

Biomechanische Untersuchungen im Behindertensport - Stockkraftmessungen bei Skischlittensfahrern -

1. Einleitung

Der Behindertensport zeigt in den letzten Jahren in vielen Sportarten und Disziplinen eine rasante Leistungsentwicklung. So bewiesen die Winterparalympics in Nagano, daß in vielen Wettbewerben die Leistungsdichte größer geworden ist und zusätzlich auch die erbrachten Leistungen deutlich im Niveau ansteigen. Unter diesen Bedingungen werden ebenso wie im Leistungssportlichen Bereich der Nichtbehinderten auch wissenschaftliche Verfahren zur Leistungsoptimierung zunehmend genutzt. Zu diesem Zweck stehen den Athleten verschiedene Olympiastützpunkte zur Verfügung, die diese Serviceleistungen anbieten. Der Olympiastützpunkt Freiburg-Schwarzwald kann mit seinen Schwerpunkten Nordischer Skisport und Radfahren auch in der Betreuung von behinderten Sportlern und Sportlerinnen Angebote machen. Im folgenden soll am Beispiel der in Nagano erfolgreichen Skilanglaufschlittensfahrer eine biomechanische Untersuchung dargestellt werden.

2. Problemstellung und theoretischer Hintergrund

Seit 1996 werden 3 Skischlittenslangläufer vom OSP betreut. Im Rahmen dieser Betreuung werden zum einen Optimierungen der Sitzposition der Fahrer aber auch Analysen der Bewegungstechnik vorgenommen. Zusätzlich findet eine trainingswissenschaftliche Beratung statt. Ein wesentliches Problem, das durch die verantwortlichen Trainer formuliert wurde, bestand in der Auswahl einer geeigneten Stocklänge. Durch die sitzende Position der Fahrer sind die verwendeten Stocklängen deutlich kürzer als bei stehend laufenden Skilangläufern. Aus Untersuchungen mit Stockkraftmessungen direkt im Skistock bei Nichtbehinderten liegen uns Ergebnisse vor. Sie zeigen, daß für jeden Athleten eine individuell optimale Stocklänge existiert, die eine möglichst große vortriebswirksame Kraft bei möglichst geringem Gesamteinsatz hervorbringt. Vortriebswirksam sind beim Skilanglauf nur die Kräfte, die horizontal wirken, während z.B. vertikale Kräfte lediglich zur Verformung des Skistocks führen (vgl. Abb. 1).

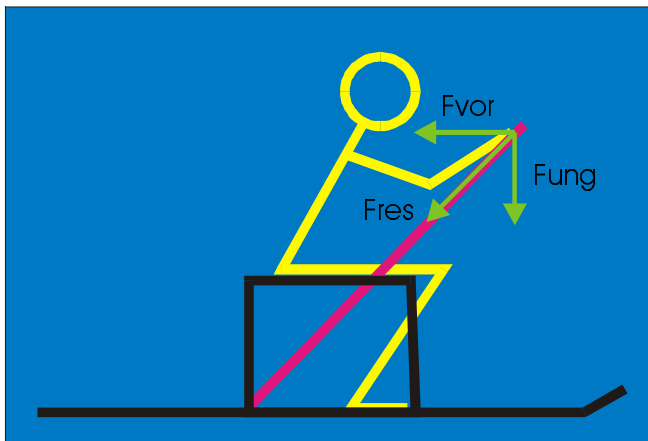


Abb. 1: Vortriebswirksame (F_{vor}) und nicht vortriebswirksame Kraft (F_{ung}) beim Skilanglauf

Mißt man sowohl die vortriebswirksame Kraft als auch die resultierende Kraft kann man zusätzlich einen Wirkungsgrad bestimmen. Er wird durch die Division der Fläche der vortriebswirksamen Kraft (vortriebswirksamer Impuls) durch die Fläche der resultierenden Kraft (Impuls der resultierenden Kraft) berechnet. Hohe Wirkungsgrade weisen auf einen ökonomischen Krafteinsatz hin und sind demnach positiv zu bewerten. Der theoretisch mögliche Wirkungsgrad von 100% würde dann erreicht, wenn der gesamte Krafteinsatz in vertikaler Richtung erfolgen würde. Dies ist in der Praxis allerdings nicht möglich, da der Skistock beim Einsatz in den Schnee fast vertikal steht und damit zunächst ein großer Teil des Krafteinsatzes in die vertikale Richtung erfolgt. Erst mit dem zunehmend spitzeren Winkel des Skistocks zum Erdboden wird die Produktion von vertikalen Kräften möglich.

