

Aus dem Institut für Soziale Pädiatrie und Jugendmedizin  
der Ludwig-Maximilians-Universität München  
Vorstand: Prof. Dr. h. c. Hubertus von Voss

*Quantitative Analyse  
statischer und dynamischer Griffkräfte  
bei Vorschulkindern*

-Eine explorative Studie mit 125 Kindern-

**Dissertation**

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

Vorgelegt von: *Meike Nitschke*  
Aus: *Hamburg*  
*2002*

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. h. c. H. von Voss

Mitberichterstatter: Prof. Dr. R. Breul  
Priv. Doz. Dr. A. Danek  
Prof. Dr. Dieringer

Mitbetreuung durch den  
promovierten Mitarbeiter: Dr. med. habil. Rainer Blank

Dekan: Univ. Prof. Dr. med. Dr. h.c. K. Peter

Tag der mündlichen Prüfung: 18.07.2002

***Inhaltsübersicht***

**0 Inhalt ..... 3**

**1 Einleitung ..... 8**

*1.1 Die Handmotorik als Spiegel von Phylogenese und Ontogenese des Menschen ..... 8*

*1.2 Die Griffkraft als Teilkomponente der Handmotorik ..... 9*

**1.2.1 Entwicklungsneurologische Gesichtspunkte ..... 9**

*1.2.1.1 Entwicklung des motorischen Systems ..... 10*

*1.2.1.2 Entwicklung der Handmotorik und des Greifens ..... 11*

*1.2.1.3 Entwicklung der Griffkraft ..... 12*

*1.2.1.4 Entwicklung kognitiver Einflussfaktoren ..... 13*

**1.2.2 Anatomische und Biomechanische Gesichtspunkte ..... 13**

*1.2.2.1 Muskelarchitektur ..... 13*

*1.2.2.2 Griffarten ..... 15*

*1.2.2.3 Kraftproduktion ..... 15*

*1.2.2.4 Neuroanatomie: Die Muskelinnervation ..... 16*

**1.2.3 Zusammenfassung ..... 18**

*1.3 Beurteilung der Griffkraft ..... 19*

**1.3.1 Phänomenologische Darstellung der Handgeschicklichkeit ..... 19**

**1.3.2 Isometrische Maximalgriffkraft ..... 20**

**1.3.3 Interne Kraftkontrolle: Ökonomie und Antizipation der Griffkraft ..... 20**

**1.3.4 Externe Kraftkontrolle: Motorische Antwort auf taktile Afferenzen ..... 23**

**1.3.5 Automatisierung des Griffkrafteinsatzes ..... 24**

*1.3.5.1 Höhe und Variabilität der Kraftamplitude ..... 24*

*1.3.5.2 Kraftänderung pro Zeiteinheit ..... 24*

*1.3.5.3 Die Latenzdauer ..... 24*

**1.3.6 Zusammenfassung ..... 25**

*1.4 Indikationen zur Griffkraftmessung ..... 26*

**2 Fragestellung ..... 27**

<b>3 Methodik</b> .....	<b>29</b>
<i>3.1 Probandengruppe Vorschulkinder</i> .....	<i>29</i>
<b>3.1.1 Definition der Zielgruppe</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1.2 Kriterien zur Auswahl der Probanden</b> .....	<b>31</b>
<i>3.2 Technische Voraussetzungen zur Messung der Griffkraft</i> .....	<i>32</i>
<b>3.2.1 Das Greifen-Heben-Transportieren (GHT) Mess-System</b> .....	<b>32</b>
<b>3.2.2 Messung der Kraft</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2.3 Messung der Beschleunigung</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2.4 Zusammenfassung</b> .....	<b>33</b>
<i>3.3 Praktische Durchführung der Griffkraftmessung</i> .....	<i>34</i>
<b>3.3.1 Versuchsaufbau</b> .....	<b>34</b>
<b>3.3.2 Aufgaben zur statischen und dynamischen Kraftmessung</b> .....	<b>35</b>
<b>3.3.3 Zusammenfassung</b> .....	<b>38</b>
<i>3.4 Wertung der Messdaten</i> .....	<i>39</i>
<b>3.4.1 Wertung der Signale: Messdaten</b> .....	<b>39</b>
3.4.1.1 <i>Software</i> .....	39
3.4.1.2 <i>Beschreibung der Messdaten als Zeitfunktionen</i> .....	39
3.4.1.3 <i>Bewertung der Zeitfunktionen für Kraft- und Bewegungsparameter</i> .....	42
<b>3.4.2 Auswertung der Messdaten</b> .....	<b>44</b>
3.4.2.1 <i>Software</i> .....	44
3.4.2.2 <i>Deskriptive Statistik (Griffkraftdosierung, Griffkrafttiming)</i> .....	44
3.4.2.3 <i>Analytische Statistik</i> .....	45
<b>3.4.3 Zusammenfassung</b> .....	<b>46</b>
<i>3.5 Grafische Darstellungen und Textverarbeitung</i> .....	<i>47</i>
<b>3.5.1 Einzelfallbeispiele</b> .....	<b>47</b>
<b>3.5.2 Abbildungen</b> .....	<b>47</b>
<b>3.5.3 Textverarbeitung</b> .....	<b>47</b>

<b>4 Ergebnisse</b> .....	<b>48</b>
<b>4.1 Probandengruppe</b> .....	<b>48</b>
<b>4.2 Beschreibung von Griffkraftverläufen</b> .....	<b>49</b>
<b>4.2.1 Fallbeispiele</b> .....	<b>49</b>
4.2.1.1 Einzelne Aufwärtsbewegung „schnell“ .....	49
4.2.1.2 Vertikale und sagittale Repetitivbewegungen .....	53
<b>4.2.2 Statische Aufgaben</b> .....	<b>60</b>
4.2.2.1 Maximalgriffkraft .....	60
4.2.2.2 Griffkraft bei Maximaler Hebekraft .....	64
4.2.2.3 Maximale Hebekraft .....	64
<b>4.2.3 Dynamische Aufgaben</b> .....	<b>66</b>
4.2.3.1 Dynamische Griffkräfte im Überblick .....	66
4.2.3.2 Beschleunigungen im Überblick .....	70
<b>4.2.4 Zusammenfassung</b> .....	<b>76</b>
<b>4.3 Quantitative Analyse dynamischer Griffkräfte</b> .....	<b>77</b>
<b>4.3.1 Griffkraftdosierung und Griffkrafttiming im Überblick</b> .....	<b>77</b>
<b>4.3.2 Vertikal- und Sagittalbewegungen im Vergleich</b> .....	<b>85</b>
<b>4.3.3 Auswirkung von Geschwindigkeitssteigerung auf Timing und Dosierung</b> .....	<b>87</b>
4.3.3.1 Geschwindigkeitsunterschiede bei Repetitivbewegungen .....	87
4.3.3.2 Geschwindigkeitsunterschiede bei Einzelbewegungen .....	89
<b>4.3.4 Einzel- und Repetitivbewegungen im Vergleich</b> .....	<b>92</b>
<b>4.3.5 Richtungsvergleich der „langsamen“ Einzelbewegungen</b> .....	<b>94</b>
<b>4.3.6 Probandenbezogene Faktoren</b> .....	<b>96</b>
4.3.6.1 Alter .....	96
4.3.6.2 Geschlecht .....	96
4.3.6.3 Größe und Gewicht .....	96
4.3.6.4 Handparameter .....	97
<b>4.3.7 Zusammenfassung</b> .....	<b>98</b>

<b>5 Diskussion</b> .....	<b>99</b>
<b>5.1 Methodik</b> .....	<b>99</b>
<b>5.1.1 Probandengruppe – Auswahl und klinische Untersuchung</b> .....	<b>99</b>
<b>5.1.2 Mess-System – Aufbau, Durchführung und Auswertung</b> .....	<b>99</b>
<b>5.1.3 Zusammenfassung</b> .....	<b>101</b>
<b>5.2 Ergebnisse der Griffkraftmessung bei statischen und dynamischen Aufgaben</b> .....	<b>102</b>
<b>5.2.1 Fallbeispiele</b> .....	<b>102</b>
5.2.1.1 <i>Zeitliche Parallelität der Griffkraft- und Beschleunigungskurven (Timing)</i> .....	102
5.2.1.2 <i>Gleichmäßigkeit und Wiederholgenauigkeit der Griffkraftdosierung</i> .....	103
<b>5.2.2 Statische Griffkräfte</b> .....	<b>105</b>
5.2.2.1 <i>Individuelle Maximalgriffkraft: Geschlechtsunterschied</i> .....	105
5.2.2.2 <i>Griffkraft bei Maximaler Hebekraft: Griffkraftreserve</i> .....	106
<b>5.2.3 Dynamische Griffkräfte</b> .....	<b>107</b>
5.2.3.1 <i>Griffstabilität als Voraussetzung für ein sicheres Bewegen von Gegenständen</i> .....	107
5.2.3.2 <i>Griffstabilität durch adäquate Kraftdosierung und Krafttiming</i> .....	107
5.2.3.3 <i>Geschwindigkeitseinfluss</i> .....	108
5.2.3.4 <i>Griffkrafteinsatz in verschiedenen Bewegungsebenen</i> .....	109
5.2.3.5 <i>Einzel- versus Repetitivbewegungen</i> .....	111
5.2.3.6 <i>Einfluss der Bewegungsrichtung</i> .....	111
5.2.3.7 <i>Einfluss der Eigenschaften der Probanden</i> .....	112
<b>5.2.4 Zusammenfassung</b> .....	<b>113</b>
<b>5.3 Beurteilung der funktionellen Verbundenheit von Griffkraft und Bewegung</b> .....	<b>114</b>
<b>5.3.1 Koordination</b> .....	<b>114</b>
<b>5.3.2 Antizipatorische Kontrolle</b> .....	<b>115</b>
<b>5.3.3 Ökonomie</b> .....	<b>116</b>
<b>5.3.4 Automatisierung</b> .....	<b>118</b>
<b>5.3.5 Zusammenfassung</b> .....	<b>119</b>
<b>5.4 Ausblick</b> .....	<b>120</b>
<b>5.4.1 Weitere richtungweisende Untersuchungen</b> .....	<b>120</b>
<b>5.4.2 Einsatzmöglichkeiten in der Diagnostik</b> .....	<b>121</b>
<b>5.4.3 Therapeutische Aspekte</b> .....	<b>122</b>

<b>6 Zusammenfassung</b> .....	<b>123</b>
<b>7 Literatur</b> .....	<b>125</b>
<b>8 Anhang</b> .....	<b>131</b>
<b>9 Danksagung</b> .....	<b>145</b>
<b>10 Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen</b> .....	<b>146</b>
<b>11 Lebenslauf der Verfasserin</b> .....	<b>148</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Die Handmotorik als Spiegel von Phylogenese und Ontogenese des Menschen

Die Entwicklung der Handmotorik ist eine der herausragenden Leistungen in der Phylogenese der Menschheit. Ontogenetisch ist die Handmotorik ebenfalls bedeutsam für die Entwicklung des Individuums. Im Kindesalter ist ein Mindestmaß handmotorischer Kompetenz beispielsweise bei dem einfachen Ergreifen von Gegenständen erforderlich. Das Begreifen und Betasten spielt auch für die kognitive Entwicklung eine herausragende Rolle. Feinmotorische Fertigkeiten wie Greifen, Heben und Transportieren müssen erlernt werden. Sie sind zunächst häufig in gröbere Armbewegungen eingebettet. Die Leistung, Armbewegungen in Richtung und Geschwindigkeit zu kontrollieren und Objekte mit einer angemessenen Kraft zu halten, wird als *Motorik* bezeichnet (76). Die Qualität der Motorik lässt sich anhand der *Koordination* als „harmonisches Zusammenwirken der bei einer Bewegung tätigen Muskeln“ beurteilen. Auch die *Kraftökonomie* und die *zeitliche Parallelität* des Einsatzes verschiedener Muskelgruppen definieren die Qualität der Motorik. Die Komponenten der Motorik werden durch unterschiedliche Bereiche des Nervensystems gesteuert.

Die vorliegende Studie mit Vorschulkindern untersucht die Entwicklung der feinmotorischen Fähigkeiten, die Griffkraft bei Bewegungen in verschiedenen Richtungen und mit verschiedenen Geschwindigkeiten adäquat einzusetzen. Diese Studie steht in engem Zusammenhang mit dem „Modellprojekt *Petö*“. Bei dem Projekt geht es um die Frage, ob die konduktive Förderung nach *Petö* medizinisch-rehabilitative Anteile und damit therapeutische Inhalte enthält. In dem Zusammenhang mit diesem Modellprojekt wurde in dem Institut für Soziale Pädiatrie und Jugendmedizin der Ludwig-Maximilians-Universität ein Forschungslabor *Neurophysiologie und –psychologie* aufgebaut. Diese Abteilung hat es sich zur Aufgabe gesetzt, quantitative Messmethoden zur Evaluation von Rehabilitationsmaßnahmen zu entwickeln. Ein Forschungsschwerpunkt wurde für die Untersuchung der Reifung der Feinmotorik im frühen Kindesalter gesetzt.

Bisher erfolgte die Beurteilung von Bewegungen allein durch deren Beobachtung (75). Die Kraft wurde bestenfalls durch Messung maximaler Kräfte mit Handdynamometern quantifiziert (69). Neue Instrumentarien zur parallelen Messung von Bewegung und Kraft ermöglichen seit einigen Jahren die Beurteilung beider feinmotorischer Teilleistungen (9, 10, 13, 45, 87). Erwachsene sind bereits im Hinblick auf den Krafteinsatz bei einzelnen und repetitiven Bewegungen untersucht worden (24). Eine quantitative Analyse dynamischer Griffkräfte im Kindesalter wurde hingegen bisher nicht durchgeführt. Das Fehlen solcher Daten beruht u.a. auf der Tatsache, dass

bislang geeignete Messinstrumente für den Einsatz bei Kindern und insbesondere Kleinkindern nicht zur Verfügung standen.

Die hier vorgestellte Untersuchung soll durch Quantifizierung und Analyse dynamischer Griffkräfte im Vorschulalter dazu beitragen, die Entwicklung der Griffkraft während der Ontogenese zu verstehen. Zusätzlich sollen die entscheidenden Aspekte zur Beurteilung des Griffkrafteinsatzes identifiziert werden. Sie können das differentialdiagnostische Spektrum feinmotorischer Defizite in der kindlichen Entwicklung erweitern. Dieser diagnostische Ansatz eröffnet auch die Möglichkeit einer gezielten therapeutischen Förderung handmotorischer Teilkomponenten, z.B. des Griffkrafteinsatzes.

## ***1.2 Die Griffkraft als Teilkomponente der Handmotorik***

### **1.2.1 Entwicklungsneurologische Gesichtspunkte**

Für die Interpretation dynamischer Griffkräfte im Kindesalter ist das Verständnis der Entwicklung des motorischen Systems insbesondere der Feinmotorik der Hand unerlässlich.

Als *Entwicklung* wird sowohl die progressive, gerichtete, irreversible, altersspezifische Änderung der Quantität neuraler Strukturen als auch die Qualität neuer Funktionen bezeichnet (75). Entwicklung beinhaltet, dass genetisch programmierte Wachstumsprozesse zu plastischen Veränderungen im ZNS führen, die zunächst an Komplexität zunehmen, dann aber in gewissem Maße einer Regression unterliegen können. Ein weiteres wichtiges Phänomen der Entwicklung ist die zunehmende Fähigkeit, Gesetzmäßigkeiten aus der Umwelt vorherzusehen bzw. zu antizipieren.

Die Bildung und Transformation synaptischer Verbindungen ist eine wichtige Voraussetzung für die sogenannte neuronale Plastizität und damit für den „Erwerb eines neuen Verhaltens“ bzw. für das *Lernen*. Während der kindlichen sensorischen und motorischen Auseinandersetzung mit der Umwelt werden gemäß dem fundamentalen Prinzip der neuronalen Plastizität Neuronenkreise wiederholt überschwellig erregt und synaptische Verbindungen ausgebildet (49). Die wiederholte Erregung beteiligter Nervenzellen resultiert in einer zunehmenden Effizienz ihres Stoffwechsels und gleichzeitigem Zellwachstum. Die *Reifung* synaptischer Verbindungen und neuraler Funktionen führt zu einem zunehmend routinierten kombinierten Einsatz von Muskeln bzw. Muskelgruppen und zur Automatisierung alltäglicher Bewegungen. Im Kleinhirn ist die neuronale Plastizität für motorische Lernprozesse vor allem im Kindesalter ausgeprägt (3).

