphase ($T_{df=3} = 6,478$, $p = 0,007$ für frontal; $T_{df=3} = 7,423$, $p = 0,005$ für sagittal). Das distale Segment zeigte um 1,2-fach größere sagittale Auslenkungen in der Kontaktphase ($T_{df=3} = 5,088$, $p = 0,015$).

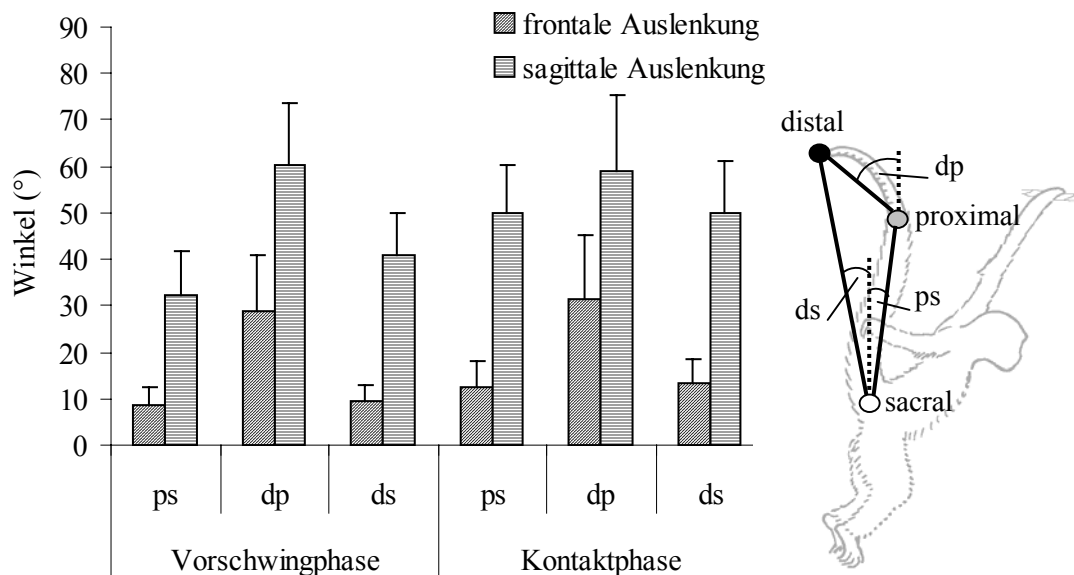


Abb. II-3.4: Frontale und sagittale Auslenkungen der funktionellen Segmente. $M \pm SD$ ($N = 40$) in ° der Winkel des proximalen (ps) und distalen funktionellen Segments (dp) und des gesamten Greifschwanzes (ds) zum Lot innerhalb der Frontal- und Sagittalebene in der Vorschwing- und Kontaktphase.

3.1.3.2 Winkel am Übergang zwischen den Bewegungsphasen

Tabelle II-3.1 zeigt, dass die Auslenkungen des gesamten Greifschwanzes in Bewegungsrichtung am Ende der Kontaktphase signifikant größer waren als die des proximalen funktionellen Segments ($T_{df=3} = 4,23, p = 0,024$). Dies bestätigt die in Kapitel 3.1.1 beschriebene Krümmung des Greifschwanzes in Fortbewegungsrichtung während der zweiten Hälfte der Kontaktphase. Die gleich großen Auslenkungen der beiden funktionellen Segmente zu Beginn der Kontaktphase weisen darauf hin, dass der Greifschwanz sich während der Vorschwingphase streckte.

Tabelle II-3.1: Sagittale Auslenkungen der funktionellen Greifschwanzsegmente in Bewegungsrichtung am Übergang zwischen den Bewegungsphasen. $M \pm SD$ ($N = 40$) in ° der Winkel der sagittalen Auslenkung von gesamtem Greifschwanz und proximalem funktionellem Segment zu Beginn und am Ende der Vorschwing- und Kontaktphase. Negative Winkel zeigen eine Auslenkung der Segmente nach hinten, positive eine nach vorne an

Zeitpunkt	Vorschwingphase		Kontaktphase	
	gesamter Greifschwanz	proximales funktionelles Segment	gesamter Greifschwanz	proximales funktionelles Segment
Beginn (°)	-25,08 ± 2,39	-17,05 ± 3,70	16,82 ± 5,11	16,28 ± 2,22
Ende (°)	14,85 ± 2,18	15,81 ± 1,28	-33,70 ± 5,12	-21,40 ± 4,13

Anhand der Kombinationen der Segmentauslenkungen und Tabelle II-3.1 ließ sich die Mechanik des Greifschwanzes in der Kontaktphase als doppeltes Pendel und in der Vorschwingphase als inverses doppeltes Pendel schematisch rekonstruieren (Abb. II-3.5). Die Bildung eines funktionellen Gelenks an der proximalen Markierung gegen Ende der

Kontaktphase vergrößerte die sagittale Auslenkung des distalen und verkleinerte die des proximalen funktionellen Segments relativ zu einem einfachen Pendel. Dies verringerte umgekehrt die Auslenkung des proximalen funktionellen Segments nach vorne und hinten in der Vorschwingphase.

Die frontalen Auslenkungen nach rechts und links zeigten, dass sich das gesamte proximale funktionelle Segment während der Kontaktphase vom Seil entfernte, um sich während der Vorschwingphase diesem bis zum Anschlag wieder zu nähern.

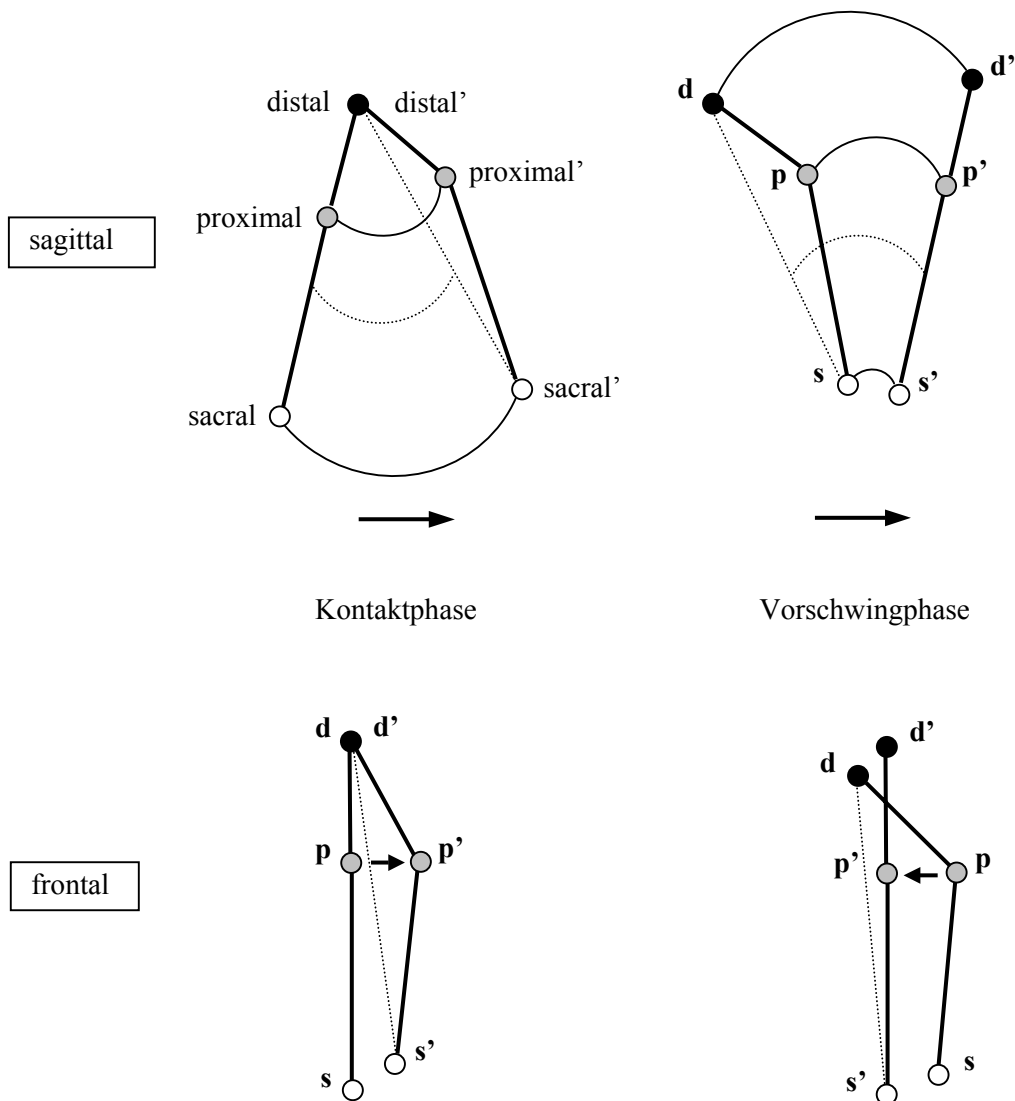


Abb. II-3.5: Schematische Darstellung der Mechanik des Greifschwanzes in der Vorschwing- und Kontaktphase. Sagittale und frontale Auslenkungen des proximalen und distalen funktionellen Segments (durchgezogene Linie) und des gesamten Greifschwanzes (gestrichelte Linie) zwischen den Startpositionen der Markierungen sacral (s), proximal (p) und distal (d) und den Zielpositionen, gekennzeichnet mit d', p' bzw. s'. Die Pfeile geben die Fortbewegungsrichtung an. Das Seil befindet sich jeweils unterhalb der Markierung d.