Zur Kontrolle der Effektivität der Bewegungstechnik reicht die Messung der Kräfte allerdings noch nicht aus. Zusätzlich muß ein Außenkriterium herangezogen werden, das z.B. in der Bewegungsgeschwindigkeit bzw. der Zeit für eine bestimmte Strecke definiert werden kann. Erst dieses Außenkriterium ermöglicht eine Gesamtbewertung der Bewegungstechnik und damit auch eine Einschätzung von zu verwendenden Stocklängen.

Die verantwortlichen Trainer der Schlittensfahrer äußerten die Vermutung, daß die von den Fahrern bisher mehr intuitiv verwendeten Stocklängen eher zu lang seien. Zu lange Stöcke würden zu einem erheblich vergrößerten Vertikalkrafteinsatz führen und damit die Wirkungsgrade deutlich reduzieren. Darüber hinaus sind zu lange Stöcke in Anstiegen eher hinderlich.

In einem ersten Zugang sollte mit den oben angesprochenen Athleten eine Untersuchung durchgeführt werden, aus deren Ergebnissen zumindest tendenziell festgestellt werden konnte, ob die bisher verwendeten Stöcke zu lang seien.

3. Untersuchungsmethodik

Drei Athleten der Behindertennationalmannschaft nahmen an der Untersuchung teil. Die Bewegungstechnik wurde mittels einer dreidimensionalen Kraftmeßplattform (Kistler) und eindimensionalen Kraftaufnehmern (Kistler) in beiden Skistöcken untersucht. Die dreidimensionale Kraftmeßplattform lag auf der linken Seite des Fahrer, so daß der linke Stockeinsatz für die Auswertung benutzt wird. Die Fahrer legten eine Strecke von 25 Metern zurück. Die jeweils benötigte Zeit wurde mittels Lichtschranken gestoppt. Parallel zur Kraftmeßplattform wurde die Bewegungstechnik mit einer Videokamera dokumentiert, die eine zweidimensionale Analyse ermöglicht. Die Erfassung der Kraftzeitkurven der Stöcke wurde mittels Telemetrie (Glonner) möglich. Alle Kraftzeitkurven wurden mit einer Meßfrequenz von 250 Hertz erfaßt und digital auf einem Notebook abgespeichert. Die Lichtschrankenimpulse der Start- und Ziellichtschranke dienten zur Bestimmung der Fahrzeit.

Die Horizontalkraft der dreidimensionalen Kistlerkraftmeßplattform ist identisch mit der vortriebswirksamen Kraft. Die in den Stöcken eindimensional gemessene Kraft wird zur Bestimmung der wirkenden Kraft in Stockrichtung benutzt. Die resultierende Kraft wird aus den Kräften, die an den Stöcken gemessen werden ermittelt.

Jeder Fahrer führte mit zwei verschiedenen Stocklängen mindestens 3 Versuche durch. Zunächst erfolgten die Fahrten mit den Stöcken in der bisherigen Länge, danach wurden Fahrten mit verkürzten Stöcken durchgeführt. In die Auswertung geht der jeweilige Bestversuch ein. An den Skischlitten waren Skiroller montiert, die eine Untersuchung auf einer Kunststoffbahn ermöglichen.