### 1.2.1.1 Die Entwicklung des motorischen Systems

Embryonal findet die Differenzierung zellulärer Strukturen durch Induktion statt. Die Zellen des Neuralrohres proliferieren zu jungen Nervenzellen, den Neuroblasten. An den Abgangsstellen der motorischen Radices für die Hand (Rückenmarkshöhe C7/8) imponiert eine besonders hohe Zelldichte postganglionärer motorischer Nervenzellen bzw. Neurone (51). Ein Neuron besteht aus dem Zellkörper und in den meisten Fällen aus zwei Arten von Fortsätzen: den *Dendriten* und dem *Axon* (vgl. Abb. 1). Die *Dendriten* und *Axone* der unzähligen Neuroblasten stehen über *Synapsen* mit anderen Zellen in Verbindung. Die Verbindungen zu anderen Nervenzellen tragen zur funktionellen Determinierung der Nervenzelle bei.

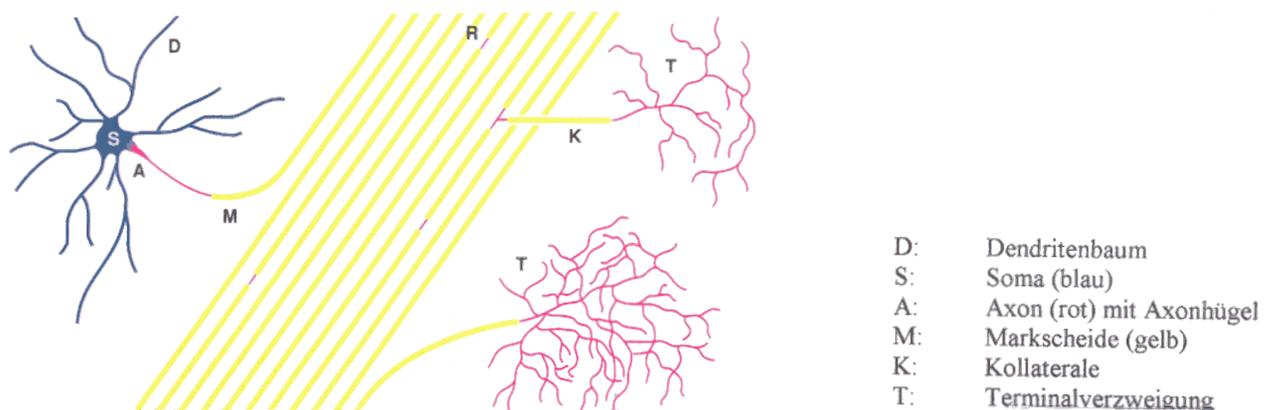


Abb. 1: Bauplan von Neuronen (aus: Schmidt-Schaible, *Neuro- und Sinnesphysiologie*, 2001 (49))

Motorische Nervenzellen der Großhirnrinde werden als *erste motorische Neurone* bezeichnet und sind anatomisch im *primär motorischen Kortex* lokalisiert. Axone der *ersten motorischen Neurone* steigen aus dem Kortex über *laterale kortikospinale Bahnsysteme* hinab in das Rückenmark. Im Rückenmark enden sie an dem *zweiten motorischen Neuron*. Das *zweite Motoneuron* schließt an die *distale Muskulatur* der Extremitäten, so dass eine zentrale Kontrolle über die Vielzahl der Bewegungsoptionen beispielsweise von Fingern und Hand möglich ist. Eine temporär hohe Anzahl kortikaler motorischer Neurone und synaptischer Verbindungen in die Peripherie ermöglicht eine flexible Ausbildung motorischer Bewegungsmuster (49).

Die ersten Bewegungen beginnen pränatal etwa sieben Wochen post conceptionem. Die fetale Spontanaktivität erfolgt im Allgemeinen zyklisch-repetitiv. Ab der 10. Woche lassen sich isolier-

te Extremitätenbewegungen erkennen, ab der 12. bis 14. Woche finden koordinierte isolierte Handbewegungen statt (85). Um die 36. Woche nimmt die motorische Aktivität ab, was auf die zu diesem Zeitpunkt reifenden Hemm-Mechanismen zurückgeführt wird (20).

Zum Zeitpunkt der Geburt steht dem Säugling bereits ein Repertoire zentral organisierter, koordinierter, rhythmischer Bewegungen zur Verfügung, beispielsweise die Atemrhythmik beim Saugen (41, 75). Nach der Geburt wird die Bewegungsplanung zunehmend vor allem durch sensorische Informationen und kognitive Fähigkeiten moduliert.

Im Kleinkindalter sind Bewegungen durch spontanes Auftreten flexibel zusammengesetzter Muskelaktivität charakterisiert. Die hohe Variabilität der Bewegungsmuster ist kennzeichnend für ein gesundes Nervensystem und essentiell für die Ausbildung motorischer Programme. Sinnesafferenzen nehmen Einfluss auf die Entladungsfrequenz kortikaler Motoneurone. Dadurch wird die motorische Aktivität Umweltbedingungen angepasst (87). Muskelsynergien und motorische Programme lösen spontane Entladungen der Motoneurone zunehmend ab. Der Greifreflex etwa wird durch willkürliches Greifen ersetzt (75, zitiert nach Touwen 1976). Dieser Prozess wird als *entwicklungsbedingte Transformation neuraler Mechanismen* bezeichnet. Der Zeitpunkt und die Geschwindigkeit der neuronalen Transformation ist individuell unterschiedlich und von der anatomischen Entwicklung des Nervensystems abhängig.

#### 1.2.1.2 Entwicklung der Handmotorik und des Greifens

Feinmotorik kann als Fähigkeit verstanden werden, einzelne Finger kontrolliert und isoliert voneinander zu bewegen. Die Handmotorik spiegelt ein Höchstmaß feinmotorischer Fertigkeiten wider. Isolierte, willkürliche und präzise Fingerbewegungen sind aufgrund der Existenz monosynaptischer kortikospinaler Bahnen zwischen dem ersten und zweiten Motoneuron möglich (67). Mit deren Durchtrennung gehen auch erlernte feinmotorische Fertigkeiten der Finger wieder verloren (66).

Die Reifung des motorischen Systems unterliegt langwierigen funktionellen und strukturellen Veränderungen (5). Die Myelinisierung, d.h. elektromechanische Nervenfasersolierung des kortikospinalen Traktes, beginnt nach der Geburt in kranio-kaudaler Richtung (78). Zusammen mit der Dickenzunahme der Axone wird eine Steigerung der Nervenleitgeschwindigkeit zentraler Impulse möglich (21). Eine Erhöhung der Leitungsgeschwindigkeit motorischer Efferenzen bei elektromagnetischer Stimulation des Kortex und elektromyografischer Ableitung an M. biceps brachii bzw. Hypothenar wurde dementsprechend in den ersten beiden Lebensjahren festgestellt. Die gesamte Leitungszeit peripherer Nerven vermindert sich zunächst und bleibt durch die Zunahme der Nervenleitgeschwindigkeit trotz Längenwachstum ab etwa dem 5. Lebensjahr kon-

stant. Nach Abschluss des Längenwachstums erreicht die Nervenleitgeschwindigkeit 50-70m/s. Die ab dem Kleinkindesalter konstante kortikomotoneuronale Leitungszeit bildet die Basis für eine zunehmend sichere zeitliche Abstimmung motorischer Befehle während der motorischen Entwicklung (70).

### *Greifentwicklung*

Das Greifen ist eine der wichtigsten Funktionen der Hand. Diese visuomotorische Koordinationsleistung geht mit der Opposition des Daumens zu den Langfingern einher und ist als komplexer, visuell kontrollierter Bewegungsvorgang mit gleichzeitiger Kraftproduktion nach der körperlichen Aufrichtung einer der grundlegenden Evolutionsschritte der Menschheit.

Der Greifprozess beinhaltet zunächst die Wahrnehmung des Zielobjektes und dessen Lage im Raum (4). Die geöffnete Hand wird mit entsprechend der Objektform positionierten Fingern auf das Objekt bewegt. Kurz bevor dieses erreicht ist, wird unter visueller Kontrolle die Ausrichtung der Finger korrigiert. Das exakte Zugreifen geschieht mit Hilfe epikritischer Hautsensoren. Der Handschluss erfolgt schließlich mit angemessenem Griffkrafteinsatz in einer Position, die weitere Bewegungen bei stabil gehaltenem Objekt zulässt.

Bereits Säuglinge können Gegenstände im Präzisionsgriff zwischen Daumen und Zeigefinger ergreifen, der Erfolg ist allerdings aufgrund unzureichend entwickelter Kontrollmechanismen eher zufällig. Neben kognitiven Faktoren unterstützt auch die zunehmende Haltungsstabilisierung durch Schulter- und Oberarmmuskulatur den Greifvorgang (32). Die Haltungskontrolle ist dabei unabhängig von der Kraft, die für das Greifen eingesetzt wird (77).

#### *1.2.1.3 Entwicklung der Griffkraft*

Die Gesamtheit der Muskelfasern, die von einer motorischen Nervenzelle des Rückenmarks innerviert wird, bildet mit dieser eine *motorische Einheit* (49). Je mehr motorische Einheiten rekrutiert werden, desto höher ist die isometrische Spannungsentwicklung beispielsweise der Handmuskeln. Je mehr Pyramidenzellen des motorischen Kortex Impulse an die zweiten Motoneurone entsenden oder je höher deren Impulsfrequenz ist, desto stärker ist die Griffkraft. *Qualitativ* ist die Kraftproduktion durch Selektion bestimmter motorischer Einheiten steuerbar.

Wie gezielt der Griffkrafteinsatz bei Kindern erfolgt, wurde für den Präzisionsgriff bei einfachen Hebevorgängen mit Kindern zwischen dem 8. Lebensmonat und dem 14. Lebensjahr untersucht (27). Es konnte gezeigt werden, dass beim Hochheben eines Objektes die Griffkraft gleichzeitig mit derjenigen Kraft ansteigt, die notwendig ist, um ein Objekt von der Unterlage abzuheben (sogenannte *load force*). Bei Kindern unter zwei Jahren wurde ein besonders hoher Griffkraftein-

satz und eine große Variabilität der Griffkraftdosierung beobachtet. Diese Variabilität vermindert sich mit dem Alter, und die Kraftänderung pro Zeiteinheit zeigt ab dem 2. Lebensjahr den für einen antizipierten Griffkrafteinsatz charakteristischen *glockenförmigen* Verlauf mit nur einem absoluten Maximalwert.

Experimente mit unterschiedlichen Objekteigenschaften (Größe (36), Gewicht (30), Oberflächenbeschaffenheit (28)) zeigten den Zusammenhang von Antizipation des Griffkrafteinsatzes und *interner Repräsentation* von Objekteigenschaften. Die interne Repräsentation entwickelt sich auf dem Boden wiederholter sensorischer Afferenzen epikritischer Hautorganellen (87) und propriozeptiver Muskelspindeln (38, 40). Der Pool somatosensorischer Erinnerungen nimmt im Kindesalter in dem Maße zu, wie Kinder mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Umwelt konfrontiert werden. Die interne Repräsentation führt auch zu einer *Ökonomisierung* des Griffkrafteinsatzes. Die Differenz zwischen aufgebrachtener Griffkraft und minimal benötigter Kraft wird als individueller Sicherheitsfaktor *safety margin* bezeichnet (87). Der *safety margin* ist um so geringer, je detaillierter die interne Repräsentation der Objekteigenschaften und deren Integration in die Bewegungsplanung ist.

Die reife Griffkraftkontrolle durch automatisierte, schnell abrufbare motorische Programme wird allerdings nicht vor dem 8. bis 11. Lebensjahr beobachtet (27).

#### *1.2.1.4 Entwicklung kognitiver Einflussfaktoren*

Wichtige kognitive Faktoren für die Planung präziser, willkürlicher Bewegungen sind die Erwartung der Bewegung, die Konzentration und das Verstehen der Aufgabenstellung. Im Alter von etwa 6 Jahren werden Dimensionen wie Gegenstand, Zeit, Zahl und Raum fassbar. Bis zu diesem Zeitpunkt erfolgt die Steuerung der Muskelkoordination durch „interne kinästhetische Rückmeldungen“. Erst anschließend wird sie durch externe somatosensorische Informationen und deren zentrale Verarbeitung ergänzt (73).

### **1.2.2 Anatomische und Biomechanische Gesichtspunkte**

Die Kenntnis der Anatomie und der biomechanischen Eigenschaften der Hand ist für das Verständnis von Griff und Griffkraftanpassung von besonderer Bedeutung.

#### *1.2.2.1 Muskelarchitektur*

In der Hand tragen 27 Knochen und 39 Muskeln in synergistischer und antagonistischer Weise dazu bei, die feinmotorischen Funktionen der Hand und Finger auszuführen. Die Muskeln der

Extremitäten sind quergestreift. Sie unterscheiden sich jedoch in Fasertyp und Architektur, d.h. der Anordnung der Muskelfasern relativ zur Achse der Kraftproduktion. Entscheidend für Geschwindigkeit und das Bewegungsausmaß ist die *Faserlänge*, während für die isometrische Kraftentwicklung die funktionelle Querschnittsfläche (*physiological cross-sectional area*) von Bedeutung ist (31).

Sogenannte *extrinsische Muskeln*, die am Unterarm entspringen und mehrere Gelenke überziehen (*flexor digitorum profundus*, *abductor pollicis longus*, *extensor digitorum communis*), dienen in erster Linie dem *kontinuierlichen* Krafteinsatz. Die *intrinsischen Muskeln* überspannen meist nur ein metacarpales oder interphalangeales Gelenk. Ihr Ursprung und Ansatz befindet sich an der Hand, und zusammen mit den langen Fingerbeugern sind sie für die *Feinmodulation* zuständig. Insgesamt weisen intrinsische Handmuskeln die höchste Faserlänge/Muskellänge-Relation der oberen Extremität auf, durch die sie auch bei größerer Dehnung eine relativ konstante Kraft aufrecht erhalten können (31) (vgl. Abb. 1a).

Bei gleichem Gelenkhebel ermöglichen die intrinsisch/extrinsischen Muskelpaare Kraftproduktion unterschiedlicher Stärke und Bewegungen verschiedener Geschwindigkeiten.