3.1.3.3 Elongationen und Vertikalabstände im Vergleich zum mathematischen Pendel

Würde sich der Greifschwanz wie ein mathematisches Pendel gleicher Länge bewegen, müssten Elongationen und Vertikalabstand zu Beginn und am Ende der Bewegung gleich groß sein.

Der Greifschwanz zeigte am Ende der Kontaktphase eine signifikant größere Elongation als das mathematische Pendel (Tabelle II-3.2). Die Schwanzbasis wird folglich weiter als erwartet in Fortbewegungsrichtung transportiert ($T_{df=3} = 4,29$, $p = 0,02$). In der Vorschwingphase war die gemessene Elongation umgekehrt signifikant kleiner als die erwartete ($T_{df=3} = 7,35$, $p = 0,01$). Die Schwanzspitze wird geringfügiger als erwartet nach vorne transportiert. Am Ende der Kontaktphase erwies sich der gemessene Vertikalabstand der Schwanzbasis zum Aufhängepunkt als kürzer gegenüber dem bei einem mathematischen Pendel erwarteten Wert. Demzufolge wird die Schwanzbasis um etwa 3 cm angehoben. Die vertikalen Unterschiede während der Vorschwingphase blieben belanglos.

Tabelle II-3.2: Erwartete und gemessene Elongationen und Vertikalabstände. $M \pm SD$ ($N = 40$) in m des horizontalen Abstandes (Elongation) und des vertikalen Abstandes (Vertikalabstand) der Schwanzspitze in der Vorschwingphase bzw. der Schwanzbasis in der Kontaktphase vom Aufhängepunkt

Bewegungsphase	Parameter	erwartet	gemessen
Vorschwingphase	Elongation (m)	$0,14 \pm 0,01^{**}$	$0,08 \pm 0,01^{**}$
	Vertikalabstand (m)	$0,29 \pm 0,01$	$0,28 \pm 0,01$
Kontaktphase	Elongation (m)	$0,17 \pm 0,06^*$	$0,35 \pm 0,05^*$
	Vertikalabstand (m)	$0,56 \pm 0,02$	$0,53 \pm 0,05$

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

3.2 Bewegungsbahnen der Greifschwanzmarkierungen

Da sich die Richtungen der Fortbewegungsachsen aufgrund der Pendelbewegungen des Rumpfes und der Seilelastizität verschoben, wurden die Bewegungsbahnen der Markierungen auf deren Strecke zwischen Start- und Zielposition, hier „direkte Bewegungsbahn“ genannt, bezogen. Die berechneten tatsächlichen Bewegungsbahnen ließen anhand ihrer Form auf unterschiedliche Raumnutzungen der einzelnen Schwanzabschnitte schließen.

3.2.1 Eigenschaften der Bewegungsbahnen

3.2.1.1 Länge der Bewegungsbahnen

Die Länge der Bewegungsbahnen unterschied sich bei jeder der Schwanzmarkierungen zwischen den Kontakt- und Vorschwingphasen.

Abb. II-3.6 zeigt, dass die Schwanzbasis mit $66,87 \pm 5,93$ cm in der Kontaktphase dem Pendelmechanismus zufolge signifikant längere Bewegungsbahnen zurücklegte als in der Vorschwingphase mit $7,74 \pm 1,78$ cm ($T_{df=3} = 11,035$, $p = 0,002$). Die, wenn auch kurzen, Bewegungsbahnen der Schwanzbasis in der Vorschwingphase ergaben sich aus der Pendelbewegung des Rumpfes um die Hand. Die Schwanzspitze zeigte mit $65,01 \pm 6,45$ cm signifikant längere Bewegungsbahnen in der Vorschwingphase verglichen mit $22,73 \pm 1,89$ cm in der Kontaktphase ($T_{df=3} = 18,375$, $p = 0,000$). Der kurze Weg, den die Schwanzspitze trotz ihrer Funktion als Aufhängepunkt des Greifschwanzes am Substrat in der Kontaktphase zurücklegte, kann auf die Schwankungen des Substrates innerhalb der Frontalebene zurückgeführt werden. Für die Schwanzmitte wurden in der Vorschwingphase mit $38,57 \pm 3,23$ cm im Vergleich zur Kontaktphase mit $46,15 \pm 2,11$ cm signifikant längere Bewegungsbahnen gemessen ($T_{df=3} = 6,527$, $p = 0,007$).

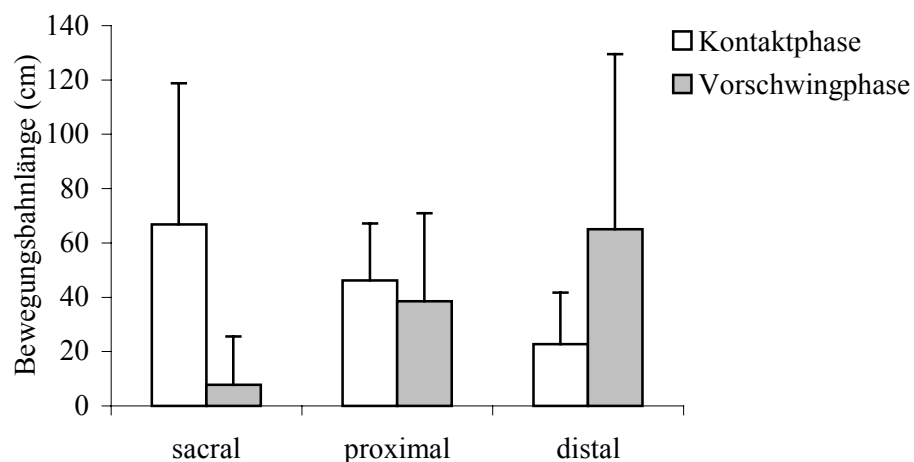


Abb. II-3.6: Länge der tatsächlichen Bewegungsbahnen. $M \pm SD$ ($N = 40$) in cm der Bewegungsbahnlänge von Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) in der Vorschwing- und Kontaktphase.

3.2.1.2 Verhältnis zwischen den Bewegungsbahnlängen innerhalb der Frontalebene und in Fortbewegungsrichtung

Der Index f/l als Verhältnis zwischen den Längen der innerhalb der Frontalebene und entlang der Fortbewegungsrichtung zurückgelegten Bewegungsbahnen unterschied sich zwischen den Schwanzmarkierungen und den Bewegungsphasen (Tab. II-3.3).

In der Vorschwingphase zeigte die Schwanzbasis einen signifikant größeren Index f/l als die Schwanzmitte ($T_{df=3} = 11,621$, $p = 0,001$) und die Schwanzspitze ($T_{df=3} = 5,901$, $p = 0,01$). Bei der Schwanzbasis blieben die Indices f/l zwischen Vorschwing- und Kontaktphase konstant (t-Test, ns), während sie bei der Schwanzmitte um das 4-fache und bei der Schwanzspitze um das Doppelte zunahmen ($T_{df=3} = 9,3$, $p = 0,003$ bei p; $T_{df=3} = 7,128$, $p = 0,006$ bei d). Die Schwanzbasis passte sich den Pendelbewegungen des Rumpfes um die Hand am oszillierenden Seil an, während Schwanzmitte und -spitze sich unabhängig davon auf die Fortbewegungsrichtung konzentrieren konnten.