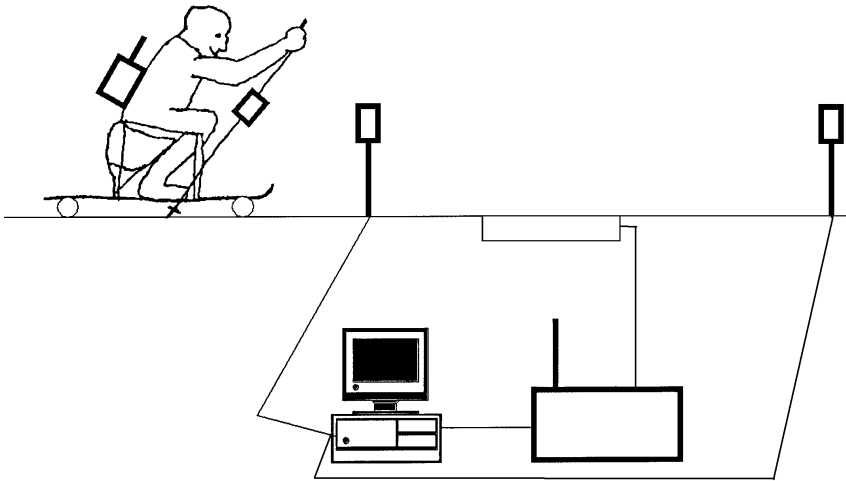


Abb. 2: Die Meßkette mit Lichtschranken und Kraftmessung

Folgende biomechanische Parameter gehen in die Auswertung ein:

SF	Schubfrequenz
t _{25m}	Fahrzeit für 25 m
t _k	Kontaktzeit des Skistocks am Boden, auf Meßplattform gemessen
IF _{res,r}	Fläche unter der Kraftzeitkurve der resultierenden Kraft des rechten Stocks für alle Schübe
IF _{res,l}	Fläche unter der Kraftzeitkurve der resultierenden Kraft des linken Stocks für alle Schübe
IF _{vor,l}	Fläche unter der Kraftzeitkurve der vortriebswirksamen Kraft des linken Stocks hochgerechnet für alle Schübe
IF _{ung,l}	IF _{res,l} - IF _{vor,l} ; ungenutzter Impuls des linken Stocks
IF _{res,r} -Schub	Fläche unter der Kraftzeitkurve der resultierenden Kraft des rechten Stocks beim Schub auf der Kraftmeßplattform
IF _{res,l} -Schub	Fläche unter der Kraftzeitkurve der resultierenden Kraft des linken Stocks beim Schub auf der Kraftmeßplattform
IF _{vor,l} -Schub	Fläche unter der Kraftzeitkurve der vortriebswirksamen Kraft des linken Stocks beim Schub auf der Kraftmeßplattform
IF _{ung,l} -Schub	ungenutzter Impuls des linken Stocks beim Schub auf der Kraftmeßplattform
WG	IF _{vor} /Schub / IF _{res,l} /Schub * 100 = Wirkungsgrad
Fr, Fl	Stockkraft recht und links
F _{quer}	Querkraft auf Meßplattform gemessen
F _{vor}	Vortriebswirksame Kraft auf Meßplattform gemessen
F _z	Vertikale Kraft auf Meßplattform gemessen = F _{ung}

Tabelle 1: Zusammenstellung der ausgewählten biomechanischen Parameter

Die Impulse der beiden Stöcke werden aus den gemessenen Kraftzeitkurven über alle Schübe während der 25m-Strecke ermittelt. Daraus läßt sich hinterher ein mittlerer Impuls für jeden Schub berechnen. Die Ermittlung des Impulses über alle Schübe ist sinnvoll, da dieser Parameter eine Aussage über den notwendigen Kraftaufwand zur Überwindung der 25 m ermöglicht. Kritisch bleibt bei diesem Verfahren anzumerken, daß die berechneten Wirkungsgrade mit einer über alle Schübe gemittelten Angabe berechnet werden.

4. Untersuchungsergebnisse

Im ersten Schritt soll eine deskriptive Darstellung des Schubverhaltens erfolgen. Die folgende Abbildung zeigt einen vollständigen Meßschrieb eines Athleten. Dargestellt sind die zwei Kraftzeitkurven der Stöcke und die Kraftzeitverläufe der dreidimensionalen Kraftmessung bei dem Schub, der die Kraftmeßplattform getroffen hat.