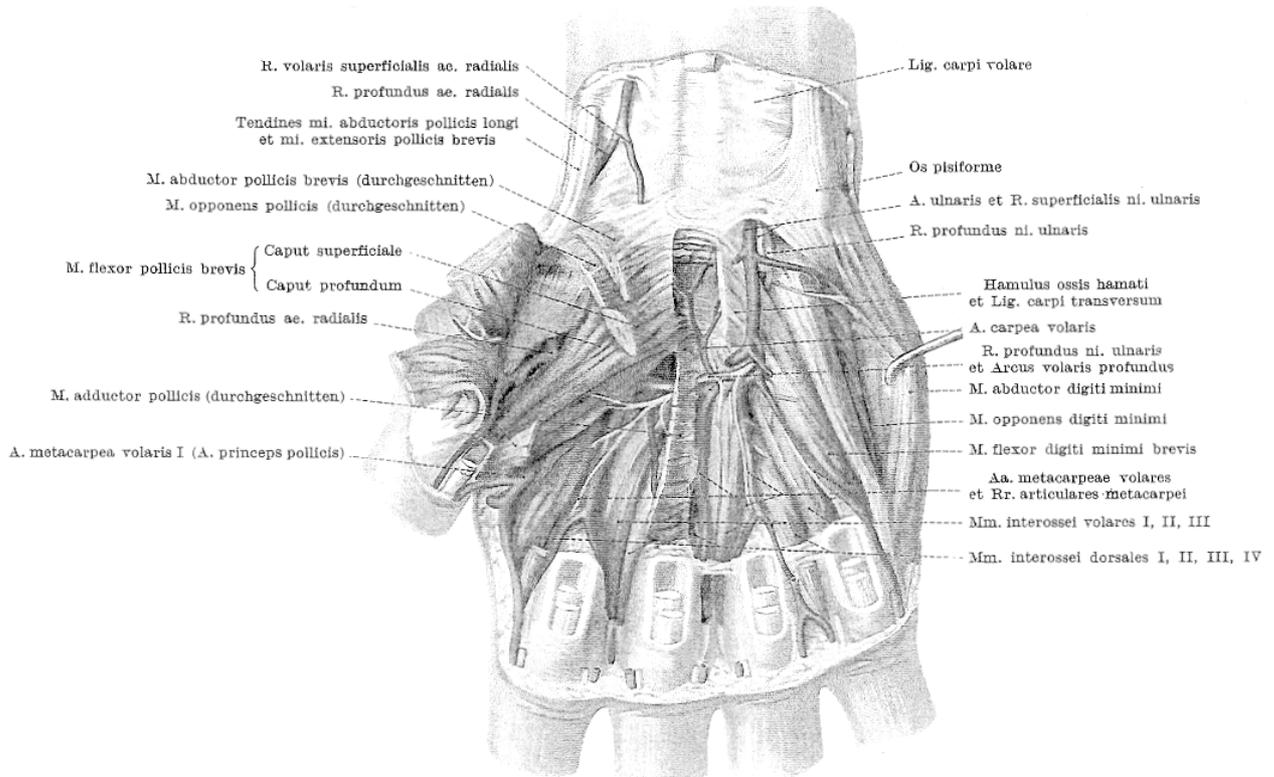


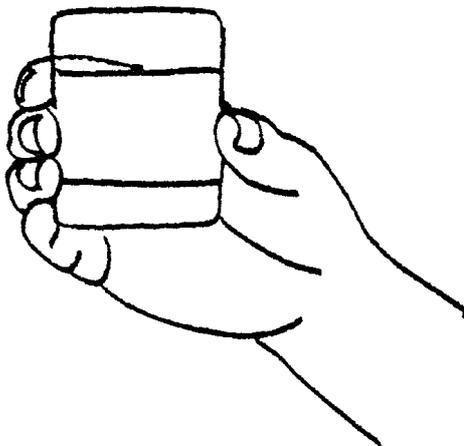
Abb. 1a: Intrinsische Muskeln der Hand:

Mm. interossei dorsales, M. flexor pollicis brevis, Mm. adductor/abductor/opponens pollicis (aus: *Lanz/Wachsmuth: Praktische Anatomie*, 1959, München (65))

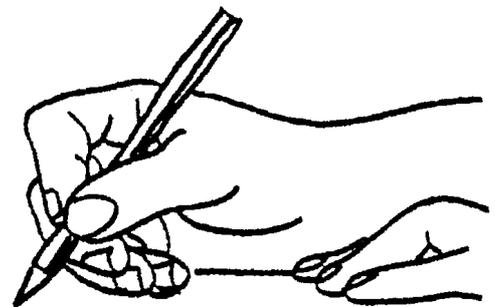
### 1.2.2.2 Griffarten

Von den biomechanisch komplizierten Greifmöglichkeiten der Hand sind in der Literatur funktionell und anatomisch bedeutende Griffe beschrieben worden (71). Unabhängig von feinmotorischen oder kraftproduzierenden Aufgabenstellungen steht die Stabilität des Griffes in jedem Fall im Vordergrund. Zwei Griffarten sollen an dieser Stelle näher beschrieben werden:

- Der in der vorliegenden Studie verwendete *Handgriff* (ähnlich dem *power grip*): Das Objekt wird von den Langfingern und dem opponierenden Daumen eingefasst; beide üben Kraft aus. Im *power grip* liegt der Daumen in der Ebene der Handfläche.
- Der in vergleichbaren Studien verwendete *Präzisionsgriff* (*precision grip*): Das Objekt wird zwischen den Flexoren des Zeigefingers und dem opponierten, abduzierten Daumen gehalten. Dies ermöglicht eine präzise Kraftkontrolle in Richtung und Betrag sowie die größtmögliche Nutzung der sensorischen Oberfläche beteiligter Finger



*Handgriff*



*Präzisionsgriff*

*Abb.1b: Handgriff und Präzisionsgriff (aus: Entwicklungsgruppe Klinische Neuropsychologie, Materialien für die Rehabilitation, 1994 (46))*

### 1.2.2.3 Kraftproduktion

Die an einem Objekt messbare Griffkraft resultiert aus dem Zusammenspiel intrinsischer und extrinsischer Muskelgruppen der Hand. Der Aktivitätsgrad der Muskelgruppen bei unterschiedlichen Kraftanforderungen lässt sich durch gleichzeitige elektromyografische Ableitung beurteilen.

Bei isometrischer Kraftproduktion überwiegt die Aktivität extrinsischer Handmuskeln, während intrinsische Muskeln einen stabilisierenden Einfluss ausüben (41) (s.o.). Letztere wirken auf Kräfte und Drehmomente an Metacarpal- und Phalangealgelenken ausgleichend und modulierend und verhindern somit eine Destabilisierung des Griffes. Insgesamt dient die Kokontraktion antagonistischer Muskelgruppen der Stabilisierung des vielgelenkigen Hand-Finger-Systems (58, 86).

Auch die Haltung des Unterarms wirkt sich auf die Kraftproduktion aus. In Supinationsstellung ist die erreichbare Maximalgriffkraft beispielsweise geringer als in Pronation (15).

#### 1.2.2.4 Neuroanatomie: Die Muskelinnervation

Die Extremitätenmuskulatur wird von den zweiten Motoneuronen (s.o.) innerviert, die im Vorderhorn des Rückenmarks liegen und Impulse aus dem motorischen Kortex erhalten. Auch Affenzen aus sensiblen Organellen in Haut, Sehnen und Muskeln erreichen spinale Motoneurone und werden zum Teil in Form spinaler Muskeleigenreflexe direkt motorisch beantwortet.

Sensible Informationen werden des Weiteren an motorische Zentren des *Hirnstammes* (*Nucleus ruber* und *Vestibulariskerne*) geleitet. Von dem Hirnstamm ausgehende, unwillkürliche Stell- und Haltere reflexe der Stützmotorik sorgen z.B. bei gleichzeitiger isometrischer Kraftproduktion für eine stabilisierende Tonusverteilung der Muskulatur (89). Die Haltungskontrolle unterstützt ferner den gezielten Griffkrafteinsatz bei beispielsweise bewegungsassoziierten Ladungskräften (48). *Kortikospinale und rubrospinale Bahnen* können nicht nur reflektorisch bzw. unwillkürlich, sondern auch willkürlich aktiviert werden. Dies ist der Fall, wenn einzelne Muskelgruppen z.B. der Finger bewegt werden oder antizipierten Ladungskräften entgegengewirkt werden soll (82).

Die inhibitorische Funktion der *Basalganglien* (*Globus pallidus*, *Nucleus caudatus*, *Thalamus*, *Putamen*, *Substantia nigra*) dient der Selektion von Bewegungen im Anschluss an zuvor von dem Kortex ausgewählte Bewegungsprogramme. Bei Bewegungen steigt die Entladungsrate zweier Drittel der Ganglienzellen, die mögliche andere, zeitgleiche willkürliche oder unwillkürliche, störende Bewegungen unterdrücken. Ein Drittel der Basalganglienzellen hingegen vermindert ihre Entladungsrate und erlaubt damit die Aktivierung derjenigen kortikospinalen Bahnen, welche die gewünschte Bewegung ausführen sollen. Schädigungen des *Nucleus caudatus* und des *Putamen* führen durch mangelnde Hemmung zu ungewollten choreoathetoiden, hemiballistischen Bewegungen, Schädigungen des *Globus pallidus* und der *Substantia nigra* resultieren –

vereinfacht dargestellt – durch gleichzeitige Aktivierung von Agonisten und Antagonisten zu Rigidität, Akinesie und Tremor (82).

Das *Kleinhirn* dient in erster Linie der Aufrechterhaltung optimaler Voraussetzungen für geplante Bewegungen. Es erhält Afferenzkopien aus dem Hirnstamm und sorgt für das Körpergleichgewicht (Kleinhirnkern: *Nucleus fastiguus*). Als zweites Steuerzentrum für Motorik und Kraftproduktion erhalten die Kleinhirnhemisphären in der Vorbereitungsphase von Bewegungen Afferenzen aus dem motorischen Kortex (über den *Tractus pontocerebellaris* in den *Lobus posterior*). Efferenzen an sämtliche Elemente des motorischen Systems mit Ausnahme der Basalganglien ermöglichen es dem Kleinhirn, auf jede motorische Aktivität Einfluss zu nehmen: Die Entladung der an einer geplanten Bewegung beteiligten Neuronengruppen wird erleichtert, Einzelbewegungen werden zu geordneten, kombinierten Bewegungsabläufen zusammengefasst. Die Fähigkeit des Kleinhirns, Bewegungsmuster bzw. motorische Efferenzen auch neu zu kombinieren, erklärt dessen Wichtigkeit bei Lernprozessen (82). Es konnte gezeigt werden, dass sich die Entladungsraten zerebellärer Motoneurone vor dem Heben eines Objektes objektspezifisch steigern und sie während des Hebens modifiziert werden (37). Ursächlich dafür wird die Beteiligung des Kleinhirns an der Kraft- und Bewegungsplanung durch Antizipation der gleichzeitig erforderlichen Haltungskontrolle vermutet. Der Reifung zerebellärer synaptischer Schaltkreise wird zudem eine ausschlaggebende Rolle bei der Entwicklung der Griffkraftkoordination zugeschrieben (28). Im Kindesalter wird die zeitgerechte, isometrische Kraftproduktion der Fingermuskulatur bei dem Halten und Transportieren von Gegenständen erlernt. Sie wird wesentlich durch die vom Kleinhirn gesteuerte Koordination einzelner Muskeleinheiten gewährleistet (Kleinhirnkern: *Nucleus dentatus* und *interpositus*). Kleinhirnläsionen führen zur Beeinträchtigung der Kraftdosierung und der Genauigkeit von Richtung, Distanz und Geschwindigkeit von Bewegungen (82).

Das *Großhirn* entwirft das Ziel von Krafteinsatz und Bewegung. Der Handlungsantrieb entspringt kortikalen bzw. subkortikalen Motivationsarealen. *Basalganglien* und *prämotorischer Kortex* dienen der Programmierung von Bewegungen, die *primär motorische Rinde* (Area 4) der Selektion von Bewegungsprogrammen. Die *prämotorischen* (Area 6) und *supplementär-motorischen Kortex* stellen verschiedene Strategien der Bewegungsausführung bereit. Die Pyramidenzellen des motorischen Kortex entsenden schließlich die elektrischen Impulse für die Bewegungsausführung, die nach Korrektur durch somatosensorische Areale (57) und Kleinhirn über den *Tractus corticospinalis* an die zweiten motorischen Neurone weitergeleitet werden.

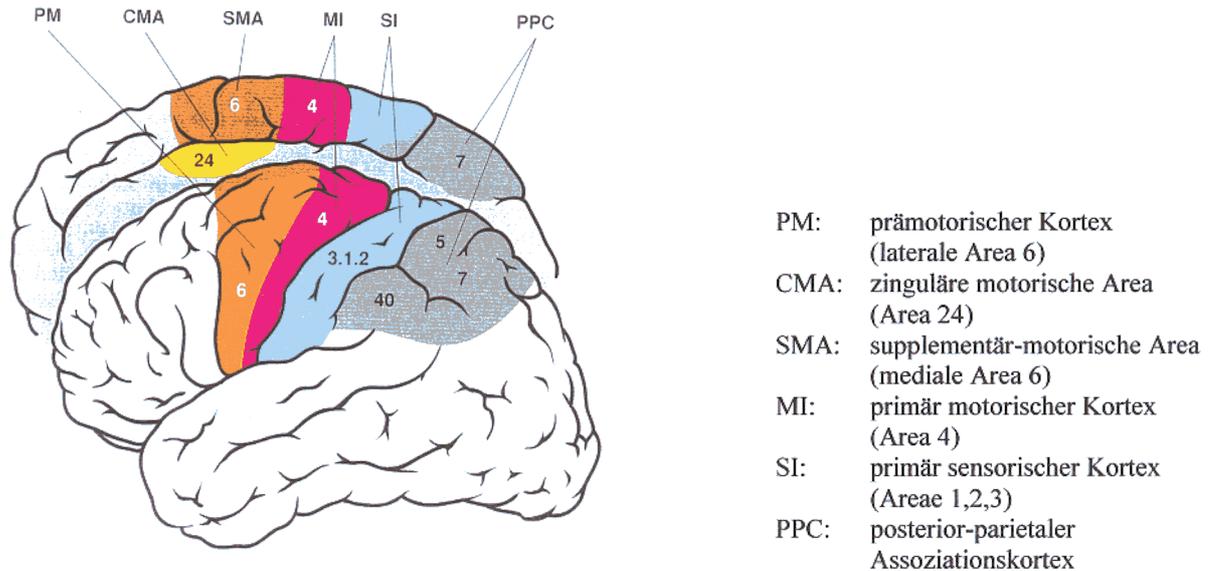


Abb. 1c: *Sensomotorische Repräsentationsfelder der menschlichen Hirnrinde* (aus: Schmidt-Schaible, Neuro- und Sinnesphysiologie, 2001, (49))

### 1.2.3 Zusammenfassung

Der Erfassung und Beurteilung statischer und dynamischer Griffkräfte geht das Verständnis entwicklungsneurologischer sowie anatomischer und biomechanischer Gesichtspunkte voraus. In dem Zentrum der Betrachtung steht dabei die Motorik der Hand, die abhängig von Fasertyp und Architektur der synergistisch und antagonistisch wirkenden Muskeln eine Bewegungs- und eine Kraftkomponente unterscheiden lässt. Die Griffkraft ist verantwortlich für die Stabilität eines in der Hand gehaltenen oder bewegten Objektes, verschiedene Griffarten stehen dazu zur Verfügung. Die Höhe der Griffkraft ist abhängig von der sensomotorischen Repräsentationen der Objekteigenschaften in der Hirnrinde und der motorischen Befehle an die Hand. Eine angemessene Kraftproduktion setzt die *entwicklungsbedingte Transformation neuraler Mechanismen* von unwillkürlichen Reflexen zu willkürlichen Bewegungen und die sukzessive Differenzierung der motorischen und somatosensorischen Neuronen sowie ihrer Verschaltungen in Gehirn, Hirnstamm, Kleinhirn und Rückenmark voraus. Ab dem frühen Jugendalter ist eine weitgehend automatisierte Koordination der Bewegungs- und Kraftkomponente der Handmotorik zu beobachten.

### 1.3 Beurteilung der Griffkraft

Aus der Darstellung der neurologischen, anatomischen, biomechanischen und neurophysiologischen Gesichtspunkte der Griffkraft ergibt sich eine Vielzahl von Parametern, anhand derer eine Beurteilung der Griffkraft möglich ist. Die folgende Zusammenfassung rückt jene Indikatoren in den Vordergrund, die hinsichtlich der kindlichen Entwicklung im Vorschulalter aussagekräftig und zudem praktisch relativ einfach zu erheben sind.

#### 1.3.1 Phänomenologische Darstellung der Handgeschicklichkeit

Im *phänomenologisch orientierten Grundschemata zur Dimensionalität der Handgeschicklichkeit* sind Parameter zur Beschreibung der Handmotorik zusammengefasst (72). Dabei kommt den Bewegungscharakteristika *Geschwindigkeit, räumliche Präzision* und *Kraftdosierung* eine besondere Bedeutung zu:

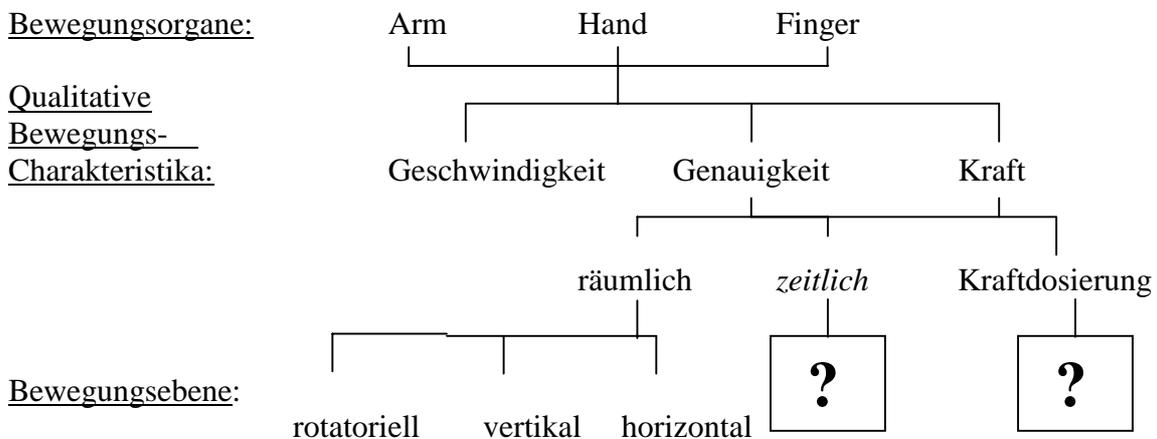


Abb. 2: Dimensionalität der Handgeschicklichkeit (aus: Neuhäuser: Störung der Psychomotorik 1988, (72))

In diesem Schema ist bisher nicht spezifiziert, wie die Dosierung der Griffkraft sowie die zeitliche Abstimmung von Bewegung und Kraft erfasst werden und zur Beurteilung der Handgeschicklichkeit beitragen können.