In der Kontaktphase richtete sich die Schwanzbasis relativ zu den distal gelegenen Schwanzmarkierungen eher auf die Fortbewegungsrichtung aus. Der Index f/l der Schwanzspitze war um das 5-fache größer als jener der Schwanzmitte ($T_{df=3} = 6,369$, $p = 0,008$) und um das 8-fache als jener der Schwanzbasis ($T_{df=3} = 6,929$, $p = 0,006$). Die Schwankungen des Seiles innerhalb der Frontalebene machten sich bei der das Seil umgreifenden Schwanzspitze aufgrund der geringen Longitudinalanteile des Weges umso deutlicher bemerkbar. Der Index der Schwanzmitte erwies sich als doppelt so hoch wie jener der Schwanzbasis ($T_{df=3} = 12,780$, $p = 0,001$).

In der Vorschwingphase vermochte sich der Greifschwanz ungeachtet der Schwankungen seiner Basis innerhalb der Frontalebene zielgerichtet longitudinal auszurichten, während er sich in der Kontaktphase den Bewegungen der Schwanzbasis innerhalb der Frontalebene anpasste. Die Schwanzbasis hingegen gehorchte in beiden Phasen den Pendelprinzipien, die eine gleichmäßige Oszillation mit gleichen Weganteilen erforderte.

Tabelle II-3.3: Index f/l der Bewegungsbahnlängen. $M \pm SD$ ($N = 40$) des Verhältnisses zwischen den Längen der innerhalb der Frontalebene (f) und in der Bewegungsrichtung (l) zurückgelegten Bewegungsbahnen der Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) in der Vorschwing- und Kontaktphase.

Markierung	Index f/l	
	Vorschwingphase	Kontaktphase
sacral	$0,66 \pm 0,07$	$0,63 \pm 0,15$
proximal	$0,29 \pm 0,05^{**}$	$1,12 \pm 0,19^{**}$
distal	$0,32 \pm 0,05^{**}$	$5,55 \pm 1,51^{**}$

** : $p < 0,001$

3.2.1.3 Krümmung der Bewegungsbahnen

Die Krümmungen der Bewegungsbahnen unterschieden sich zwischen der Kontakt- und Vorschwingphase. Die Bewegungsbahnen der einzelnen Markierungen krümmten sich nur in der Kontaktphase unterschiedlich stark.

Anhand des Index der Krümmung (IC) und des Linearitätsindex (LI) in der Vorschwingphase ist abzulesen (Tab. II-3.4), dass die tatsächliche Bewegungsbahn der Schwanzspitze am meisten und die der Schwanzmitte am wenigsten gekrümmt war. Die Unterschiede erwiesen sich aber nur beim Linearitätsindex zwischen Schwanzspitze und -basis als signifikant ($T_{df=3} = 5,269$, $p = 0,013$).

In der Kontaktphase hingegen krümmte sich die Bewegungsbahn der Schwanzspitze signifikant stärker im Vergleich zur Schwanzmitte ($T_{df=3} = 3,322$, $p = 0,045$ für IC; $T_{df=3} = 3,919$, $p = 0,03$ für LI) und Schwanzbasis ($T_{df=3} = 3,971$, $p = 0,029$ für IC; $T_{df=3} = 5,337$, $p = 0,013$ für LI). Dies ist auf die Beweglichkeit des Seiles zurückzuführen. Die Bewegungsbahnen der Schwanzmitte waren signifikant stärker gekrümmt als die der Schwanzbasis ($T_{df=3} = 8,357$, $p = 0,004$ für IC; $T_{df=3} = 13,288$, $p = 0,001$ für LI).

In der Kontaktphase krümmten sich die Bewegungsbahnen aller Markierungen signifikant stärker als in der Vorschwingphase, wie anhand des größeren Index der Krümmung ($T_{df=3} = 9,059$, $p = 0,003$ für s; $T_{df=3} = 10,645$, $p = 0,002$ für p; $T_{df=3} = 5,405$, $p = 0,012$ für d) und des Linearitätsindex ($T_{df=3} = 3,264$, $p = 0,047$ für s; $T_{df=3} = 10,083$, $p = 0,002$ für p; $T_{df=3} = 5,374$, $p = 0,013$ für d) erkennbar ist.

Die unterschiedlichen Krümmungen der Bewegungsbahnen bestätigen die Mechanik des doppelten Pendels in der Kontakt- und des inversen doppelten Pendels in der Vorschwingphase.

Tabelle II-3.4: Krümmungen der tatsächlichen Bewegungsbahnen. $M \pm SD$ ($N = 40$) des Index der Krümmung (Länge der direkten Bewegungsbahn / Länge der Bewegungsbahn) und des Linearitätsindex (Amplitude / Länge der direkten Bewegungsbahn) für die Bewegungsbahnen der Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) in der Kontakt- und Vorschwingphase

Markierung	Index der Krümmung		Linearitätsindex	
	Vorschwing-Phase	Kontakt-phase	Vorschwing-phase	Kontakt-phase
sacral	1,08 \pm 0,05**	1,29 \pm 0,17**	0,07 \pm 0,05*	0,19 \pm 0,06*
proximal	1,08 \pm 0,04**	1,59 \pm 0,24**	0,06 \pm 0,03**	0,36 \pm 0,14**
distal	1,09 \pm 0,04*	2,41 \pm 0,89*	0,11 \pm 0,03*	0,65 \pm 0,34*

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

3.2.2 Tatsächliche Bewegungsbahnen der Greifschwanzmarkierungen

Die Bewegungsbahnen der Markierungen verliefen in der Vorschwingphase nach oben und in der Kontaktphase nach unten. Ihre Formen unterschieden sich sowohl zwischen den Markierungen, als auch zwischen den jeweiligen Bewegungsphasen.

In der Vorschwingphase zeigten sich die Bewegungsbahnen aller Schwanzmarkierungen als symmetrisch glockenförmig, wobei die der Schwanzspitze besonders hoch verlief (Abb. II-3.7). Die Schwanzbasis als caudales Ende des Rumpfes folgte dessen Bewegungsbahn um die Hand als Drehpunkt am Seil. Die Bewegungsbahn der Schwanzmitte entsprach ihrer inversen Pendelbewegung um die Schwanzbasis, die der Schwanzspitze einem peitschenartigen Schlagen um die Schwanzmitte als funktionelles Gelenk bzw. Biegestelle.

In der Kontaktphase zeigten die tatsächlichen Bewegungsbahnen der Markierungen ein nach links relativ zum Zeitanteil von 50 % verschobenes Maximum, welches zuerst von der Schwanzbasis nach $39,2 \pm 7,1$ %, gefolgt von der Schwanzmitte nach $43,1 \pm 2,8$ % und zuletzt von der Schwanzspitze nach $49,1 \pm 7,2$ % der Bewegungszeit erreicht wurde. Die unerwarteten Bewegungen der Schwanzspitze als Aufhängepunkt des Pendels sind auf die Substratbewegungen zurückzuführen sowie auf Bewegungen des distalen Schwanzbereichs in Reaktion auf das sich bewegende Substrat. Schwanzbasis und -mitte zeigten nahezu deckungsgleiche Bewegungsbahnen. Die Pendelbewegungen zu Beginn der Kontaktphase wurden infolge der Schulterbildung im zweiten Drittel der Bewegungsbahn, welche die Abweichungen der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn bereits frühzeitig um etwa 20 mm verringerte, modifiziert. Die Form der Bewegungsbahnen erwies sich als asymmetrisch.