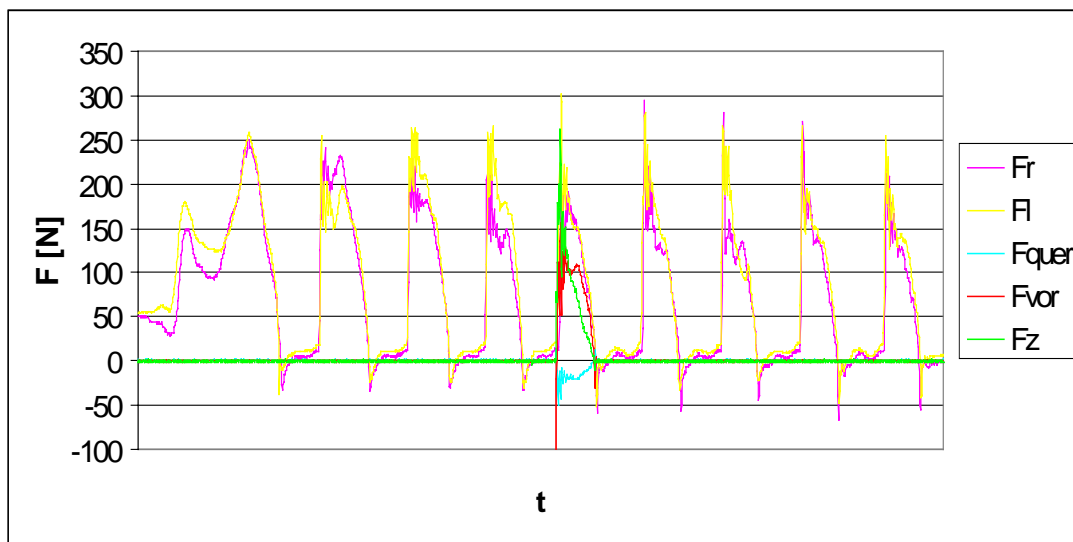


Abb. 3: Kraftzeitverläufe beider Stöcke und der Kraftmeßplattform

Es wird ersichtlich, daß die Kraftzeitverläufe der Stöcke durchaus Differenzen aufweisen. Der dargestellte Athlet zeigt in diesem Fall Unterschiede zwischen dem rechten und linken Stock. Dies rührt zum einen aus dem Problem, daß der Fahrer die Geradeausrichtung halten muß her, zum anderen können aber auch Seitigkeitsprobleme hier eine Rolle spielen. Derartige Seitenunterschiede ließen sich bei allen drei Fahrern finden und sind auch aus anderen Untersuchungen bekannt.

Weiter ist ersichtlich, daß mit zunehmender Geschwindigkeit die Kontaktzeiten am Boden geringer werden und dadurch die Impulse abnehmen. Da die dreidimensionale Kraftmeßplattform 10 Meter hinter dem Start lag, konnte ein relativ kurzer und damit repräsentativer Bodenkontakt erfaßt werden. Die mittleren Bodenkontaktzeiten lagen bei 0,25 bis 0,35s.

Bei der Betrachtung der Kraftzeitverläufe der dreidimensionalen Kraftmeßplattform zeigen sich relativ niedrige Querkräfte, die quer zur Bewegungsrichtung wirken (vgl. Abb. 4). Querkräfte sind prinzipiell nicht vortriebswirksam und erzeugen lediglich

Drehmomente, die einen Geradeauslauf des Schlittens behindern. Sie sollten demnach möglichst vermieden werden. Die gemessenen Kräfte erreichen nur selten Werte von mehr als 50 N und sind deshalb als gering einzuordnen. Den Fahrern gelingt die Vermeidung von Querkräften.