### 1.3.2 Isometrische Maximalgriffkraft

Mit einfachen Kraftdynamometern lässt sich das Maximum der Griffkraft bei verschiedenen Greifarten messen (68). Der Messwert wird abgelesen und dokumentiert. Im Vergleich mit Gleichaltrigen können niedrige Kraftbeträge erste Zeichen pathologischer peripherer oder zentraler neuronaler bzw. muskulärer Prozesse sein. Die Kraftproduktion bei gleichzeitig ablaufenden Bewegungen kann durch alleinige Messung der Maximalgriffkraft jedoch nicht beurteilt werden und ist daher nur von geringer diagnostischer Aussagekraft bei der Beurteilung der Griffkraftmodulation.

### 1.3.3 Interne Kraftkontrolle: Ökonomie und Antizipation der Griffkraft

Im Gegensatz zur Feststellung der Maximalkraft (s.o.) erhoben Studien mit gesunden erwachsenen Versuchspersonen (87) und Kindern (27) die Differenz der individuellen minimal eingesetzten Griffkraft und der biomechanisch minimal nötigen Griffkraft (*safety margin*). Der *safety margin* war um so höher, je unsicherer der Griff empfunden wurde. Es wurde also kompensatorisch mehr Kraft eingesetzt als eigentlich erforderlich war. Der Krafteinsatz erfolgte unökonomisch. Ein unökonomischer Krafteinsatz wurde immer dann beobachtet, wenn mit unbekanntem Objekteigenschaften gearbeitet werden sollte. Erwachsene konnten dabei bereits nach wenigen Versuchsdurchgängen ihre Griffkraft wieder minimieren (vgl. (87)). Die Objekteigenschaften waren durch *interne Repräsentation* in die Bewegungs- und Kraftplanung integriert worden und konnten zur *Ökonomisierung* des Griffkrafteinsatzes genutzt werden (34). Die *Kraftökonomie* kann demnach als Indikator für die Griffkraftkontrolle dienen.

Im Kindesalter entwickelt sich die bei Erwachsenen beobachtete Fähigkeit, Eigenschaften eines Objektes zu speichern und die Griffkraft bei deren Transport ökonomisch zu dosieren (27). Ab dem 5. Lebensjahr beginnen die Kraftmaxima bei einfachen Hebeversuchen geringere Werte anzunehmen, wobei sie jedoch zunächst signifikant höher als im Erwachsenenalter bleiben.

Grundsätzlich wurde sowohl für Erwachsene als auch für Kinder festgestellt, dass im Verlauf einfacher Vertikalbewegungen des Armes die auf ein in der Hand gehaltenes Objekt ausgeübte Kraft zeitgleich mit den biomechanischen Ladungskräften steigt bzw. fällt (87, 27). Die Tatsache, dass die Griffkraftdosierung zeitlich parallel zur Bewegung erfolgt und ihr nicht „nachhinkt“, lässt darauf schließen, dass die bei Bewegungen erforderliche Kraft vorhergesehen bzw. *antizipiert* werden kann (vgl. Abb. 3a).

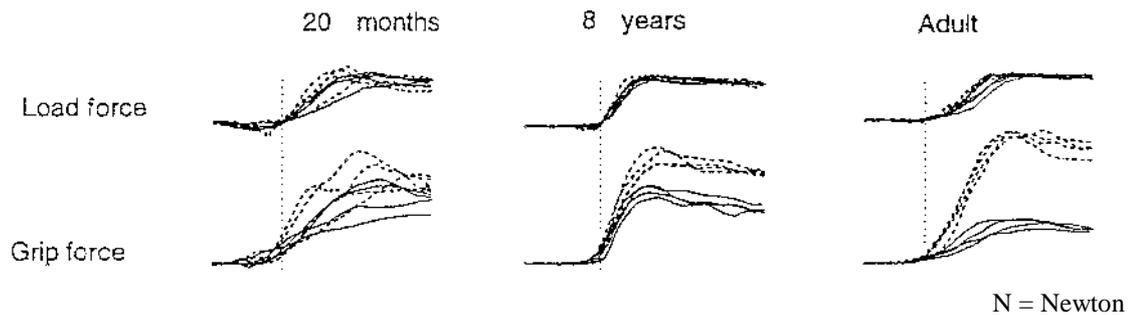
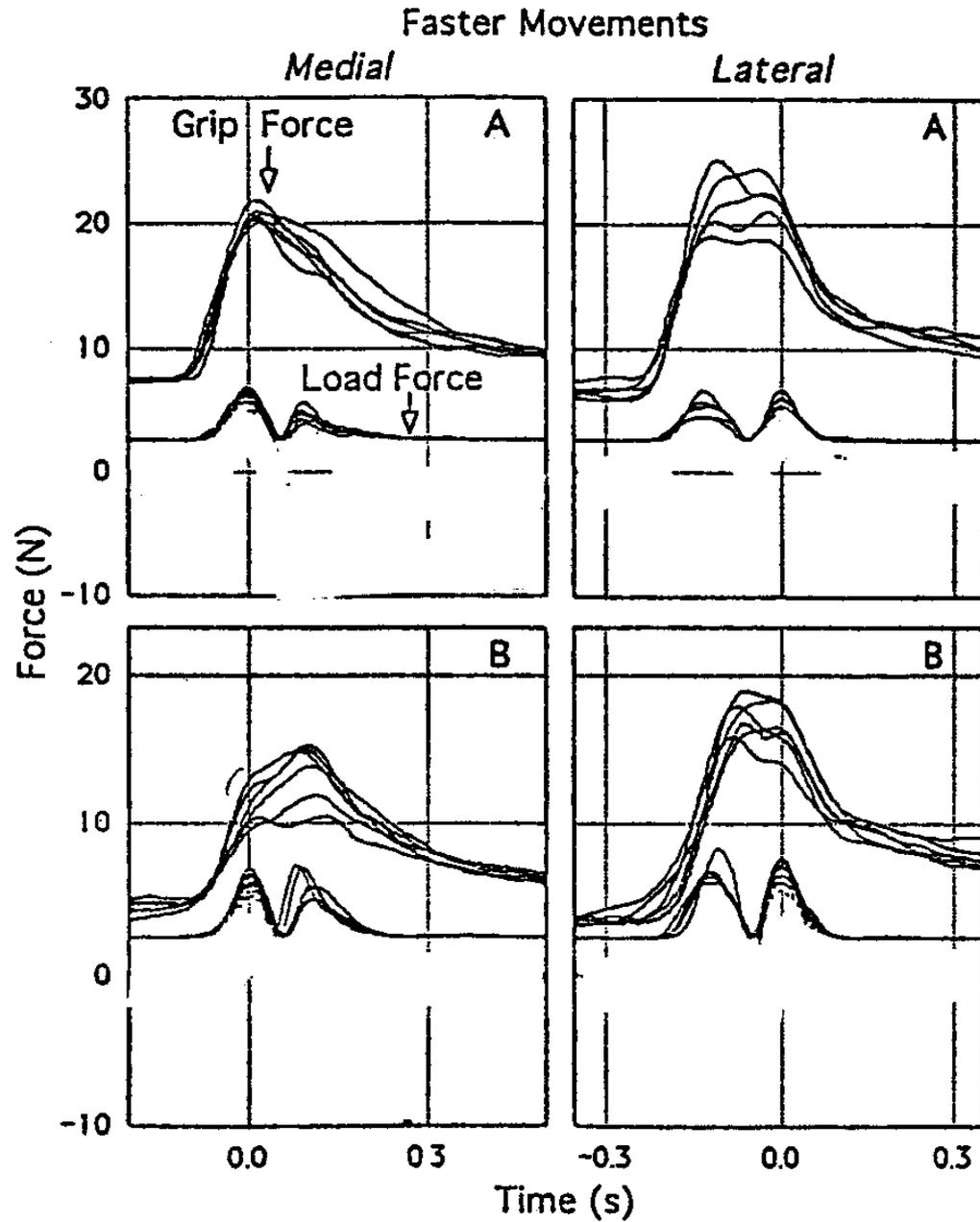


Abb. 3a: Parallele Änderung von Ladungskraft- und Griffkrafttrajektorien bei 4 wiederholten Hebevorgängen mit verschiedenen Objektflächen (gepunktet: Seide, durchgezogen: Sandpapier) eines 20-monatigen, 8-jährigen und erwachsenen Probanden. Die vertikale Linie markiert den Beginn der Kraftproduktion (aus: Forssberg et al.: *Development of human precision grip. IV: Tactile adaptation of isometric forces to the frictional condition*, 1995 (28))

Griffkräfte im Verlauf zyklischer Armbewegungen mit im Präzisionsgriff gehaltenem zylindrischen Objekt (0,26kg) sind bisher lediglich für Erwachsene ( $n = 11$ ) untersucht worden (25). Für repetitive Bewegungen in der Horizontal- und Vertikalebene konnte wie für einzelne Vertikalbewegungen bestätigt werden, dass Griff- und Ladungskräfte aneinander in der Dosierung angepasst sind und im zeitlichen Verlauf gleichsinnig moduliert werden (Abb. 3b). Die Planung des Griffkrafteinsatzes ist damit integraler Bestandteil der Bewegungsplanung.



s = Sekunde N = Newton

Abb. 3b: Änderung von Griffkraft- und Ladungskrafttrajektorien bei schnellen repetitiven horizontalen Armbewegungen zweier Probanden A und B (modifiziert nach: Flanagan et al.: *Modulation of grip force with load force during point-to-point arm movements*, 1993 (25))

### 1.3.4 Externe Kraftkontrolle: Motorische Antwort auf taktile Afferenzen

Unter externer Kraftkontrolle ist zu verstehen, dass die applizierte Kraft des Probanden neben der Berücksichtigung von Objekteigenschaften (interne Kraftkontrolle) auf Kräfte reagiert, die in dem Bewegungsverlauf am Objekt entstehen. Diese Kräfte setzen sich vor allem aus dem Objektgewicht und der Objektbeschleunigung zusammen und beruhen im Wesentlichen auf der Gravitationskraft (2).

Die Kräfte, die auf das Objekt wirken, machen sich an der Finger/Objekt-Kontaktfläche als Reibungskräfte bemerkbar und destabilisieren den Griff (89). Für einen sicheren Griff muss die Griffkraft auf das Objekt aber in jedem Moment mindestens so groß sein wie die entstehende Reibungskraft zwischen Finger und Objektoberfläche (*Newtonsches Gesetz*) (2). Diese Reibung wird als taktile Information von sensiblen Hautorganellen über die Hinterhörner des Rückenmarks an die somatosensorische Großhirnrinde gemeldet (49). Nach Integration der somatosensorischen Informationen in das motorische Programm erfolgt die geplante Bewegung mit entsprechend dosierter Griffkraft. Diese auf peripherem *Feedback* beruhende Kraftmodulation wird als *closed loop* bezeichnet und geht von einer nur ungenügenden Antizipation auftretender Ladungskräfte aus. Die Änderung der Griffkraft pro Zeit (*Kraftrate*) zeigt eine charakteristische stufenweise Anpassung der Griffkraft an sich ändernde Reibungseigenschaften (27).

Im Gegensatz dazu zeichnet sich die *open loop* Kontrolle durch einen einphasigen Griffkraftanstieg aus, dessen Höhe und Zeitpunkt antizipiert werden. Die Griffkraft Erwachsener wird beispielsweise überwiegend im Sinne dieser *offenen Schleife* zusammen mit der Entsendung des Bewegungsbefehls dosiert und ggf. nach taktilem Feedback moduliert (56). Folglich entstehen nur kurze Latenzzeiten zwischen Anstieg der Reibungskraft und Anstieg der Griffkraft (59). Diese geringe Latenz von 60-80ms spricht für hochgradig automatisiert ablaufende, neurale Mechanismen zur Griffkraftmodulation (55). Wird der motorische Befehl für die Kraftänderung durch eine sensible Afferenz ausgelöst, dann wird dieser mit dem motorischen Programm der Zielbewegung abgeglichen. Dieser Regulationsmechanismus wird auch als automatische Subroutine oder *long loop* bezeichnet (55). Durch eine Afferenzkopie an den somatomotorischen Kortex erfolgt gleichzeitig ein kontinuierliches *updating* der internen Repräsentation der Objekteigenschaft (s.o.).

### 1.3.5 Automatisierung des Griffkrafteinsatzes

In dem vorangegangenen Abschnitt wurden verschiedene Möglichkeiten zur Beurteilung der Griffkraft dargestellt. Um Aussagen über den Grad der motorischen Entwicklung von Kindern im Allgemeinen und des Griffkrafteinsatzes im Speziellen machen zu können, soll die Reife zugrunde liegender neuraler Mechanismen beurteilt werden. Reife synaptische Verschaltungen gekonnter motorischer Abläufe spiegeln sich in einem hohen Automatisierungsgrad wider.

Im Folgenden wird zusammengefasst, welche Parameter der vorgestellten Indikatoren eines automatisierten Griffkrafteinsatzes im Kindesalter herangezogen werden können.

#### 1.3.5.1 Höhe und Variabilität der Kraftamplitude

Gesunde Erwachsene zeigen einen ökonomischen Griffkrafteinsatz und eine geringe Variabilität der Griffkraftamplituden (87). Bei jedem Heben eines Objektes wird für eine ausreichende Griffstabilität zusätzlich zur minimal nötigen Kraft ein individueller Sicherheitssummand aufgewendet (*safety margin*). Jeder Hebevorgang erfolgt idealerweise mit identischen Kraftamplituden, die im Sinne des *open loop* in einem einzigen Kraftanstieg erzielt werden.

Bei Kindern unter zwei Jahren hingegen zeigt sich eine hohe Variabilität der Kraftamplitude (27). Der erforderliche Kraftaufwand kann noch nicht ausreichend abgeschätzt werden, um die Griffkraft ähnlich den Erwachsenen ökonomisch zu dosieren.

#### 1.3.5.2 Kraftänderung pro Zeiteinheit

Bei Kindern unter zwei Jahren zeigte sich in der Kraftänderung pro Zeiteinheit (*Kraftrate*) ebenfalls eine hohe Variabilität (27). Phänomenologisch drückt sich die unsichere Kraftdosierung in vielzackigen Griffkraftanstiegskurven aus. Der Kraftanstieg erfolgt nicht im Sinne der *open loop* Regulation mit einer einzigen Kraftspitze sondern über die externe Kontrolle des taktilen *Feedbacks* (s.o.). Ab dem 2. Lebensjahr beobachtete *Forssberg* zunehmend glockenförmige, eingipflige Kraftratenkurven, welche eine antizipierte Kraftproduktion beweisen (27).

#### 1.3.5.3 Die Latenzdauer

Bei Kindern der ersten beiden Lebensjahre wurden im Vergleich zu älteren Kindern und Erwachsenen sehr lange Zeiten zwischen Ladungskraftänderung und Griffkraftanpassung gemessen (27). Zunehmend kürzer werden die Latenzzeiten ab dem 2. Lebensjahr für alle Abschnitte des Hebevorganges. Die *Feedback*-Kontrolle (*closed loop*) geht in die antizipatorische *Feedfor-*

ward-Kontrolle (*open loop*) über, mit der der Zeitpunkt der Kraftänderung im Voraus geplant werden kann. Im Erwachsenenalter schließlich korreliert bei repetitiven Bewegungen der Zeitpunkt des Auftretens der Kraftspitzen enger mit dem Zeitpunkt der Ladungskraftänderung als die entsprechenden Amplitudenwerte (25). Dies zeugt davon, dass bei komplexen Armbewegungen das Krafttiming höher automatisiert ist als die Kraftdosierung.