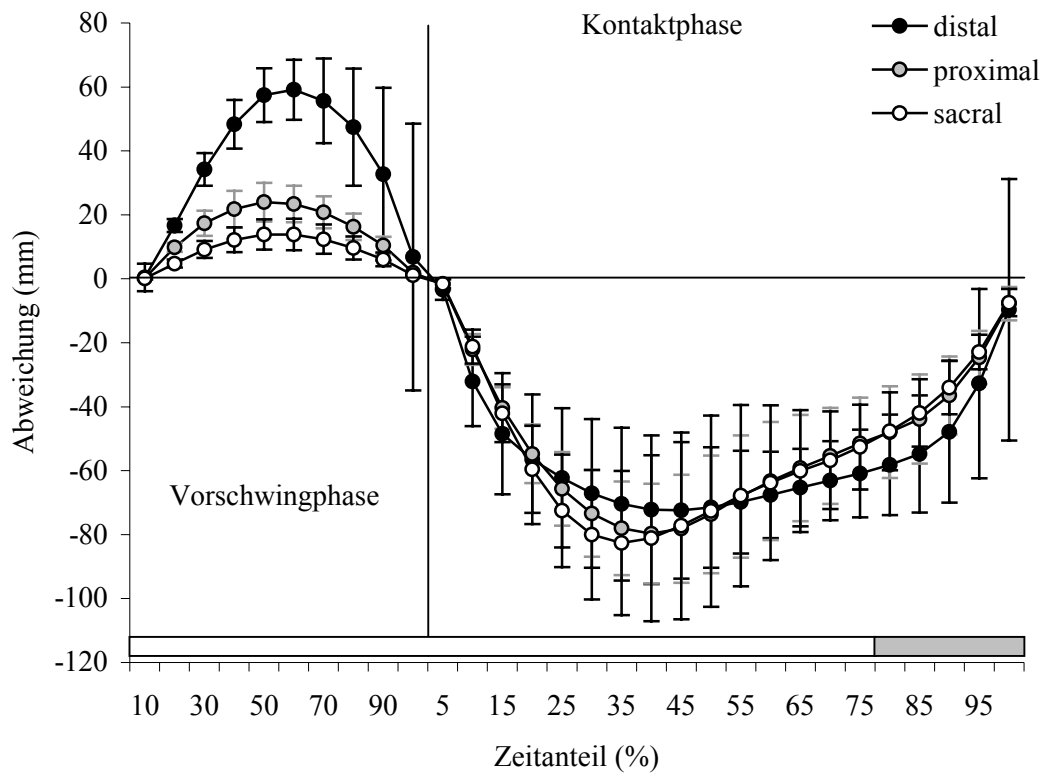


Abb. II-3.7: Tatsächliche Bewegungsbahnen der Greifschwanzmarkierungen. $M \pm SD$ ($N = 40$) in mm der Abweichungen der Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) von der direkten Bewegungsbahn (Strecke zwischen Start und Ziel der Bewegung) als Funktion des prozentualen Zeitanteils in der Vorschwing- und Kontaktphase. Die beiden Bewegungsphasen wurden aneinandergereiht. Abweichungen der Schwanzspitze in der Kontaktphase beruhen auf der Beweglichkeit des Seiles. Die Balken symbolisieren die Hände auf dem Substrat, wobei der Farbwechsel den Handwechsel anzeigt.

Die multiple lineare Regressionsanalyse ergab geringe Varianzen der Bewegungsbahnen aller Markierungen, sowohl in der Vorschwing- als auch in der Kontaktphase (Tab. II-3.5). In der Vorschwingphase waren die Bewegungsbahnen der Schwanzspitze signifikant besser zu reproduzieren als die der Schwanzbasis ($T_{df=3} = 6,071$, $p = 0,009$). Die hohen SD der Schwanzmitte in der Vorschwingphase resultierten aus individuellen Unterschieden in der Form der Bewegungsbahn.

Tabelle II-3.5: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse für die Bewegungsbahnen. $M \pm SD$ ($N = 40$) des Übereinstimmungsmaßes R^2 sowie F-Wert und Irrtumswahrscheinlichkeit für die Bewegungsbahnen der Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) in der Vorschwing- und Kontaktphase

Markierungen	Parameter	Vorschwingphase	Kontaktphase
sacral	Bestimmtheitsmaß R^2	$848,33 \pm 21,95$	$800,19 \pm 74,88$
	F-Wert	$> 13,69$	$> 7,57$
	Irrtumswahrscheinlichkeit p	$< 0,006$	$< 0,013$
proximal	Bestimmtheitsmaß R^2	$787,60 \pm 109,26$	$828,90 \pm 64,93$
	F-Wert	$> 6,64$	$> 10,07$
	Irrtumswahrscheinlichkeit p	$< 0,033$	$< 0,005$
distal	Bestimmtheitsmaß R^2	$891,57 \pm 26,21$	$800,19 \pm 74,88$
	F-Wert	$> 9,82$	$> 7,57$
	Irrtumswahrscheinlichkeit p	$< 0,014$	$< 0,013$

3.2.3 Amplituden der tatsächlichen Bewegungsbahnen

Die Amplituden als maximale Abweichungen der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn unterschieden sich hinsichtlich ihres Ausmaßes und der Ausrichtung sowohl zwischen den Schwanzmarkierungen als auch zwischen den Bewegungsphasen.

3.2.3.1 Länge der Amplitude

In der Vorschwingphase nahmen die Amplituden der tatsächlichen Bewegungsbahnen von der Schwanzbasis zur -spitze um etwa 50 mm zu (Tabelle II-3.6), wobei sich die Unterschiede in den Amplituden sowohl zwischen Schwanzbasis und -mitte ($T_{df=3} = 7,906$, $p = 0,004$) als auch zwischen Schwanzmitte und -spitze ($T_{df=3} = 9,001$, $p = 0,003$) als signifikant erwiesen. Die Vergrößerungen der Amplituden von proximal nach distal resultierten aus der sich vergrößernden Elongation des Greifschwanzes. Die Variationskoeffizienten V zeigen aber auch, dass die Amplitude der Schwanzspitze den geringsten, die der Schwanzmitte hingegen den größten Schwankungen relativ zum Mittelwert unterworfen war.

In der Kontaktphase erwies sich nur die Amplitude der Schwanzbasis mit dem 1,2-fachen Wert als signifikant größer im Vergleich zur Schwanzspitze ($T_{df=3} = 4,232$, $p = 0,024$). Die weitgehende Konstanz der Amplitude von Schwanzbasis und -mitte bestätigte die Abwandlungen der Pendelmechanik in der Kontaktphase.

Generell waren die Amplituden in der Kontaktphase größer als in der Vorschwingphase, wobei sich die Unterschiede bei der Schwanzbasis ($T_{df=3} = 6,904$, $p = 0,006$) und der Schwanzmitte ($T_{df=3} = 7,735$, $p = 0,004$) als signifikant erwiesen.

Tabelle II-3.6: Amplituden der tatsächlichen Bewegungsbahnen. $M \pm SD$ ($N = 40$) der Messwerte (M) in mm sowie der Variationskoeffizienten (V) der Amplitude als maximale Abweichung der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn der Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) in der Kontakt- und Vorschwingphase

statistischer Kennwert	Markierung	Vorschwingphase	Kontaktphase
M (mm)	sacral	14,58 \pm 4,73**	97,08 \pm 27,01**
	proximal	25,57 \pm 4,67**	86,16 \pm 20,28**
	distal	64,20 \pm 10,58	79,64 \pm 20,14
V	sacral	0,45 \pm 0,10	0,39 \pm 0,13
	proximal	0,62 \pm 0,17	0,36 \pm 0,08
	distal	0,27 \pm 0,05	0,29 \pm 0,11

** $: p < 0,01$

3.2.3.2 Laterale und vertikale Abweichungen innerhalb der Frontalebene

In der Vorschwingphase nahmen sowohl die lateral als auch die vertikal gerichteten Abweichungen der tatsächlichen von der direkten Bewegungsbahn innerhalb der Frontalebene von proximal nach distal um etwa 36 mm zu (Abb. II-3.8). Dabei erwiesen sich die Abweichungen von 8,81 \pm 6,35 mm (Schwanzbasis, s), 15,46 \pm 11,55 mm (-mitte, p) und

42,75 ± 22,94 mm (Schwanzspitze, d) nach lateral bzw. 10,65 ± 7,94 mm, 19,25 ± 14,80 mm und 47,25 ± 19,53 mm nach vertikal als gleich groß (t-Test, ns). Die Schwanzspitze wurde signifikant weiter lateral und vertikal ausgelenkt als die Schwanzmitte ($T_{df=3} = 19,95$, $p = 0,001$ für vertikal; $T_{df=3} = 5,578$, $p = 0,011$ für lateral) und die Schwanzbasis ($T_{df=3} = 13,847$, $p = 0,000$ für vertikal; $T_{df=3} = 6,733$, $p = 0,007$ für lateral). Auch Schwanzbasis und -mitte unterschieden sich signifikant sowohl hinsichtlich der vertikal ($T_{df=3} = 10,972$, $p = 0,002$) als auch der lateral gerichteten Abweichungen ($T_{df=3} = 3,944$, $p = 0,029$).