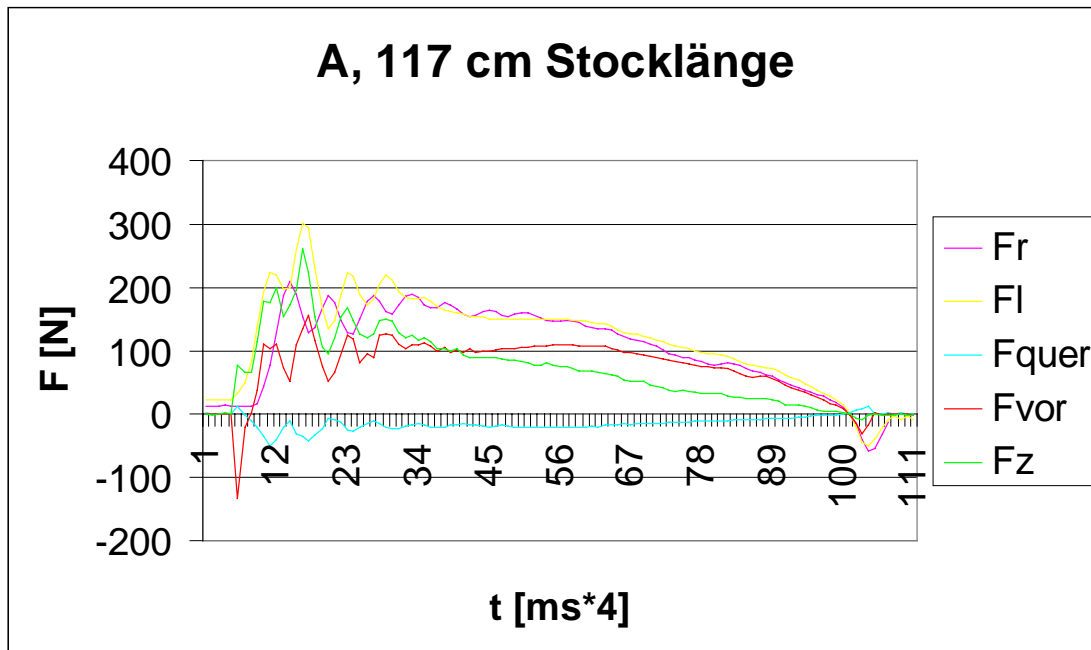


Abb. 4: Darstellung eines Bodenkontaktes auf der dreidimensionalen Kraftmeßplattform.

Auffällig sind in der obigen Abbildung zwei Aspekte: zum einen erfolgt der Einsatz der beiden Stöcke zeitlich leicht versetzt. Der linke Stock hat zuerst Bodenkontakt. Zum anderen findet sich ein kurzer negativer Kraftwert zu Beginn des Bodenkontaktes in der vortriebswirksamen Kraft. Dies deutet auf ein "Abstützen" des Athleten hin, der damit seinen nach vorn gebeugten Oberkörper stabilisiert. Der dargestellte Verlauf wurde von einem Querschnittsgelähmten realisiert, dessen Bauchmuskulatur nicht zur Stabilisierung des Rumpfes eingesetzt werden kann. Die dadurch entstehenden negativen Kräfte wirken bremsend und sollten verringert bzw. möglichst vermieden werden. Eine Verkürzung der Stocklänge erbrachte den gewünschten Effekt, wie in der folgenden Abbildung zu sehen ist. Ein zeitlicher Versatz im Einsatz der Stöcke ist immer noch zu beobachten. In diesem Fall erzeugt der Fahrer im rechten Stock auch höhere Kräfte als im linken.