In der Literatur werden Latenzen zwischen Reiz und Muskelreaktion, die weniger als 40ms betragen, als spinale *short latency Reflexe* bezeichnet (54). Latenzen um 90ms werden supraspinalen Reflexbögen zugeordnet (57). Sie zeigen einen automatisierten Einsatz der Muskeln für Kraft und Bewegung an. Latenzen, die 110ms überschreiten, weisen aufgrund ihrer langen Dauer auf die Beteiligung des motorischen Kortex bei der Bewegungs- und Kraftplanung hin.

### 1.3.6 Zusammenfassung

Der Erfassung statischer und dynamischer Griffkräfte folgt ihre Beurteilung hinsichtlich der Kriterien „Ökonomie“, „Antizipation“ und „Automatisation“. Die Definition dieser Beurteilungskriterien erweitert die bisher gängigen Schemata zur Handgeschicklichkeit um die Dimensionen „Griffkraftdosis“ und „zeitlicher Verlauf des Griffkrafteinsatzes“.

Die Griffkraftdosis und der zeitliche Verlauf des Krafteinsatzes lassen sich in ihrem Verhältnis zu den im Bewegungsablauf auftretenden Trägheitskräften beurteilen. Kann die Höhe der auf das bewegte Objekt einwirkenden Trägheitskraft antizipiert, d.h. vorhergesehen werden, erfolgt der Krafteinsatz in seiner Höhe angepasst bzw. ökonomisch. Die Änderung der Griffkraft ist in der grafischen Darstellung bereits im Kindesalter annähernd parallel zu der Änderung der Trägheitskraft am Objekt. Wenn allerdings die interne Kontrolle des Griffkrafteinsatzes, die auf internen Objektrepräsentanzen beruht, von der externen Kontrolle taktiler Afferenzen dominiert wird, kommt es zu einem höheren Griffkrafteinsatz und einem zeitlich stärker versetzten Auftreten von Trägheits- und Griffkraftmaxima (Latenz).

Von einem automatisierten Griffkrafteinsatz wird schließlich bei geringer Höhe und Variabilität der Kraftamplitude, lediglich einer einmaligen Kraftänderung pro Zeiteinheit („eingipflige“ Kraftrate) und geringen Latenzdauern gesprochen.

### ***1.4 Indikationen und Methoden zur Griffkraftmessung***

Die Beurteilung der motorischen Entwicklung im Kindesalter sollte bei jeder Routineuntersuchung erfolgen. Insbesondere, wenn Pathologien auf muskulärer oder neuronaler Ebene vermutet werden, oder Raumforderungen bzw. traumatische Ereignisse zu motorischen Auffälligkeiten geführt haben, ist neben der klinischen Untersuchung eine Funktionsbeurteilung der Griffkraftmodulation mit neurophysiologischen Messmethoden indiziert.

## 2 Fragestellung

Bisherige Untersuchungen haben für einzelne Vertikalbewegungen zeigen können, dass sich die Griffkraft bereits im frühen Kindesalter an auftretende Ladungskräfte anpasst (27). In den ersten Lebensjahren stellt sich eine Automatisierung des Griffkrafteinsatzes ein, d.h. die Griffkraftdosierung wird ökonomisch, und das Griffkrafttiming erfolgt in genauer zeitlicher Abstimmung zur aktuell ausgeführten Bewegung. Vor dem 11. Lebensjahr wird der für Erwachsene bekannte Automatisationsgrad nicht erreicht (27).

Im Alltag vollziehen Kinder ein breites Spektrum verschiedener Bewegungsmuster. Für die Messung des Griffkrafteinsatzes bei verschiedenen Bewegungsvorgängen, wie wiederholten und sehr schnellen Bewegungen, existierte für Kinder bisher kein geeignetes Messinstrumentarium. Eine Beurteilung dynamischer Griffkräfte war daher weder für kranke noch für gesunde Kinder möglich.

Die vorliegende Studie hatte zum Ziel, die Griffkraft gesunder Vorschulkinder bei dynamischen Aufgaben zu quantifizieren. Sie bediente sich eines in der Erwachsenenneurophysiologie evaluierten Mess-Systems (Greifen-Heben-Transportieren *GHT*, (43)). Dieses Mess-System, das eine gleichzeitige Aufzeichnung von Bewegung und Kraft ermöglicht, wurde für den Einsatz in der Pädiatrie modifiziert. 125 Kinder verschiedener Kindergärten Münchens bildeten das Standardisierungskollektiv, das die Bewertungsgrundlage für die Beurteilung motorischer Defizite bei entwicklungsneurologisch auffälligen Kindern bildet.

Die Untersuchung dieses Kollektivs sollte folgende Fragestellungen klären:

### **2.1 *Wie wird im Vorschulalter die Griffkraft an Ladungskräfte angepasst, die durch Armbewegungen entstehen?***

- 2.1.1 Zunächst gilt es, die grundsätzliche Hypothese zu prüfen, ob die Griffkraft bei repetitiven Bewegungen entsprechend den bei Bewegungen entstehenden Ladungskräften moduliert wird. Griffkrafteinsatz und Ladungskraft sollen zur raschen Übersicht phänomenologisch dargestellt werden.
- 2.1.2 Die quantitative Analyse soll die Frage klären, ob das Verhältnis von Kraft und Bewegung konstant bleibt oder ob es sich in Abhängigkeit von der Bewegungsart bzw. den Eigenschaften des Probanden ändert.
- 2.1.3 Neben dem Verhältnis der Kräfte soll geprüft werden, ob die Maxima der Griff- und Ladungskraft zum gleichen Zeitpunkt auftreten oder mit einer gewissen Latenz einander folgen.

## **2.2 *Ist die Griffkraftanpassung ebenen-, richtungs- und geschwindigkeitsabhängig?***

Erwachsenenstudien deuten auf Unterschiede im Griffkrafteinsatz bei verschiedenen Bewegungsformen hin (25).

- 2.2.1 Unter der Annahme, dass sich die Griffkraft verschiedenen Bewegungsformen anpasst, wird geprüft, ob die Güte der Griffkraftmodulation abhängig ist von der Geschwindigkeit, der Richtung oder der Ebene, in der die Bewegung ausgeführt wird. Dabei wird postuliert, dass Bewegungen in der Vertikalebene mit einer engeren zeitlichen Kopplung von Griffkraft und Ladungskraft ausgeführt werden und einen im Verhältnis zur Ladungskraft geringeren Griffkrafteinsatz erfordern als sagittale Bewegungen.
- 2.2.2 Die Maximalgeschwindigkeiten sind bei Einzelbewegungen höher als bei Repetitivbewegungen.
- 2.2.3 Der Griffkrafteinsatz einzelner Bewegungen ist grundsätzlich niedriger, als jener wiederholter Bewegungen.

## **2.3 *Findet im Vorschulalter eine signifikante Entwicklung der Fähigkeit zur Griffkraftanpassung bei linearen Armbewegungen statt?***

Im Vorschulalter werden wesentliche grob- und feinmotorische Fähigkeiten erlernt. Ab dem 2. Lebensjahr wird der für eine Bewegung notwendige Griffkrafteinsatz vorhergesehen und in den Bewegungsablauf integriert (27).

- 2.3.1 Eine signifikante Ökonomisierung des Krafteinsatzes und eine enge zeitliche Anpassung von Griffkraft und Ladungskraft werden für die Verlaufsbeobachtung 3- bis 6-jähriger Kinder erwartet.
- 2.3.2 Für die vorliegende Studie leitet sich in diesem Zusammenhang die Vermutung ab, dass die Fähigkeit zur *Antizipation* des Griffkrafteinsatzes im Vorschulalter weiterhin verbessert wird.

## 3 Methodik

### 3.1 Die Probandengruppe Vorschulkinder

#### 3.1.1 Definition der Zielgruppe

##### *Zielgruppe*

Zur Erhebung der Meilensteine der Entwicklung der Griffkraft wurden Kinder im Alter von drei bis sechs Jahren mit unauffälliger motorischer und kognitiver Entwicklungsanamnese untersucht. Sie wurden aus Kindergärten und Vorschulen rekrutiert, wobei Kindergartenleitung und Eltern zunächst durch Vorträge informiert und zur Teilnahme an der Studie ermutigt wurden.

Bei der Anmeldung der Kinder erfolgte eine schriftliche Einverständniserklärung durch die Erziehungsberechtigten.

##### *Pilotgruppe (N = 14)*

Zur Evaluierung der Messmethodik wurde mit der Apparatur zunächst eine kleine *Pilotgruppe* untersucht, der Versuchsplan entwickelt und das Studienpersonal eingearbeitet. Aus organisatorischen Gründen wurden die Teilnehmenden der Pilotstudie vornehmlich aus dem Montessori-Kindergarten (Träger: *Aktion Sonnenschein – Hilfen für das mehrfach behinderte Kind e.V.*) rekrutiert, der dem Kinderzentrum München benachbart ist.

Die Pilotgruppe ( $N_{\text{ges}} = 14$  Kinder) setzte sich zusammen aus vier dreijährigen, vier vierjährigen und sechs fünfjährigen Kindern.

##### *Hauptgruppe (N<sub>ges</sub> = 125)*

In die Hauptgruppe wurden zusätzlich sechsjährige Kinder aufgenommen. Das ergab bei vier Altersgruppen mit ca. 30 Kindern in jeder Altersgruppe eine Gruppengröße von 125 Kindern.

Um die Untersuchungsbedingungen konstant zu halten, wurde der größte Teil der Kinder aus nur einem Kindergarten erfasst (*St. Joseph-Kindergarten, München*). Die Einbeziehung weiterer Münchener Kindergärten und Krippen mit Kindern verschiedenen sozio-ökonomischen und kulturellen Hintergrundes trug zur Repräsentativität der untersuchten Stichprobe für Kinder im Vorschulalter bei.

Die Hauptgruppe setzte sich wie folgt zusammen:

*Kooperierende Institutionen:*

Den Leiterinnen und Leitern der kooperierenden Kindergärten sei an dieser Stelle ausdrücklich für ihre Unterstützung gedankt. Ohne ihr Engagement hinsichtlich Organisation und Logistik wäre die Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht möglich gewesen.

<i>St. Josephs</i> Kindergarten, München Nord	90	Kinder
Privater Kindergarten, Heiglhofstraße, München	28	Kinder
<i>Montessori</i> -Kindergarten, Heiglhofstraße, München	7	Kinder

*Zur Untersuchung angemeldete Kinder:*

**3 Jahre:** 34 Kinder (21 Mädchen und 13 Jungen),

**4 Jahre:** 33 Kinder (16 Mädchen und 17 Jungen),

**5 Jahre:** 31 Kinder (16 Mädchen und 15 Jungen),

**6 Jahre:** 27 Kinder (13 Mädchen und 14 Jungen).

### 3.1.2 Kriterien zur Auswahl der Probanden: die klinisch-neurologische Untersuchung

#### 1. Allgemeinpädiatrische Vorsorgeuntersuchung

Kinder mit motorischen Auffälligkeiten, Entwicklungsverzögerungen oder schweren visuellen oder auditiven Beeinträchtigungen, die in den allgemeinen Vorsorgeuntersuchungen beim Kinderarzt bereits festgestellt worden waren, wurden nicht in die Stichprobe aufgenommen.

#### 2. Klinisch-neurologische Untersuchung im Rahmen der Studie

Für die Studie wurden ein Anamnese- und ein klinisch-neurologischer Untersuchungsbogen erarbeitet (vgl. Anhang). Der Untersuchungsbogen setzt sich aus Elementen der *Denver Entwicklungsskalen* (79) und der standardisierten neuropädiatrischen Untersuchung von *Touwen und Prechtl* (83) zusammen und prüft Sensomotorik, Extremitätenkoordination und Feinmotorik. Die Untersuchung ist altersspezifisch, entwicklungsbezogen und reproduzierbar.

Die Einteilung der Untersuchungskomponenten in vier Kategorien erfolgte in Abhängigkeit von der Sensitivität des neurologischen Teilbereichs für Entwicklungsdefizite.

Jede Untersuchungskomponente wird mit einem Punkt bewertet. Untersuchungskomponenten (z.B. „Einbeinstand“) werden zu neurologischen Teilbereichen (z.B. „Verhalten und Kooperation“) zusammengefasst. Jeder Teilbereich wurde einer der vier Kategorien zugeordnet und jede Kategorie mit einem Bewertungsfaktor (eins bis vier, vgl. Tabelle 1) belegt. In diesem Bewertungsverfahren kann eine Untersuchungskomponente maximal vier Punkte in die Gesamtwertung einbringen. Als „neurologisch auffällig“ wurde ein Proband mit einer Gesamtpunktzahl von > 10 definiert und aus der Datenauswertung ausgeschlossen.

*Tabelle 1: Bewertungsfaktoren der klinisch-neurologischen Untersuchung*

<i>Faktor 1</i>	Verhalten und Kooperation Allgemeine organische Untersuchung (Cor, Pulmo, Abdomen, Extremitäten, Skelett)
<i>Faktor 2</i>	Sensibilität (epikritisch und propriozeptiv) Muskelreflexe (Eigen- und Fremdrelexe) Feinmotorik/Handgriffe (Pinzetten-, Faust-, Lateralitätsgriff, 46)) Anamnese Grobmotorik/kognitive Entwicklung (Sitzen, Stehen, Laufen, Treppensteigen)
<i>Faktor 3</i>	Eigenanamnese (Asphyxie, Krampfleiden, Bewegungstherapie); Hirnnerven I-XII
<i>Faktor 4</i>	<b>kortikospinales, extrapyramidales, zerebelläres System</b> <b>Feinmotorik</b> (Diadochokinese, Fingeropposition) <b>Grobmotorik</b> (Kraftstatus, Bewegung und Koordination)

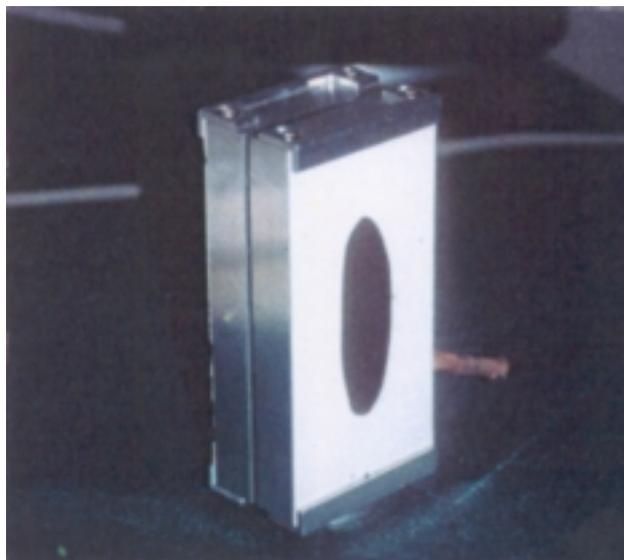
### ***3.2 Technische Voraussetzungen zur Messung der Griffkraft***

#### **3.2.1 Das Greifen-Heben-Transportieren-Mess-System**

Der Griffkrafteinsatz bei gleichzeitigen Armbewegungen sollte objektiviert und quantifiziert werden. Das in der Erwachsenenneurologie evaluierte Messinstrument *Greifen-Heben-Transportieren (GHT (42))* wurde dazu kindgerecht modifiziert (vgl. Abb. 4). Die Beschleunigung des Messobjektes in drei Raumrichtungen und die applizierte Griffkraft können zeitgleich registriert werden. Dazu sind Sensoren in dem quaderförmigen Messobjekt integriert, das mittels eines Kabels frei beweglich an einen Verstärker und weiter an einen Computer angeschlossen ist. Die Spannungssignale der Sensoren (mV) sind proportional zum Messwert. Sie werden mit Hilfe des Verstärkers auf Werte im Bereich von 0 bis 5V erhöht und von einer Analog-Signalwandlerkarte (12 bit, AT-Mio 6-10-E, National Instruments) digitalisiert. Die Datenpunkte werden schließlich mit einer Abtastfrequenz von 100Hz von einem Computer gespeichert. Der Computer steuert außerdem den Ablauf und die Eichung der Messapparatur.

*Technische Daten des Messobjektes:*

Größe:	100 x 32 x 50mm (h x b x t)
Gewicht:	ca. 200g
Oberfläche:	weiße Kunststoffplatten, Fingermarkierungen: Sandpapier



*Abb. 4: Messobjekt zur bewegungskorrelierten Griffkraftanalyse*

### 3.2.2 Messung der Kraft

Der Kraftsensor ist mit den Greifflächen des Objektes so verbunden, dass die Kraftmessung unabhängig von der Fingerposition durchgeführt werden kann. Die Fingermarkierungen wurden zusätzlich mit Markierungen aus Sandpapier im Zentrum der Greifflächen definiert.