In der Kontaktphase dagegen erwiesen sich die vertikal gerichteten Abweichungen der Bewegungsbahnen der Schwanzbasis mit 88,41 ± 48,23 mm, der Schwanzmitte mit 81,22 ± 37,21 mm und der Schwanzspitze mit 73,61 ± 31,99 mm als signifikant größer im Vergleich zu den lateral gerichteten Abweichungen von 42,49 ± 26,48 mm, 36,64 ± 16,08 mm und 38,14 ± 14,54 mm ($T_{df=3} = 3,518$, $p = 0,039$ bei s; $T_{df=3} = 5,323$, $p = 0,013$ bei p; $T_{df=3} = 4,365$, $p = 0,022$ bei d). Dabei blieb das Verhältnis zwischen lateraler und vertikaler Abweichung bei allen Markierungen konstant. Ablesbar an den Werten der Schwanzspitze war ein Teil der Abweichungen auf die Substratbeweglichkeit zurückzuführen. Weder laterale noch vertikale Abweichungen unterschieden sich zwischen den einzelnen Schwanzmarkierungen (t-Test, ns). Die lateralen Abweichungen waren mit Ausnahme jener der Schwanzspitze in der Kontaktphase signifikant größer als in der Vorschwingphase ($T_{df=3} = 4,777$, $p = 0,017$ bei s; $T_{df=3} = 6,606$, $p = 0,007$ bei p). Auch die vertikalen Abweichungen jeder Markierung erwiesen sich in der Kontaktphase als signifikant größer im Vergleich zur Vorschwingphase ($T_{df=3} = 6,362$, $p = 0,008$ bei s, $T_{df=3} = 8,844$, $p = 0,003$ bei p; $T_{df=3} = 3,346$, $p = 0,044$ bei d), erneut ein Hinweis auf die Substratbeweglichkeit.

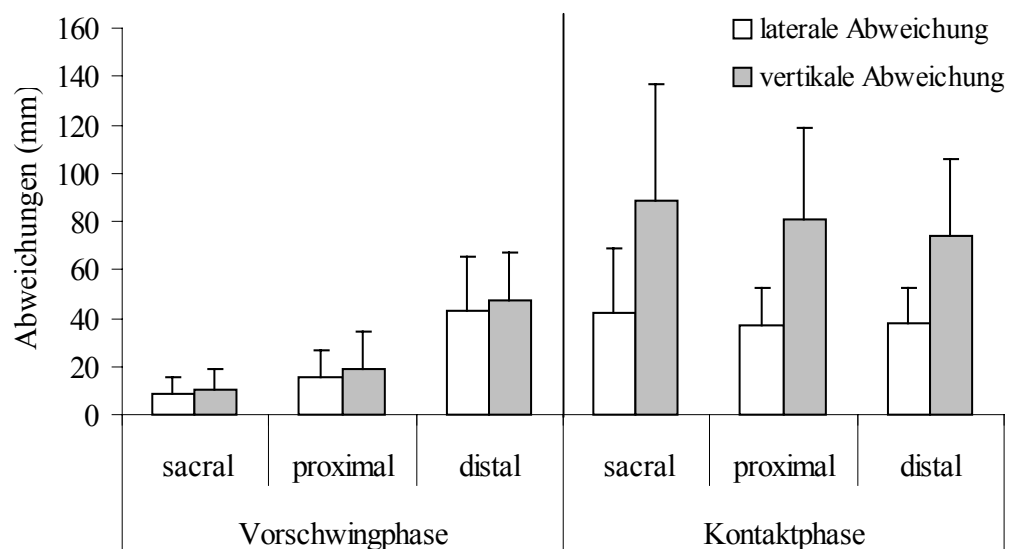


Abb. II-3.8: Lateral und vertikal gerichtete Abweichungen der tatsächlichen Bewegungsbahnen. $M \pm SD$ ($N = 40$) in mm der vertikal und lateral gerichteten maximalen Abweichungen der tatsächlichen von den direkten Bewegungsbahnen als Strecke zwischen Start- und Zielposition der Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) in der Vorschwing- und Kontaktphase.

3.3 Dauer der Greifschwanzbewegungen

3.3.1 Beträge der Dauer

Die Kontakt- und Vorschwingphase der Greifschwanzbewegung unterschieden sich in ihrer Dauer. Insgesamt dauerte eine Schwingung $0,97 \pm 0,03$ s.

Abb. II-3.9 zeigt, dass die Kontaktphase mit $0,72 \pm 0,06$ s ($N = 40$) einen signifikant längeren Zeitraum einnahm als die Vorschwingphase mit $0,25 \pm 0,02$ s ($N = 40$) ($T_{df=3} = 12,447$, $p = 0,001$). Die geringen Standardabweichungen zeigen den engen zeitlichen Rahmen der Bewegungen.

Der prozentuale Anteil der Kontaktphase am gesamten „Schrittzyklus“ betrug $74,5 \pm 3,1$ %.

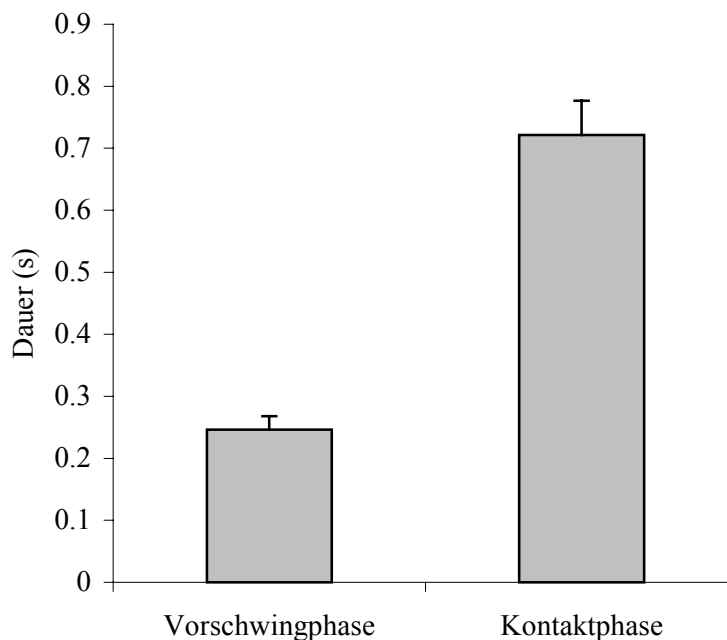


Abb. II-3.9: Dauer der Greifschwanzbewegungen. $M \pm SD$ ($N = 40$) in s der Bewegungsdauer in der Vorschwing- und Kontaktphase beim Hangeln.

3.3.2 Vergleich mit der Dauer eines mathematischen Pendels

Der Vergleich der gemessenen Dauer mit den theoretisch zu erwartenden Dauer liefert Hinweise, inwiefern sich der Greifschwanz wie ein Pendel bewegt und welchen Einfluss er auf die Bewegungen des Körpers als Pendel um die Hand ausübt.

Würde der Greifschwanz wie ein mathematisches Pendel schwingen (Tab. II-3.7), bräuchte er in der Vorschwingphase doppelt so lang wie beobachtet ($T_{df=3} = 22,24$, $p = 0,000$). In der Kontaktphase hingegen brauchte der Greifschwanz einen 1,3-fach längeren Zeitraum als erwartet. Die Länge des proximalen funktionellen Segments entspricht der Pendellänge, die für eine Schwingung über eine Vorschwing- und Kontaktphase eine Dauer von 0,94 s ergäbe und damit der tatsächlichen Dauer von 0,97 s entspricht.

Wird der gesamte Tierkörper in die Überlegungen einbezogen, stimmt die beobachtete Dauer in der Kontaktphase mit der eines mathematischen Pendels überein. Infolge des um 7 cm höher liegenden Masseschwerpunkts des Tierkörpers in der Kontaktphase verglichen mit der Vorschwingphase ($T_{df=3} = 3,75$, $p = 0,03$), was zu einer Reduzierung der Pendellänge führt, verkürzt der Klammeraffe die Dauer seiner Pendelbewegung um die Hand und den Greifschwanz als Aufhängepunkte um 0,04 s ($T_{df=3} = 3,61$, $p = 0,04$). Da die Vorschwingphase nur 25,5 % der Schwingung einnimmt, würde sich die Dauer des mathematischen Pendels bezogen auf den Tierkörper auf 0,20 s beschränken. Addiert zur Kontaktphase des Tierkörpers ergibt sich eine für ein mathematisches Pendel erwartete Schwingungsdauer von insgesamt 0,96 s.