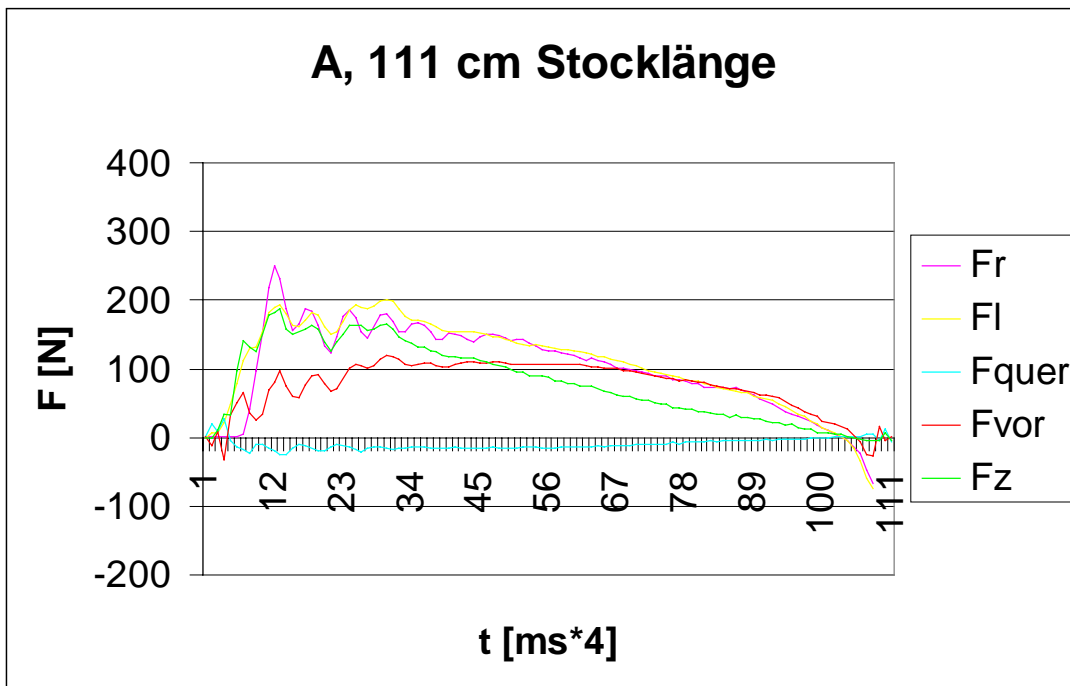


Abb. 5: Darstellung eines Bodenkontaktes auf der dreidimensionalen Kraftmeßplattform (verkürzter Stock, gleicher Fahrer wie in Abb. 4).

Die in den Stöcken gemessenen Kräfte sind zu Beginn deutlich höher als die vortriebswirksame Kraft. Erst mit zunehmender Neigung der Skistöcke steigt der Anteil der vortriebswirksamen Kraft an der resultierenden Kraft an. Dies läßt sich theoretisch einfach begründen, wie in Abb. ? grafisch verdeutlicht ist:

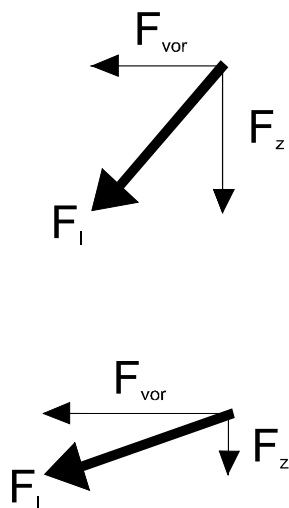


Abb. 6: Gleiche resultierende Kraft (F_i) und unterschiedliche vortriebswirksame Kraft (F_{vor}) bei verschiedenen Stockwinkeln.

Die Parametrisierung der Kraftzeitverläufe erfolgt über die oben dargestellten biomechanischen Parameter. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der jeweiligen Bestversuche mit langem und kurzem Stock dargestellt:

Proband	Schübe	Stocklänge	SF [1/min]	t _{25m} [s]	t _k [s]	IFres,r [Ns]	IFres,l [Ns]	IFvor,l [Ns]	IFung,l [Ns]	IFres,r-Schub [Ns]	IFres,l-Schub [Ns]	IFvor,l-Schub [Ns]	IFung,l-Schub [Ns]	WG [%]
A	7,00	117,00	81,60	6,67	0,38	476,80	541,40	223,86	317,54	44,96	52,10	31,41	20,69	60,29
	7,00	111,00	77,60	6,45	0,39	323,60	332,00	232,96	99,04	44,42	47,67	32,91	14,76	69,04
B	7,00	117,00	90,20	5,50	0,31	304,40	291,30	154,28	137,02	46,47	40,83	21,86	18,97	53,54
	7,00	111,00	88,10	5,63	0,32	325,50	372,40	154,70	217,70	40,71	44,78	21,98	22,80	49,08
C	7,00	117,00	87,70	5,67	0,38	476,60	545,60	195,58	350,02	59,08	66,18	27,94	38,24	42,22
	7,00	111,00	87,60	5,65	0,38	437,90	532,80	200,41	332,39	47,60	67,32	28,39	38,93	42,17

Tabelle 2: Untersuchungsergebnisse der drei Fahrer. Darstellung der Bestversuche mit langem und kurzem Stock.