Die Haftreibung zwischen Sandpapier und Hautoberfläche der Finger gilt als konstant. Um individuelle Reibungseigenschaften der Haut der Finger zu minimieren, wurden die Hände vor Messbeginn gewaschen.

Der hochpräzise Kraftsensor erfasst Werte bis 70N (Genauigkeit +/- 0,2 N). Die Kraftmessung basiert auf einer Änderung des elektrischen Widerstandes bei der Auslenkung von metallischen Dehnmess-Streifen (DMS) durch die Griffkraftapplikation.

Das Mess-System wurde zehn Minuten vor der Messung in Betrieb genommen und eine Nullpunkteichung durchgeführt. Die Eichung der Verstärkung erfolgt mit einem Eichgewicht (15N - 25N).

### 3.2.3 Messung der Beschleunigung

Das Objekt enthält drei paarweise angeordnete, orthogonale, marktübliche Beschleunigungssensoren in den Ebenen X (sagittal), Y (horizontal) und Z (vertikal) mit einem Messbereich von -60 bis + 60m/s<sup>2</sup> (Genauigkeit +/- 0,03m/s<sup>2</sup>).

Aufrecht stehend zeigt der Z-Sensor die Erdbeschleunigung ( $g = 9,81\text{m/s}^2$ ), die X- und Y-Sensoren 0m/s<sup>2</sup> an.

Aufwärts-, Medial- und Vorwärtsbewegungen werden mit positiven Messwerten registriert.

### 3.2.4 Zusammenfassung

Die Messung der Griffkraft erfolgte mit einem kindgerecht modifizierten, in der Erwachsenen-neurologie evaluierten Messinstrument (GHT). Applizierte Griffkräfte und am Messobjekt auftretende Beschleunigungen konnten gleichzeitig mittels eines Kraftsensors (Messbereich bis 70N) bzw. dreier paarweise angeordneter Beschleunigungssensoren (Messbereich bis 60m/s<sup>2</sup>) entsprechend der Ebenen im Raum aufgezeichnet werden.

## 3.3 Praktische Durchführung der Griffkraftmessung

### 3.3.1 Versuchsaufbau

#### *Prüfung der Fingersensibilität*

Vor Versuchsbeginn wurde die *Fingersensibilität* mit dem *Semmes-Weinstein-Testsystem* geprüft, bei dem kalibrierte Monofilamente auf die Haut aufgesetzt werden (7). Durch unterschiedliche Dicke und Länge der Filamente wird die Stimulusintensität variiert und das epikritische Differenzierungsvermögen getestet.

#### *Positionierung der Kinder zur Messapparatur*

Konstante Untersuchungsbedingungen wurden durch gleichlautende Aufgabenstellungen sowie durch eine definierte Stellung der Kinder zur Messapparatur sichergestellt. Die Positionierung der Kinder, je nach Aufgabe mit dem Rumpf parallel oder frontal zur Messapparatur, sollte einen maximalen Bewegungsspielraum ermöglichen. Das von dem in der Hand gehaltenen Messobjekt zu dem aufzeichnenden Computer führende Kabel wurde zur Minderung von Störeinflüssen am Arm des Probanden fixiert, ohne dessen Bewegungsspielraum einzuschränken.

#### *Haltung und Bewegung der oberen Extremität*

Die *Haltung des Armes* bei statischen Aufgabenstellungen erfolgte standardisiert gemäß der Empfehlung der *American Society of Hand Therapists* mit adduzierter Schulter, die sich wie das Handgelenk und der Unterarm in Neutral-Null-Stellung bei zu 90° flektiertem Ellenbogengelenk befand (22).

Die Änderung der Gelenkstellung bei dynamischen Aufgaben ist in den Abbildungen 5a und b dargestellt. Bewegungen in der Vertikalebene wurden durch Ante- und Retroversion des Armes in dem Schultergelenk (ca. 60° - 0° - 20°) und Flexion/Extension in dem Ellenbogengelenk (ca. 90° - 110°) ausgeführt. Bei Sagittalbewegungen erfolgten Streckung und Beugung in dem Ellenbogen (ca. 170° - 45°) mit einer leichten Mitbewegung der Schulter. Die Bewegungen sollten geradlinig, aber auch möglichst ungezwungen durchgeführt werden.

Das Messobjekt wurde mit der dominanten Hand im sogenannten *Handgriff* gehalten (vgl. 1.2.2.2), d.h. Langfinger und Daumen wurden auf sich gegenüberliegenden Greifflächen des Objektes positioniert.

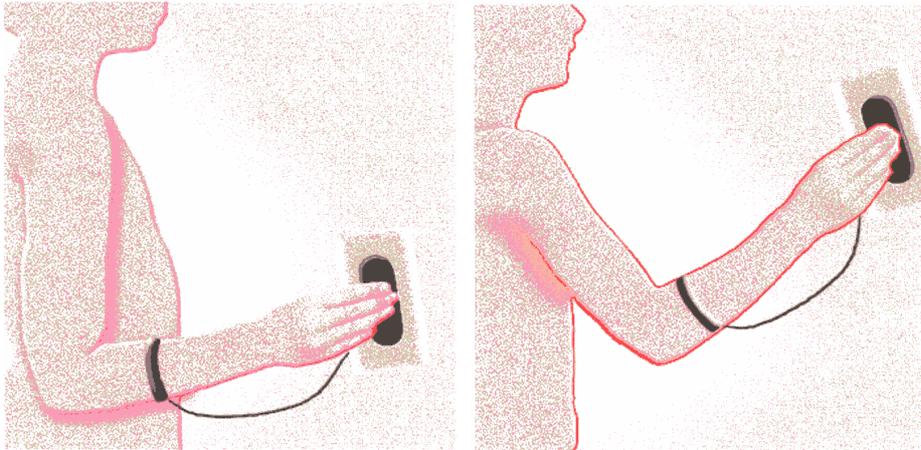


Abb. 5a: *Haltung und Armbewegung des Probanden bei dynamischen Kraftmessungen, vertikal*



Abb. 5b: *Haltung und Armbewegung des Probanden bei dynamischen Kraftmessungen, sagittal*

### 3.3.2 Aufgaben zur statischen und dynamischen Kraftmessung

#### *Evaluierung der Aufgabenstellung durch die Pilotstudie*

Zunächst wurde das Messinstrumentarium *Greifen-Heben-Transportieren* an Erwachsenen hinsichtlich technischer Funktion, Reproduzierbarkeit der Messergebnisse und Auswertbarkeit der Ergebniskurven geprüft. Die praktische Durchführung mit Kindern und die Auswertung der Messdaten wurden an einer Pilotstudie erprobt und für die Hauptstudie optimiert.

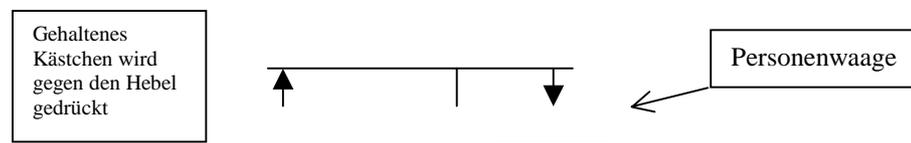
#### *Aufgaben*

Die *Arbeitsanweisungen* erfolgten vor Beginn jeder Aufgabe. Auf Verständnisschwierigkeiten der Kinder wurde eingegangen. Folgende Aufgaben wurden durchgeführt (vgl. Anhang):

### Statische Aufgaben

Die individuelle *isometrische Maximalgriffkraft* wurde durch dreimalige maximale Griffkraftapplikation auf das Messobjekt ermittelt. Der Mittelwert ging in die Auswertung ein.

Die Messung der sogenannten *Maximalen Hebekraft* und der korrespondierenden *Griffkraft bei maximaler Hebekraft* gelang durch Ansetzen des Objektes unter den Hebelarm einer Tischwippe (vgl. Skizze). Aus dieser Position wurde durch die Oberarmmuskulatur Kraft gegen den Hebel produziert, die am anderen Hebelende von einer Personenwaage als Gewichtskraft angezeigt wurde. Gleichzeitig registrierten die Sensoren die Griffkraft am Objekt. Auch die Werte für die *Maximale Hebekraft* und die *Griffkraft bei maximaler Hebekraft* wurden aus drei Einzelmessungen gemittelt.



Skizze: Messung der Maximalen Hebekraft, gleichzeitige Messung der Griffkraft

### Dynamische Aufgaben

Bei *dynamischen* Aufgaben erfolgt die Griffkraftmessung bei gleichzeitig ablaufenden Bewegungen. Bewegungen wurden in der Vertikalebene (**VR**, **VES**, **VEL** aufwärts/abwärts, vgl. Abb. 6 a-d) und in der Sagittalebene (**SR**, **SEL** vorwärts/rückwärts, vgl. Abb. 6 e-g) ausgeführt. Die Vorwärts/Rückwärts-Bewegung (**SEL**) war im Gegensatz zu der bei Erwachsenen untersuchten Lateral/Medial-Bewegung (25) gewählt worden, um die Koordinationsleistung bei Bewegungen vom Körper weg und zum Körper hin im Vergleich zu jenen entlang der Körperachse beurteilen zu können. Ferner hatten Messkurven der Pilotstudie bereits darauf hingewiesen, dass sich die Sagittalebene deutlicher als die Frontalebene von der Vertikalebene unterscheidet.

In der Vertikalebene wurden einzelne „schnelle“ (**VES**, vgl. Abb. 6 d) und „langsame“ (**VEL**, vgl. Abb. 6 c) Bewegungen bzw. in beiden Ebenen repetitive Bewegungen „mittlerer“ (**VRmi**, **SRmi**, vgl. Abb. 6 b und f) und „maximaler“ (**VRma**, **SRma**, vgl. Abb. 6 a und e) Geschwindigkeiten unterschieden. Die Geschwindigkeitsvorgaben „langsam“, „mittel“ und „schnell“ dienten zur Orientierung und ließen den Kindern eine individuelle Geschwindigkeitsdosierung offen. Es wird davon ausgegangen, dass unter diesen Bedingungen die Koordinationsleistung am wenigsten extern durch visuelle oder akustische Kontrolle beeinflusst ist.

Bei der „schnellsten“ Einzelbewegung aufwärts (**VES**) sollten die Probanden in nur einem Bewegungsdurchgang eine maximale Vertikalbeschleunigung erzielen.

Bei „langsamen“ Bewegungen erfolgte vor jedem Richtungswechsel (**VEL** aufwärts/abwärts bzw. **SEL** vorwärts/rückwärts) eine Bewegungspause von einigen Sekunden, in denen das Objekt ruhig gehalten wurde.

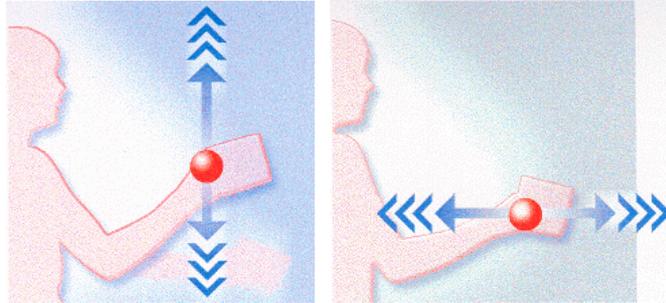


Abb. 6a und e: vertikale und sagittale Repetitivbewegungen „maximaler“ Geschwindigkeit

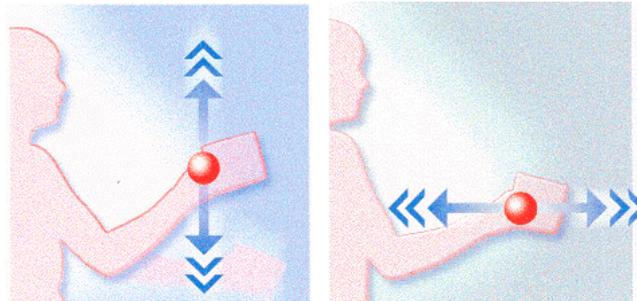


Abb. 6b und f: vertikale und sagittale Repetitivbewegungen „mittlerer“ Geschwindigkeit

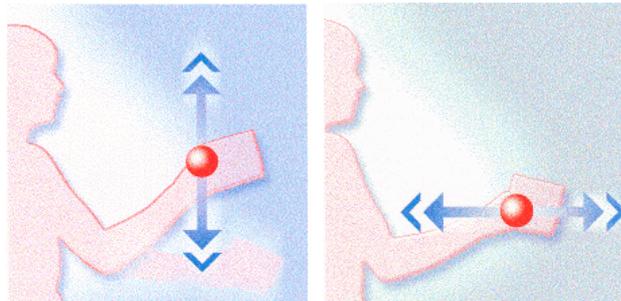


Abb. 6c und g: vertikale und sagittale Einzelbewegungen „langsamer“ Geschwindigkeit

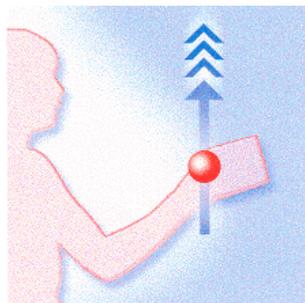


Abb. 6d: vertikale Einzelbewegung aufwärts maximal „schneller“ Geschwindigkeit

Tabelle 2: Aufgaben im Überblick

<b>Ebene</b>	<b>Bewegungsmodus</b>	<b>Geschwindigkeit</b>	<b>Richtung</b>
<i>vertikal</i>	<i>repetitiv</i>	„maximal“	<i>wechselnd</i>
	<i>repetitiv</i>	„mittlere“	<i>wechselnd</i>
	<i>einzel</i>	„langsam“	<i>aufwärts/abwärts</i>
	<i>einzel</i>	„schnell“	<i>aufwärts</i>
<i>sagittal</i>	<i>repetitiv</i>	„maximal“	<i>wechselnd</i>
	<i>repetitiv</i>	„mittlere“	<i>wechselnd</i>
	<i>einzel</i>	„langsam“	<i>vorwärts/rückwärts</i>

### 3.3.3 Zusammenfassung

Es wurde Wert auf konstante Untersuchungsbedingungen einschließlich der Positionierung der Kinder gegenüber der Messapparatur sowie ihrer Körperhaltung gelegt.

Die Griffkraft der Vorschulkinder wurde unter statischen und dynamischen Bedingungen gemessen. Statische Griffkraftaufgaben erfassten die individuelle Maximalgriffkraft, die Maximale Hebekraft und die Griffkraft bei Maximaler Hebekraft. Dynamische Aufgaben erfolgten in den Bewegungsebenen „vertikal“ und „sagittal“, in dem Bewegungsmodus „repetitiv“ bzw. „einzel“, in den orientierenden Geschwindigkeiten „maximal schnell“, „mittel“, „langsam“ sowie bei den Einzelbewegungen in den Bewegungsrichtungen „aufwärts/abwärts“ und „vorwärts/rückwärts“.

### 3.4 Wertung der Messdaten

#### 3.4.1 Wertung der Signale: Messdaten

##### *Definitionen*

*Daten* sind gemessene Signale, die gespeichert und als Datenkurve gegen die Zeit als „Zeitfunktion“ auf dem Monitor dargestellt werden.

*Variablen* sind die physikalischen Größen „Kraft“ und „Beschleunigung“.

*Zielgrößen* sind von den Variablen abgeleitete, für die Interpretation relevante, z. T. berechnete Größen, z. B. „ratio“.

*Einflussgrößen* sind durch die Messbedingungen bestimmt, dazu gehören die „Zeit“, das „Alter“ sowie „Größe“ und „Geschlecht“ der Probanden.

##### 3.4.1.1 Software „Move“

Die Entwicklung der Auswertesoftware *Move* (Arbeitsgruppe Neuro- und Psychophysiologie, Institut für Soziale Pädiatrie und Jugendmedizin der LMU, Kinderzentrum München, Leitung Dr. habil. R. Blank (11)) ermöglichte eine detaillierte Signalverarbeitung mit einem automatisierten Auswertungsmodus. Für die Auswertung vorgesehene Kurvenabschnitte wurden markiert und gespeichert. Die Messdaten der Variablen *Griffkraft* und *Beschleunigung* wurden Statistik- und Grafikprogrammen zur weiteren Verarbeitung zugeführt.