Tabelle II-3.7: Vergleich der Bewegungsparameter zwischen mathematischem Pendel und gemessenen Werten. $M \pm SD$ ($N = 40$) in m der Pendellänge als Abstand des Masseschwerpunkts vom Aufhängepunkt, kalkuliert für den Greifschwanz, das proximale funktionelle Segment sowie den gesamten Tierkörper und die daraus zu berechnende Dauer $T/2$ in s für ein mathematisches Pendel. Im Vergleich dazu ist die gemessene Dauer für die Vorschwing- und Kontaktphase angegeben

Bewegungsphase	Pendel	Pendellänge (m)	T/2 mathematisches Pendel (s)	T/2 Pendel gemessen (s)
Vorschwingphase	Greifschwanz	$0,33 \pm 0,01$	$0,57 \pm 0,01$	
	proximales Segment	$0,22 \pm 0,01$	$0,47 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,02$
	Tierkörper	$0,64 \pm 0,03$	$0,80 \pm 0,02$	
Kontaktphase	Greifschwanz	$0,33 \pm 0,01$	$0,57 \pm 0,01$	
	proximales Segment	$0,22 \pm 0,01$	$0,47 \pm 0,01$	$0,72 \pm 0,06$
	Tierkörper	$0,57 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,04$	

3.4 Geschwindigkeiten der Greifschwanzmarkierungen

An der Form des Geschwindigkeitsprofils kann abgelesen werden, dass die Greifschwanzsegmente sich im Hinblick auf die Raum-Zeit-Organisation ihrer Bewegungen unterschieden. Auch die Bewegungsphasen zeigten unterschiedliche Charakteristika.

3.4.1 Geschwindigkeitsprofile der Greifschwanzmarkierungen

Die Schwanzmarkierungen unterschieden sich in der Form ihres Geschwindigkeitsprofils.

Das Geschwindigkeitsprofil der Schwanzbasis erstreckte sich annähernd glockenförmig über die gesamte Vorschwing- und Kontaktphase (Abb. II-3.10). Dabei zeigte sich allerdings eine steilere Abnahme der Geschwindigkeit nach ca. 40 % der Bewegungszeit in der Kontaktphase im Vergleich zu der flacheren Zunahme der Geschwindigkeit zu Beginn der Vorschwingphase. Das Maximum wurde daher im ersten Viertel und das Minimum gegen Ende der Kontaktphase erreicht. Das frühzeitige Minimum von $0,44 \pm 0,12$ m/s trat zeitgleich mit der Geschwindigkeitserhöhung der Schwanzmitte und -spitze auf.

Die Geschwindigkeitsprofile der Schwanzmitte und -spitze zeigten eine ähnliche Form mit einem Maximum in der Vorschwing- und einem Minimum in der Kontaktphase. In der Vorschwingphase verlief das Geschwindigkeitsprofil der Schwanzspitze glockenförmig und symmetrisch. Die Schwanzmitte dagegen erreichte das Geschwindigkeitsmaximum bereits um 15 % eher, weshalb das Geschwindigkeitsprofil in Bezug auf den Zeitanteil von 50 % asymmetrisch geformt war. Beide Markierungen erreichten das Minimum ihrer Geschwindigkeit von $0,34 \pm 0,03$ m/s (Schwanzmitte) bzw. $0,11 \pm 0,09$ m/s (Schwanzspitze) erst nach dem Anschlagen der Greiffläche an das Substrat zu Beginn der Kontaktphase.

In der Kontaktphase war die Geschwindigkeit der Schwanzbasis infolge der Pendelbewegung des Schwanzes stets am höchsten und die der Schwanzspitze am niedrigsten. Die Elastizität des Seiles bedingte die Bewegungen der Schwanzspitze, die zum Teil unterschiedliche Haltungen beim Griff um das Seil während der Kontaktphase einnahm. Bereits gegen Ende der Kontaktphase setzte im Zuge der Formierung der Biegestelle bei der proximalen Schwanzmarkierung eine Geschwindigkeitserhöhung um etwa $0,90$ m/s ein. Mit dem Entlanggleiten der Greiffläche am Seil erhöhte sich auch die Geschwindigkeit der Schwanzspitze.

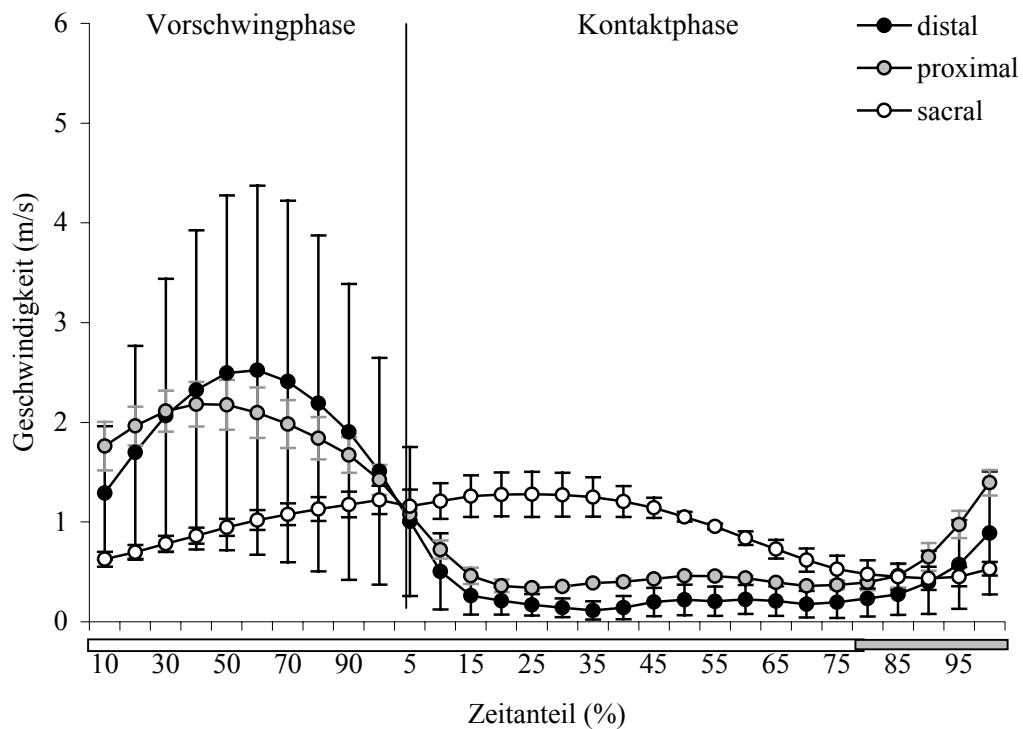


Abb. II-3.10: Geschwindigkeitsprofile der Greifschwanzmarkierungen. $M \pm SD$ ($N = 40$) in m/s der Geschwindigkeiten von Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) als Funktion der prozentualen Bewegungszeit in der hier aneinander gereihten Vorschwing- und Kontaktphase. Die Balken symbolisieren die Hände am Substrat, wobei der Farbwechsel den Handwechsel angibt.

Die Geschwindigkeitsprofile aller Schwanzmarkierungen wiesen sowohl in der Kontakt- als auch in der Vorschwingphase eine nur geringe Varianz auf (Tabelle II-3.8). In der Vorschwingphase zeigte die Schwanzbasis signifikant größere Übereinstimmungen der Geschwindigkeitsprofile im Vergleich zur Schwanzmitte und -spitze ($T_{df=3} = 3,717$, $p = 0,034$ für p; $T_{df=3} = 4,892$, $p = 0,016$ für d). Die in der Vorschwingphase in die Pendelbewegung des Rumpfes integrierte Schwanzbasis ist aufgrund der größeren Trägheit vermutlich geringeren Schwankungen ausgesetzt als der flexiblere distale Bereich des Greifschwanzes.

Tabelle II-3.8: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse für die Geschwindigkeitsprofile. $M \pm SD$ ($N = 40$) der Übereinstimmungsgrade (R^2) sowie F-Wert (F) und Irrtumswahrscheinlichkeit (p) für die Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) in der Vorschwing- und Kontaktphase

Markierung	Parameter	Vorschwingphase	Kontaktphase
sacral	Bestimmtheitsmaß R^2	$937,03 \pm 43,92$	$769,2 \pm 182,75$
	F-Wert	$> 7,24$	$> 7,61$
	Irrtumswahrscheinlichkeit p	$< 0,027$	$< 0,013$
proximal	Bestimmtheitsmaß R^2	$776,03 \pm 65,69$	$776,03 \pm 43,54$
	F-Wert	$> 8,82$	$> 5,45$
	Irrtumswahrscheinlichkeit p	$< 0,018$	$< 0,031$
distal	Bestimmtheitsmaß R^2	$815,73 \pm 49,96$	$790,98 \pm 61,34$
	F-Wert	$> 5,52$	$> 11,97$
	Irrtumswahrscheinlichkeit p	$< 0,047$	$< 0,003$

3.4.2 Maximalgeschwindigkeiten

3.4.2.1 Beträge der Maximalgeschwindigkeiten

Die Maximalgeschwindigkeiten der Schwanzmarkierungen unterschieden sich zwischen den Bewegungsphasen.