Fahrer A zeigt deutliche Unterschiede zwischen dem langen und kurzen Stock. So sind die resultierenden Impulse der beiden Stockmessungen beim kurzen Stock deutlich niedriger, der Anteil der vortriebswirksamen Kraft leidet darunter aber nicht. Im Gegenteil erreicht der Athlet sogar bessere Fahrzeiten und höhere Wirkungsgrade und nutzt seine Kräfte damit eindeutig effektiver. Dies zeigt sich auch im niedrigeren ungenutzten Impuls. Die Bewegungstechnik mit dem kurzen Stock ist demnach als effektiver einzustufen.

Bei den beiden anderen Athleten findet sich kein derartig eindeutiges Ergebnis. Aus der Betrachtung der Unterschiede ergibt sich aber, daß ein verkürzter Stock zumindest nicht zu Nachteilen führt. So findet man ähnliche Wirkungsgrade und auch die Impulse der vortriebswirksamen Kraft und der weiteren Kräfte unterscheiden sich nicht wesentlich. Dies ist ein wichtiges Ergebnis, da verkürzte Stöcke in Anstiegen eher von Vorteil sind und daher auch bei diesen beiden Athleten weitere Versuche mit kürzeren Stöcken anzustreben sind.

In einem ersten Trainingslager im Schnee wurde dieses Vorhaben später umgesetzt und alle Athleten verwendeten in der Folge verkürzte Stöcke gegenüber dem Vorjahr.

5. Diskussion

Die dargestellten Ergebnisse belegen, daß im Behindertensport eine biomechanische und leistungsdiagnostische Betreuung sinnvoll und erfolgreich eingesetzt werden kann. Die zunehmende Leistungsdichte in der Weltspitze und der gesteigerte Trainingsumfang der Athleten unterstützt diese Aussage. Die Ergebnisse belegen darüber hinaus, daß subjektive Einschätzungen von Trainern und die sich daraus ergebenden Problemstellungen nur mit objektiven wissenschaftlichen Methoden verifizierbar sind. Für die Athleten ist ein Wechsel von der gewohnten Stocklänge dann viel eher einsichtig als wenn man sich nur auf die "subjektiven" Daten des Trainers verlassen muß, der vielleicht eine Änderung der Stocklänge empfiehlt. Eine derartige Objektivierung ist im Behindertensport allerdings noch viel zu selten zu finden.

Die in diesem Pilotprojekt durchgeführten Untersuchungen stellen nur einen kleinen, ersten Versuch dar. So wurden z.B. nur zwei verschiedene Stocklängen miteinander verglichen. Für eine Optimierung müßten mindestens vier bis fünf Alternativen eine Untersuchung unterzogen werden. Erst dann ließen sich Aussagen über "die individuell optimale" Stocklänge machen. Dies bedeutet allerdings einen erheblich größeren Aufwand, der in diesem Zusammenhang noch nicht getrieben werden konnte.

Die Erfolge der betreuten Athleten bei den Paralympics (alle gewannen Einzelmedaillen!) sprechen allerdings dafür, daß auch mit dieser Untersuchung schon kleinere Leistungsfortschritte begünstigt wurden.

Das wissenschaftliche Serviceangebot des Olympiastützpunktes Freiburg-Schwarzwald, das durch das Institut für Sport und Sportwissenschaft der Universität Freiburg gesichert wird, konnte im Rahmen dieses Projektes eine Problemstellung aus der Praxis mittels wissenschaftlicher Methoden einer Lösung näherbringen. Für die Zukunft sind im Behindertensport weitere Projekte geplant, die die biomechanische Betreuung im Ski- und Radsport verbessern sollen.