##### 3.4.1.2 Beschreibung der Messkurven als Zeitfunktionen

#### **Statische Aufgaben**

Die statische oder *isometrische Maximalgriffkraft* wurde direkt aus der Messkurve abgelesen.

Die *maximale Hebekraft* wurde von der Personenwaage angezeigt und aufgrund der doppelten Hebelarmlänge auf der Seite des Probanden halbiert. Die *Griffkraft zum Zeitpunkt der maximalen Hebekraft* wurde gleichzeitig auf dem Monitor angezeigt und gespeichert.

## Dynamische Aufgaben

Bei dynamischen Aufgaben wurden Beschleunigung (Bewegungskomponente) und Griffkraft (Kraftkomponente) gemessen und jeweils als Zeitfunktionen dargestellt.

### Bewegungskomponente

Jeweils am Beginn, am Ende, und bei Richtungswechseln einer Bewegung wird das Objekt beschleunigt. Als Beispiel wird die Beschleunigungskurve der Aufwärtsbewegung dargestellt, wie sie auf dem Monitor angezeigt wird:

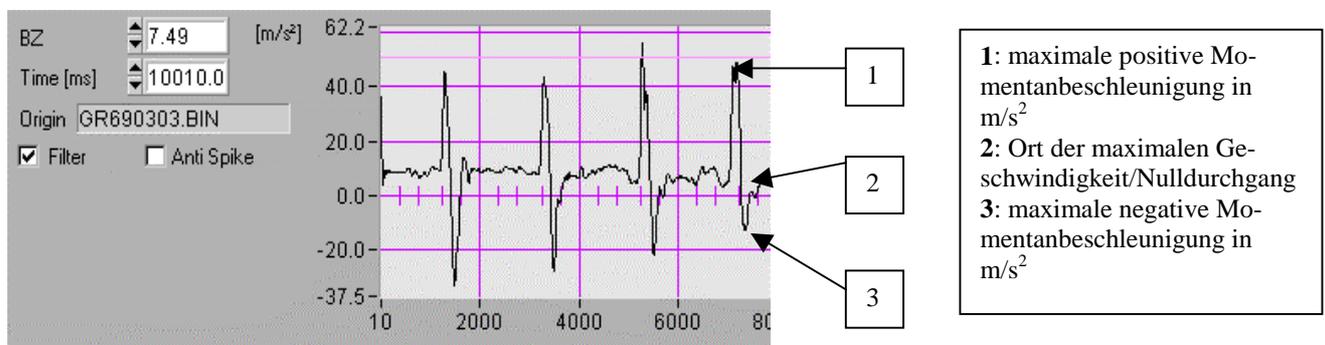


Abb. 7: Beschleunigungs-Zeit-Funktion von Aufwärtsbewegungen; Originaldaten

Das Messobjekt befindet sich bei einer Beschleunigung von  $9,81\text{m/s}^2$  in der Ausgangslage. Der erste Kurvenabschnitt vom Ausgangspunkt bis Punkt 1 entspricht dem Beschleunigungsanstieg, Punkt 1 der *maximal positiven Momentanbeschleunigung*, Punkt 2 der *maximalen Geschwindigkeit*. Das Objekt befindet sich in der Aufwärtsbewegung. Am Bewegungsende muss das Objekt gebremst werden. Dies macht sich durch einen negativen Ausschlag der Beschleunigungskurve bemerkbar. Die stärkste Verzögerung bzw. die *maximal negative Momentanbeschleunigung* liegt im Punkt 3 der gezeigten Kurve. Die Geschwindigkeit nimmt ab, das Objekt kommt zum Stillstand, und die Beschleunigungskurve ist auf den Ausgangspunkt zurückgekehrt. Ein solcher Kurvenverlauf von Ausgangslage, maximaler positiver Beschleunigung, maximaler Verzögerung und Rückgang in die Ausgangslage entspricht einem Bewegungsdurchgang bzw. einer Bewegungseinheit. Bei Wiederholbewegungen kann auch von einem *periodischen Element* gesprochen werden. Wird während eines Bewegungsdurchganges nur ein Maximum erreicht, ist die Beschleunigungskurve „eingipflig“, sind mehrere Maxima registriert, spricht man von einer „mehrgipfligen“ Kurve.

Da der Sensor so ausgerichtet ist, dass Aufwärts- bzw. Vorwärtsbewegungen mit einem positiven Ausschlag belegt sind, kann bei Einzelbewegungen von der Beschleunigungskurve auf die

Position des Objektes geschlossen werden. Die Abwärts- bzw. Rückwärtsbewegungen beginnen mit einem negativen Ausschlag, die oben dargestellte Kurve stellt sich demzufolge spiegelbildlich dar.

Für *Einzelbewegungen* wurden die Beschleunigungsmaxima dreier Bewegungseinheiten gemittelt. Die Maxima wurden von der Auswertungssoftware mit einer vertikalen Markierungslinie angezeigt, wobei durch eine horizontale Linie definiert werden konnte, ab welchem Mindestbetrag ein positiver Kurvenausschlag als Maximum galt. Ebenfalls wurde ein zeitlicher Mindestabstand zwischen den vertikalen Markierungslinien eingestellt, der sich an der Dauer eines Bewegungsdurchganges orientierte und angab, wann frühestens ein echtes Maximum wieder auftreten konnte. Durch diese Maßnahmen konnten Störeinflüsse weitgehend minimiert werden und zudem wurde sichergestellt, dass auch bei mehrgipfligen Beschleunigungskurven nur das absolute Maximum in die Auswertung einging.

Bei *repetitiven Bewegungen* wurde das Messobjekt in rascher Abfolge beschleunigt und gebremst.

Für die Auswertung wurde der längste gleichmäßige Kurvenausschnitt herangezogen. Ein Vergleich der Messkurven mit dem zum Untersuchungszeitpunkt geführten Versuchsprotokoll ermöglichte die zeitliche Zuordnung von externen Störfaktoren, die während der Messung aufgetreten waren. Die Bewegungsfrequenz der Repetitivbewegungen wurde aus der Anzahl der Beschleunigungsmaxima pro Sekunde (Hz) berechnet.

Bei Bewegungen entstehen Beschleunigungskräfte (Ladungskräfte), die - stark vereinfacht - aus Gravitationskraft und Trägheitskräften zusammengesetzt sind (25). Die Trägheitskräfte sind um so größer, je höher die Beschleunigung ist. Beschleunigungskräfte in vertikaler Richtung werden vor allem von der Gravitationskraft bestimmt, die sich bereits beim einfachen Halten eines Objektes als Gewichtskraft auswirkt. Bei Sagittalbewegungen bleibt der Einfluss der Gravitation konstant, und es spielen vornehmlich Trägheitskräfte eine Rolle.

### *Kraftkomponente*

Die Gravitationskraft macht beim einfachen Halten eines Objektes in der Ausgangslage einen kontinuierlichen Krafteinsatz erforderlich. Beschleunigungskräfte führen zur Bewegung des gehaltenen Objektes. Die vektorielle Summe dieser Beschleunigungskräfte und der Gravitationskraft nennt man Ladungskraft. Je höher die Ladungskraft, desto höher muss die Haftreibungskraft zwischen Finger und Objekt sein, um einen stabilen Griff zu gewährleisten. Die Haftreibungskraft wird als Griffkraft am Objekt gemessen. Die Griffkraft wurde unter verschiedenen kinematischen Bedingungen gemessen. Die Messkurven wurden wie folgt auf dem Computerbildschirm wiedergegeben:

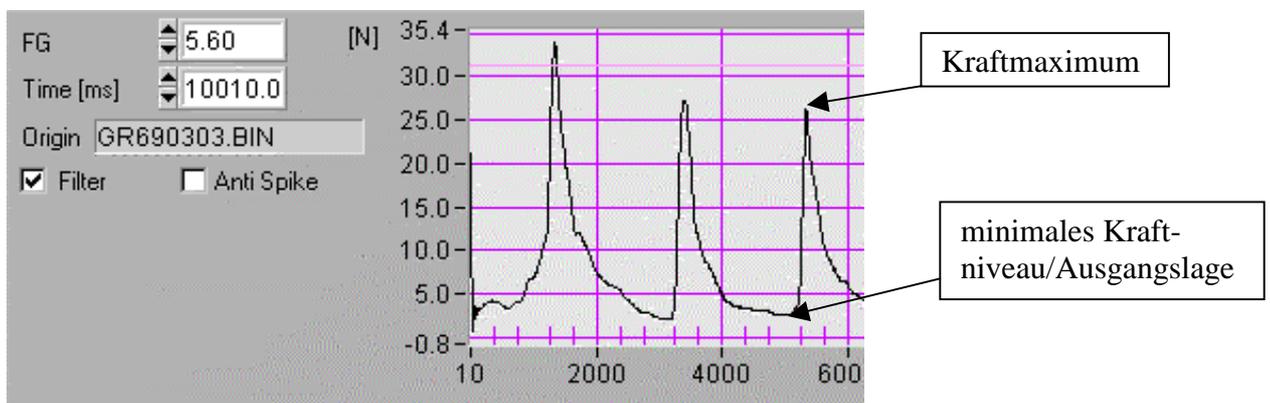


Abb. 8: Drei Kraftkurven bei „schnellen“ einzelnen Aufwärtsbewegungen; FG = Griffkraft

#### *3.4.1.3 Bewertung der Zeitfunktionen für Kraft- und Bewegungsparameter*

Die grafische Darstellung dient der schnellen und präzisen Beurteilung der Kraftkontrolle (42). Verschiedene Darstellungsformen lassen Aussagen über Wiederholgenauigkeit und Gleichmäßigkeit von Bewegung und Krafteinsatz zu. Beurteilbar sind auch die Kraftdosierung und das Krafttiming im Verhältnis zur durchgeführten Bewegung.

##### *1. Wiederholgenauigkeit*

Zur Beurteilung der Wiederholgenauigkeit mehrerer einzelner oder repetitiver Bewegungen werden Kraft- und Beschleunigungskurven der einzelnen Bewegungsdurchgänge (s.o.) übereinander projiziert, d. h. auf eine Zeitachse mit gleichem Anfangspunkt aufgetragen. Je exakter die Einzelkurven übereinander liegen, desto wiederholgenauer sind Krafteinsatz bzw. Bewegung.

## 2. Gleichmäßigkeit

Ob der Kraftanstieg und Kraftabfall während einer Bewegung gleichmäßig erfolgt, lässt sich durch die *Griffkrafttrate*, d.h. der Kraftänderung pro Zeiteinheit beschreiben. Die Krafttrate wird als erste Ableitung der Zeitfunktion für die Kraft berechnet. Wird die Krafttrate gegen die Kraft aufgetragen, ergibt sich bei regelmäßigem Kraftanstieg und Kraftabfall jeder Bewegungseinheit ein kreisförmiges Diagramm mit gleichem Ausgangspunkt und gleicher Amplitude. Je symmetrischer das Diagramm und je genauer sich die Kreise übereinander projizieren, desto harmonischer ist die Kraftänderung.

## 3. Kraftdosierung und Krafttiming bei Bewegungen

Ausgewählte Abschnitte der Kraft- und Beschleunigungsfunktionen einzelner und repetitiver Bewegungen werden zeitlich übereinander projiziert. Je größer die zeitliche Parallelität von Beschleunigungs- und Griffkraftkurve und je geringer die Latenz zwischen den Maxima beider Variablen, desto besser ist das Krafttiming. Je konstanter das Verhältnis der Amplituden von Beschleunigung und Griffkraft, desto besser ist die Kraftdosierung.

### 3.4.2 Auswertung der Messdaten

#### 3.4.2.1 Software

Das Statistikprogramm *SPSS für Windows*, Version 7.5 2G diente der statistischen Auswertung der mit der Auswertesoftware „*Move*“ extrahierten Daten.

#### 3.4.2.2 Deskriptive Statistik

Als *unabhängige Variablen* der Beobachtungseinheit „Vorschulkinder“ galten

- a) probandenbezogene Faktoren wie Alter, Geschlecht, Größe, Gewicht, Handlänge, Handbreite, Unterarmlänge und Fingerlänge sowie
- b) bewegungsabhängige Faktoren wie vorgegebene Geschwindigkeit („langsam“, „schnell“), Wiederholungsmodus („einzeln“, „repetitiv“), Richtung („vor/rück“ bzw. „auf/ab“) und Ebene („vertikal“, „sagittal“).

Als *abhängige Variablen* gelten „Griffkraft“ und „Beschleunigung“. Bei den erhobenen Messdaten handelte es sich um quantitative, stetige Rohdaten, die in einem Messintervall von 100Hz gemessen wurden.

Die *Zielgrößen* „Kraftdosierung“ und „Krafttiming“ wurden zur Beurteilung des Zusammenhanges zwischen unabhängigen und abhängigen Variablen herangezogen. Die Kraftdosierung wurde mit Hilfe der zusammengesetzten Größen „*ratio*“ und „*Griffkraftanteil*“, das Krafttiming mit den sogenannten „Latenzen“ beschrieben.

#### **Griffkraftdosierung**

##### *Individueller Griffkraftanteil $FG_{ant}$*

Die  $FG_{ant}$  ist der Anteil der im jeweiligen Versuch eingesetzten Griffkraft ( $FG_{aktuell}$ , Mittelwert der Maxima) an der individuellen absoluten Maximalgriffkraft ( $FG_{max}$ ).

$$FG_{ant} \text{ in } \% = FG_{aktuell} / FG_{max}$$

##### *Bewegungsabhängiger Griffkraftanteil **ratio***

Die **ratio** ist der Quotient aus den aktuellen Griffkraftmaxima und den Beschleunigungsmaxima (Ladungskraft) einer Bewegung (jeweils Mittelwerte).

$$ratio = \text{Griffkraft} / \text{Beschleunigung}$$

### Griffkrafttiming

Der zeitliche Abstand zwischen Griffkraft- und Beschleunigungsmaxima wurde beurteilt:

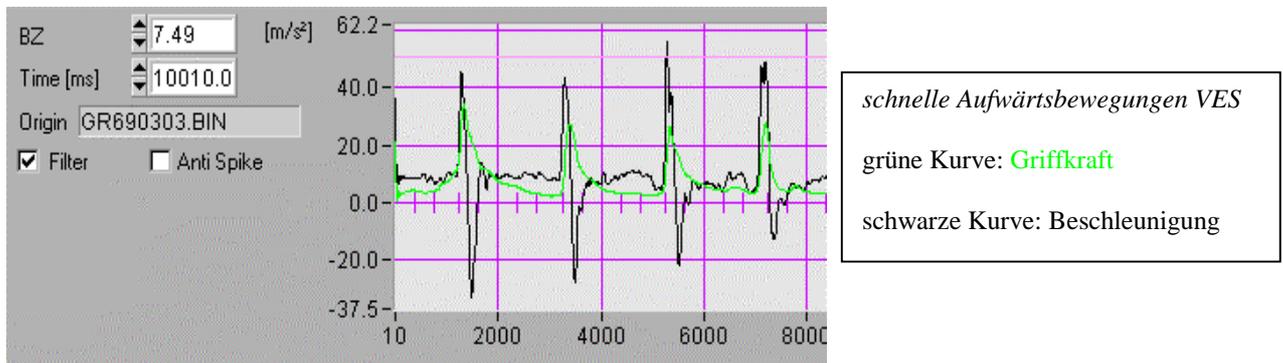


Abb. 9: Zeitliche Übereinstimmung von Beschleunigung und Griffkraft; „schnelle“ einzelne Vertikalbewegungen

### Latenzen

Der Zeitabstand zwischen Beschleunigungs- und Griffkraftmaximum wird als *Latenz* bezeichnet. Die Pilotstudie ergab, dass in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle das Beschleunigungsmaximum vor dem Griffkraftmaximum auftritt (positive Abweichung). Daher wurde in allen Fällen der Betrag der positiven Abweichung bzw. bei Bewegungswiederholung der Mittelwert aller positiver Abweichungen für die Ermittlung der Latenz herangezogen.

#### 3.4.2.3 Analytische Statistik

##### Irrtumswahrscheinlichkeiten

Die *Nullhypothesen* wurden bei einem  $\alpha$ -Fehler von weniger als 1% bzw. 5% abgelehnt.