Tabelle II-3.9 zeigt in der Vorschwingphase eine Zunahme der Maximalgeschwindigkeiten von der Schwanzbasis zur -spitze. Die Schwanzspitze erreichte eine 1,6-fach höhere Geschwindigkeit als die Schwanzmitte ($T_{df=3} = 9,736$, $p = 0,002$) bzw. eine 2,7-fach höhere Geschwindigkeit als die Schwanzbasis ($T_{df=3} = 11,49$, $p = 0,001$). Die Schwanzmitte wies eine 1,7-fach höhere Maximalgeschwindigkeit als die -basis auf ($T_{df=3} = 7,445$, $p = 0,005$). Die Differenzen zwischen den Geschwindigkeiten der Schwanzbasis und -spitze geben an, mit welcher Geschwindigkeit der Greifschwanz die Fortbewegungsgeschwindigkeit des Rumpfes von $0,93 \pm 0,03$ m/s übertreffen musste, um zum nächsten Griff am Substrat zu gelangen. Die hohe Geschwindigkeit der Schwanzspitze deutet auf eine Peitschenbewegung. In der Kontaktphase hingegen unterschieden sich die maximalen Geschwindigkeiten der drei Markierungen nicht voneinander (t-Test, ns). Der Vergleich bezog sich allerdings auf die noch hohen bzw. zunehmenden Geschwindigkeiten von Schwanzmitte und -spitze zu Beginn bzw. am Ende der Kontaktphase. Während der Kontaktphase waren die Geschwindigkeiten von Schwanzmitte mit $0,46 \pm 0,03$ mm/s und -spitze mit $0,22 \pm 0,14$ mm geringer als die der Schwanzbasis. Dies stimmt überein mit der Funktion des Schwanzes als Aufhängung eines Pendels.

Anders als die Schwanzbasis (s), deren Maximalgeschwindigkeit in der Kontaktphase die in der Vorschwingphase signifikant übertraf ($T_{df=3} = 17,487$, $p = 0,000$), waren Schwanzmitte (p) und -spitze (d) in der Vorschwingphase um das 1,4-fache bzw. das Doppelte schneller als in der Kontaktphase ($T_{df=3} = 8,78$, $p = 0,003$ bei p; $T_{df=3} = 16,325$, $p = 0,001$ bei d).

In der Kontaktphase unterlagen nur die Geschwindigkeiten der Schwanzspitze größeren Schwankungen als in der Vorschwingphase. Dies ist allerdings auf die Seilbeweglichkeiten zurückzuführen sowie auf die Wickelbewegungen der Greiffläche.

Tabelle II-3.9: Maximalgeschwindigkeiten der Greifschwanzmarkierungen. $M \pm SD$ ($N = 40$) in m/s der Messwerte (M) und Variationskoeffizienten (V) der maximalen Geschwindigkeiten von Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) in der Kontakt- und Vorschwingphase

statistische Kennwerte	Markierung	maximale Geschwindigkeit	
		Vorschwingphase	Kontaktphase
M (m/s)	sacral	$1,27 \pm 0,11$ ***	$1,42 \pm 0,12$ ***
	proximal	$2,24 \pm 0,25$ **	$1,59 \pm 0,14$ **
	distal	$3,54 \pm 0,43$ **	$1,66 \pm 0,21$ **
V	sacral	$0,20 \pm 0,03$	$0,20 \pm 0,06$
	proximal	$0,21 \pm 0,07$	$0,23 \pm 0,04$
	distal	$0,17 \pm 0,06$	$0,32 \pm 0,10$

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

3.4.2.2 Erreichen der Maximalgeschwindigkeiten

Das Erreichen der Maximalgeschwindigkeiten wird in % der bis dahin benötigten Bewegungszeit angegeben. Die maximalen Geschwindigkeiten wurden bei jeder der Markierungen in unterschiedlichen Zeitabschnitten der Bewegung erreicht (Tabelle II-3.10).

In der Vorschwingphase erreichte die Schwanzmitte ihre Maximalgeschwindigkeit rund 15 % eher als die Schwanzspitze ($T_{df=3} = 4,081$, $p = 0,027$) und 50 % eher als die Schwanzbasis ($T_{df=3} = 8,632$, $p = 0,003$). Damit übernimmt das an der proximalen Markierung sich bildende funktionelle Gelenk bei der Schwingung des Greifschwanzes um die Schwanzbasis eine führende Rolle.

In der Kontaktphase erreichte die Schwanzbasis ihre Maximalgeschwindigkeit bereits nach einem Viertel der Bewegungszeit. Da Schwanzspitze und -mitte ihre maximalen Geschwindigkeiten entweder gegen Ende der Kontaktphase in Vorbereitung auf die Vorschwingphase erreichten oder die Maximalgeschwindigkeit der Vorschwingphase erst zu Beginn der Kontaktphase drosselten, wäre eine Mittelwertbildung des betreffenden Zeitpunkts nicht aussagekräftig.

In beiden Phasen waren die Schwankungen um den Mittelwert relativ hoch, wie anhand der hohen Variationskoeffizienten abgelesen werden kann.

Tabelle II-3.10: Zeitpunkt des Erreichens der Maximalgeschwindigkeit. $M \pm SD$ ($N = 40$) in % der Bewegungszeit beim Erreichen der maximalen Geschwindigkeit der Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) in der Vorschwing- und Kontaktphase

statistische Kennwerte	Markierung	Vorschwingphase	Kontaktphase
M (%)	sacral	90,56 ± 11,38	25,19 ± 6,30
	proximal	40,30 ± 2,86	-
	distal	54,08 ± 4,14	-
V	sacral	0,22 ± 0,25	0,63 ± 0,29
	proximal	0,31 ± 0,01	-
	distal	0,19 ± 0,08	-

3.5 Beschleunigungen und Verzögerungen der Greifschwanzmarkierungen

Die Quantifizierung der Beschleunigungsprofile zeigte die für jeden Greifschwanzabschnitt unterschiedliche Geschwindigkeits-Zeit-Organisation auch im Hinblick auf die Bewegungsphasen.

3.5.1 Beschleunigungsprofile der Greifschwanzmarkierungen

Die Form der Beschleunigungsprofile unterschied sich zwischen den verschiedenen Greifschwanzabschnitten (Abb. II-3.11).

Im Fall der Schwanzbasis erstreckte sich das relativ zur Schwanzmitte und -spitze flache Profil über beide Bewegungsphasen. Die relativ geringen Geschwindigkeitsveränderungen sorgten für die Beibehaltung der mittleren Fortbewegungsgeschwindigkeit des Rumpfes von $0,92 \pm 0,03$ m/s.

Schwanzspitze und -mitte zeigten demgegenüber eine phasenbezogene Strukturierung des Beschleunigungsprofils. Während der Vorschwingphase ergaben sich annähernd sinusförmige Kurven, deren Ursprung und Ende jedoch in die Kontaktphase verlagert waren. Die drastische Reduzierung der Geschwindigkeit zu Beginn der Kontaktphase lässt darauf schließen, dass die Verzögerung nicht allein aus Muskelkräften, sondern auch aus dem Anschlagen der Greiffläche an das Substrat resultiert.

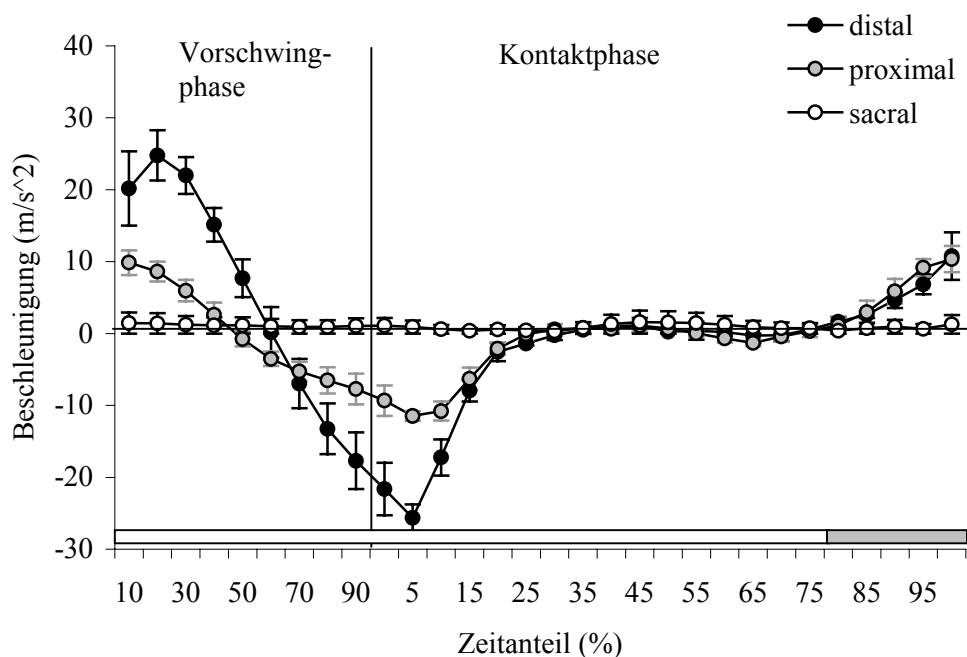


Abb. II-3.11: Beschleunigungsprofile der Greifschwanzmarkierungen. $M \pm SD$ ($N = 40$) in m/s^2 der Beschleunigungen von Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) als Funktion des prozentualen Zeitanteils in der hier aneinandergereihten Vorschwing- und Kontaktphase.

3.5.2 Maximale Beschleunigungen und Verzögerungen

3.5.2.1 Beträge der maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen

Die markierten Bereiche des Greifschwanzes unterschieden sich in ihren maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen. Bei einigen Markierungen ergaben sich auch Differenzen zwischen den Geschwindigkeitsveränderungen der beiden Bewegungsphasen.

Maximale Beschleunigung sowie Verzögerung waren bei der Schwanzbasis am kleinsten und bei der -spitze am größten (Tabelle II-3.11). Die Schwanzbasis erreichte ihre maximale Beschleunigung in der Vorschwing-, ihre maximale Verzögerung hingegen in der Kontaktphase. Für die Schwanzmitte wurden sowohl in der Vorschwing- als auch in der Kontaktphase gleichgroße Maximalbeschleunigungen und -verzögerungen gemessen. Die Schwanzspitze beschleunigte maximal in der Vorschwing- und verzögerte maximal in der Kontaktphase. Allerdings unterschieden sich die Beträge der Beschleunigung und Verzögerung signifikant innerhalb der Vorschwingphase ($T_{df=3} = 5,108$, $p = 0,015$).

In der Vorschwingphase unterschieden sich die Markierungen signifikant hinsichtlich ihrer Beschleunigungen ($T_{df=3} > 9,345$, $p < 0,003$) und Verzögerungen ($T_{df=3} > 11,684$, $p < 0,001$), wobei die Geschwindigkeitsänderungen pro Zeiteinheit infolge der inversen Pendelbewegung von proximal nach distal um etwa das 5-fache zunahmen.

Auch in der Kontaktphase unterschieden sich die Beträge von Beschleunigung und Verzögerung zwischen den Markierungen signifikant ($T_{df=3} > 3,177$, $p < 0,049$ für Beschleunigung; $T_{df=3} > 25,937$, $p < 0,001$ für Verzögerung). Dabei erreichte die Schwanzmitte die größte und die -basis die geringste Beschleunigung. Dies weist auf die bereits beschriebene Ähnlichkeit mit einem doppelten Pendel hin und ordnet der Schwanzmitte eine Sonderrolle im Zusammenhang mit der Bildung des funktionellen Gelenks zu.

Die Variationskoeffizienten zeigen die im Zusammenhang mit der 2. Ableitung sich ergebenden hohen Schwankungen der Geschwindigkeitsveränderungen relativ zum Mittelwert. Diese machten sich insbesondere im Hinblick auf die Verzögerung bei der Schwanzspitze bemerkbar.

Tabelle II-3.11: Maximale Beschleunigungen und Verzögerungen der Greifschwanzmarkierungen. $M \pm SD$ ($N = 40$) der statistischen Kennwerte von Messwert (M) in m/s^2 und Variationskoeffizient (V) der maximalen Beschleunigung und Verzögerung von Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) in der Vorschwing- und Kontaktphase

statistische Kennwerte	Markierung	Vorschwingphase		Kontaktphase	
		Beschleunigung	Verzögerung	Beschleunigung	Verzögerung
M (m/s^2)	sacral	5,20 ± 0,57			4,92 ± 0,73
	proximal	10,11 ± 1,57	11,91 ± 1,25	10,19 ± 1,59	12,91 ± 0,65
	distal	27,14 ± 3,42	16,41 ± 3,17	25,12 ± 1,81	27,42 ± 0,89
V	sacral	0,36 ± 0,17			0,27 ± 0,10
	proximal	0,38 ± 0,15	0,30 ± 0,04	0,36 ± 0,08	0,35 ± 0,14
	distal	0,21 ± 0,07	0,46 ± 0,12	0,27 ± 0,05	0,29 ± 0,11

3.5.2.2 Erreichen der maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen

Gemäß des beschriebenen Beschleunigungsprofils unterschied sich das zeitliche Auftreten der maximalen Beschleunigung und Verzögerung sowohl zwischen einigen Markierungen als auch zwischen den beiden Bewegungsphasen (Tabelle II-3.12).

In der Vorschwingphase erreichte die Schwanzmitte ihre maximale Beschleunigung um rund 5 % eher als die Schwanzspitze ($T_{df=3} = 13,671$, $p = 0,001$) und erwies sich damit als führend in der Bewegung. Sowohl Schwanzmitte (p) als auch Schwanzspitze (d) erreichten ihre maximale Verzögerung zum gleichen relativen Zeitpunkt (t-Test, ns) und um 25 % später als die Schwanzbasis ($T_{df=3} = 3,903$, $p = 0,03$ für p; $T_{df=3} = 3,394$, $p = 0,043$ für d).

In der Kontaktphase fand die maximale Beschleunigung sowohl der Schwanzspitze als auch der Schwanzmitte zur gleichen relativen Zeit am Ende und damit um jeweils 25 % später statt als die der Schwanzbasis ($T_{df=3} = 3,525$, $p = 0,039$ für p und d). Sowohl Schwanzspitze als auch Schwanzmitte erreichten die maximale Verzögerung jeweils zu Beginn der Bewegungszeit und damit um 50 % eher als die Schwanzbasis ($T_{df=3} = 23,563$, $p = 0,000$ für p; $T_{df=3} = 13,135$, $p = 0,001$ für d).

Beim Vergleich der Markierungen zwischen beiden Bewegungsphasen zeigte sich, dass die maximale Beschleunigung jeweils zu Beginn der Vorschwing- und am Ende der Kontaktphase erreicht wurde ($T_{df=3} = 2,462$, $p = 0,000$ für s; $T_{df=3} = 61,889$, $p = 0,000$ für p; $T_{df=3} = 35,581$, $p = 0,000$ für d). Die maximale Verzögerung hingegen fand bei allen Markierungen jeweils in der späten Vorschwing- und frühen Kontaktphase statt, wobei sich die zeitlichen Unterschiede nur bei der Schwanzspitze als signifikant erwiesen ($T_{df=3} = 23,374$, $p = 0,000$). Die maximalen Beschleunigungen in der Vorschwingphase wurden zu variableren Zeitpunkten erreicht als die Verzögerungen, welche eng mit dem Anschlag der Greiffläche an das Substrat zusammenhingen. Umgekehrt schwankte der Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Verzögerung in der Kontaktphase stärker als in der Vorschwingphase, zumindest für die Schwanzmitte und -spitze.

Tabelle II-3.12: Erreichen der maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen. $M \pm SD$ ($N = 40$) der statistischen Kennwerte (stat. Ken.) Messwert (M) und Variationskoeffizient (V) der prozentualen Bewegungszeit beim Erreichen der maximalen Beschleunigung und Verzögerung von Schwanzbasis (sacral), -mitte (proximal) und -spitze (distal) in der Vorschwing- und Kontaktphase.

stat. Ken.	Markierung	Vorschwingphase		Kontaktphase	
		Beschleunigung	Verzögerung	Beschleunigung	Verzögerung
M (%)	sacral	35,54 ± 12,61	68,83 ± 15,19	70,40 ± 18,30	56,12 ± 4,32
	proximal	12,07 ± 0,75	95,92 ± 3,74	94,91 ± 2,86	6,78 ± 0,41
	distal	16,42 ± 0,39	94,83 ± 4,14	94,51 ± 4,65	6,56 ± 4,04
V	sacral	0,64 ± 0,23	0,52 ± 0,19	0,54 ± 0,30	0,36 ± 0,22
	proximal	0,41 ± 0,10	0,08 ± 0,07	0,09 ± 0,08	0,74 ± 0,30
	distal	0,37 ± 0,12	0,10 ± 0,07	0,14 ± 0,13	0,94 ± 0,90