##### Testverfahren

Mittelwertunterschiede wurden bei *nicht-normalverteilten* Daten mit nicht-parametrischen Tests (*Kruskal-Wallis Test* bei k unabhängigen Stichproben, *Mann-Whitney-U-Test* bei zwei unabhängigen Stichproben, *Wilcoxon-Test* bei zwei verbundenen Stichproben), bei *Normalverteilung* mit parametrischen Tests (*t-Test* für unabhängige Stichproben) auf Signifikanz getestet.

### *Gruppenbildung*

#### 1. Alter

Die Probandengruppe wurde grundsätzlich in vier Altersgruppen (Drei-, Vier-, Fünf- und Sechsjährige) eingeteilt. Für statische Aufgaben erfolgte eine Gruppeneinteilung in Halbjahresabstände, da eine starke Altersabhängigkeit vermutet wurde.

#### 2. Geschlecht

Die Gruppe der Mädchen wurde mit jener der Jungen verglichen.

### *Signifikanzprüfungen*

Gemäß der Hypothesen zur Entwicklung des Griffkrafteinsatzes im Vorschulalter wurden die Zielgrößen geprüft auf signifikante Unterschiede im

(2) *Ebenenvergleich (sagittal/vertikal)*,

(3) *Geschwindigkeitsvergleich („schnell/langsam“)*,

(4) *Bewegungsmodus („repetitiv/einzeln“)* und

(5) *Richtungsvergleich („aufwärts/abwärts“ bzw. „vorwärts/rückwärts“)*.

### **3.4.3 Zusammenfassung**

Die von den Sensoren auf den Computer übertragenen Messwerte wurden mittels einer speziellen Auswertesoftware grafisch dargestellt und automatisiert ausgewertet.

Die grafische Darstellung ermöglichte die Beschreibung der Beschleunigungs- und Griffkraft-Zeit-Funktionen. Die Griffkraft wurde des Weiteren nach den Kriterien „Wiederholgenauigkeit“, „Gleichmäßigkeit“ und hinsichtlich der Dosierung (Griffkraft pro individuelle Maximalgriffkraft bzw. Griffkraft pro Beschleunigung) und des zeitlichen Verlaufes während der Bewegung (zeitlicher Abstand zwischen Griffkraft- und Beschleunigungsmaximum) beurteilt.

Ein statistisches Auswertungsprogramm ermöglichte einen Überblick über Verteilung und Lagemaße der probandenbezogenen Faktoren, der Messgrößen „Griffkraft“ und „Beschleunigung“ sowie der Zielgrößen „Griffkraftdosierung“ und „Griffkrafttiming“.

In der analytischen Statistik wurden Nullhypothesen bei einem  $\alpha$ -Fehler von weniger als 1% bzw. 5% abgelehnt. Die Gruppenbildung fand statt nach „Alter“ und „Geschlecht“.

Signifikanzprüfungen fanden statt für den Ebenenvergleich, den Geschwindigkeitsvergleich, die Bewegungsmodi und den Richtungsvergleich.

### ***3.5 Grafische Darstellungen und Textverarbeitung***

#### **3.5.1 Einzelfallbeispiele**

Die Zeitfunktionen für die abhängigen Variablen Griffkraft und Beschleunigung wurden für ein drei- und ein sechsjähriges Kind phänomenologisch dargestellt. Die Daten wurden in das Grafik-Programm *Power Point* geladen und als x/y- Liniendiagramme grafisch dargestellt.

#### **3.5.2 Abbildungen**

Die Abbildungen der statistischen Auswertung bestehen aus Balkendiagrammen für normalverteilte Daten bzw. aus Boxplots für nicht-normalverteilte Daten.

#### **3.5.3 Textverarbeitung**

Als Textverarbeitungsprogramm wurde *Word für Windows*, Version 7.0, gewählt.

Im Ergebnisteil wurden die Grafiken aus dem Statistikprogramm in den Text eingebettet.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Probandengruppe

125 Kinder im Alter von drei bis sechs Jahren nahmen an der Untersuchung teil.

Alle 125 Kinder erfüllten die Einschlusskriterien (Alter und unauffällige entwicklungsneurologische Anamnese). Neun Kinder wurden aufgrund folgender Auffälligkeiten in der klinisch-neurologischen Untersuchung von der weiteren Datenanalyse ausgeschlossen:

#### Ausfallstatistik

- 1 5-jähriges Mädchen mit feinmotorischen Auffälligkeiten,
- 1 5-jähriges Mädchen mit fein- und grobmotorischen Auffälligkeiten,
- 2 6-jähriger und 3-jähriger Junge mit psychomotorischem Entwicklungsrückstand,
- 1 4-jähriger Junge mit einem Nystagmus unklarer Genese,
- 1 6-jähriger Junge mit einer minimalen zerebralen Dysfunktion,
- 1 3-jähriger Junge wegen mangelnder Kooperation und Abbruch der Untersuchung,
- 1 6-jähriges Mädchen nach feinmotorischem Training durch langjährige Ergotherapie,
- 1 5-jähriger Junge mit Auffälligkeiten in den Bewertungskategorien 3 und 4 der neurologischen Untersuchung (vgl. 3.1.2 Methodik).

---

Die Messergebnisse von 116 Kindern gingen in die Auswertung ein.

Eine Übersicht der Probandengruppe zeigt Tabelle 3.

*Tabelle 3: Übersicht Probandengruppe*

Kinder	%	N	Halbjahr		Geschlecht		Handlateralität	
			Erstes	Zweites	Mädchen	Jungen	Rechts	links
Motorisch Auffällige	7,2	9			3	6	6	3
<b>3-jährige</b>	25,6	32	12	20	21	11	27	5
<b>4-jährige</b>	25,6	32	17	15	16	16	26	6
<b>5-jährige</b>	22,4	28	11	17	14	14	26	2
<b>6-jährige</b>	19,2	24	9	15	12	12	23	1
<b>Gesamt</b>	100	125			66	59	108	17

## 4.2 Beschreibung von Griffkraftverläufen

**4.2.1 Fallbeispiele:** Vergleich von zeitlichem Verlauf, Wiederholgenauigkeit und Kraftproduktion pro Zeiteinheit (*Kraftrate*) drei- und sechsjähriger Kinder.

### 4.2.1.1 Einzelne Aufwärtsbewegung, „schnell“

Abbildung 10 zeigt die einzelne schnelle Aufwärtsbewegung (**VES**) eines sechs- und eines dreijährigen Kindes (10a und 10b). Die Zeitfunktionen der Griffkraft (grün) und der Beschleunigung (schwarz) sind übereinander projiziert dargestellt. Es sind jeweils drei Bewegungsdurchgänge dargestellt, deren Beginn durch einen steilen Anstieg der Kurven gekennzeichnet ist. Liegt die Beschleunigungskurve bei  $10\text{m/s}^2$  (Erdbeschleunigung), wird das Objekt ruhig in der Hand gehalten.

Die Bewegungskurven des sechsjährigen Kindes zeichnen sich durch einen gleichmäßigen Anstieg (positiver Ausschlag) und Abfall (negativer Ausschlag) der Beschleunigungskurve aus. Der steile Griffkraftanstieg auf ca. 25N erfolgt zeitlich parallel zur Beschleunigung und sinkt während des Bremsvorganges ebenmäßig wieder auf den Ausgangswert von ca. 3N ab. Das Beschleunigungsmaximum tritt wenige Millisekunden vor dem Griffkraftmaximum auf.

Bei dem dreijährigen Kind fallen bei Bewegung und in Ruhe eine Vielzahl zusätzlicher Peaks in den Griffkraftkurven auf. Der Verlauf der Kraftfunktion ist hier bei jedem Bewegungsdurchgang verschieden, die maximalen Kraftspitzen fallen jedoch wie bei dem sechsjährigen Kind zeitlich mit den Beschleunigungsspitzen zusammen.

Die überlagernde Darstellung der Bewegungsabschnitte unterstreicht, dass bei dem Sechsjährigen Beschleunigungs- (Abb. 11) und Griffkraftfunktion (Abb. 12) annähernd deckungsgleich sind. Die Beispielsabbildungen des Dreijährigen zeigen hingegen eine geringere Wiederholgenauigkeit. Kraft- und Beschleunigungsmaxima treten zu verschiedenen Zeitpunkten mit wechselnden Amplituden auf.

Zur besseren Beurteilung des zeitlichen Ablaufs des Krafteinsatzes (Kraftproduktion, Abb. 13) dienen Kraftratendiagramme (Abb. 14). Bei dem älteren Kind steigt die Kraft steil bis zu einem scheinbar vorher definierten Maximum an. Die Kraftratenkurve ist eingipflig. Im Gegensatz dazu weisen die Kraft- und Kraftratenkurven des Dreijährigen mehrere Maxima auf, die einen stufenweisen Kraftzuwachs anzeigen. Mit der Anzahl der Bewegungsdurchgänge sinken die Kraftamplituden von 11,22N auf 7,79N.

## Einzelne Vertikalbewegungen aufwärts, „schnell“ (VES)

### 6-jähriges Kind

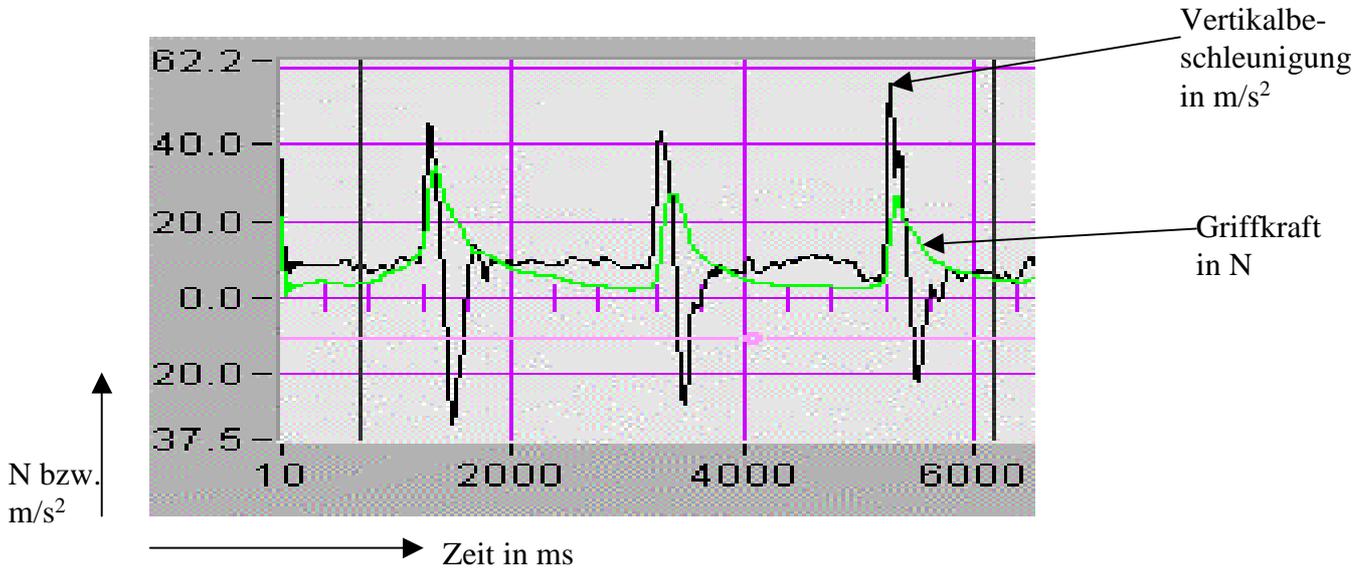


Abb. 10a: Gleichmäßige, parallele Zunahme von Griffkraft (grün) und Beschleunigung (schwarz) bei einem 6-jährigen Kind

### 3-jähriges Kind

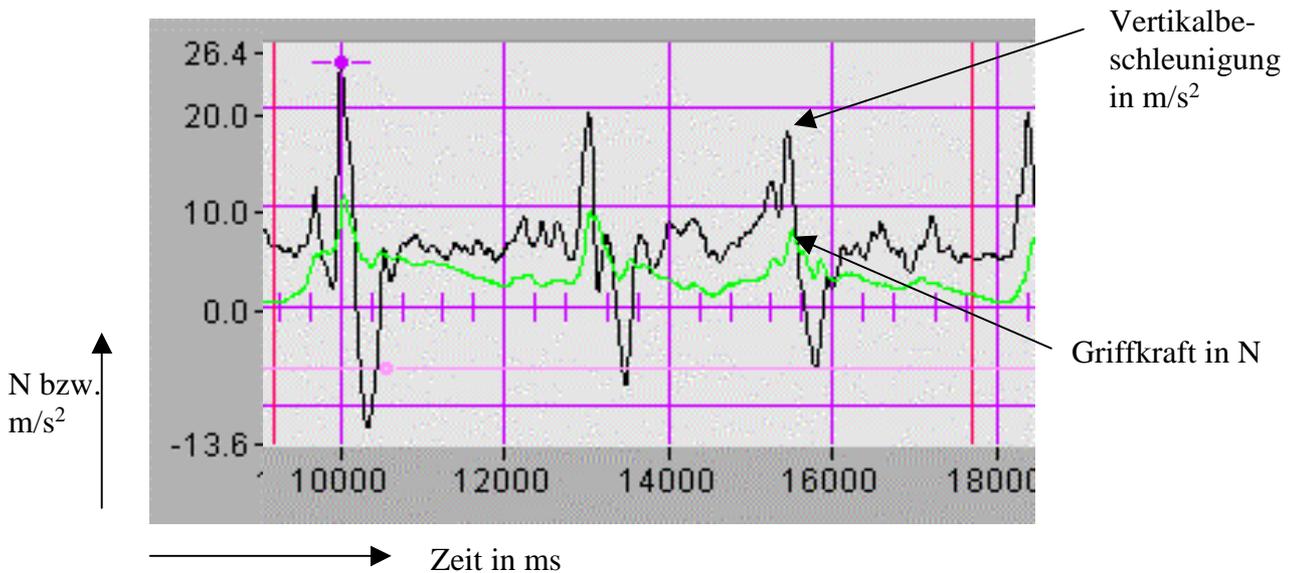
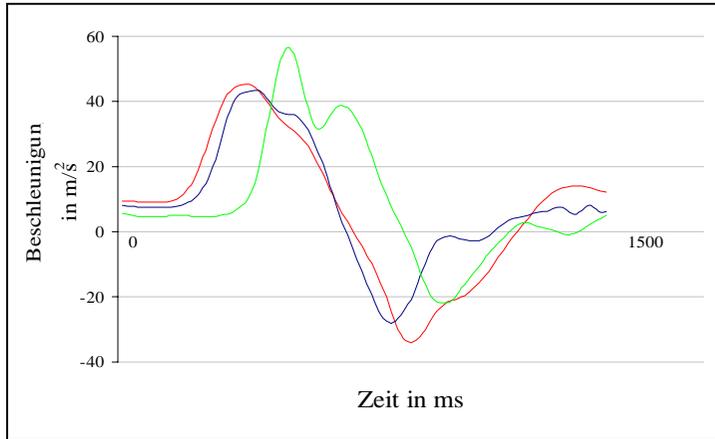


Abb. 10b: Unregelmäßiger Verlauf von Griffkraft (grün) und Beschleunigung (schwarz) mit zeitgleichem Auftreten der Maxima bei einem 3-jährigen Kind

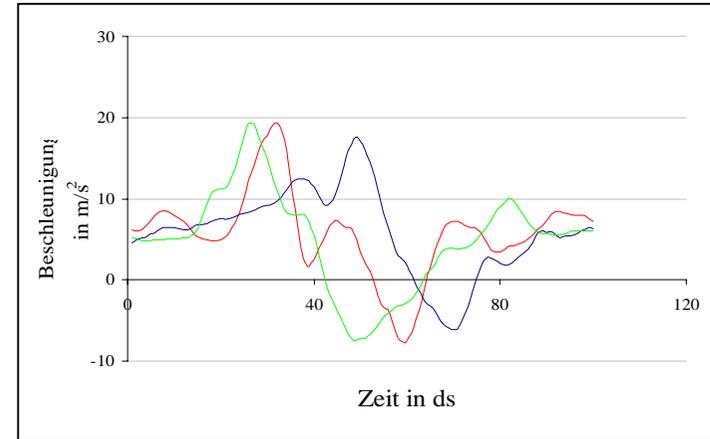
# Einzelne Vertikalbewegungen aufwärts\*, „maximale“ Geschwindigkeit (VES)

*Wiederholgenauigkeit der Bewegungsausführung und der Kraftdosierung*

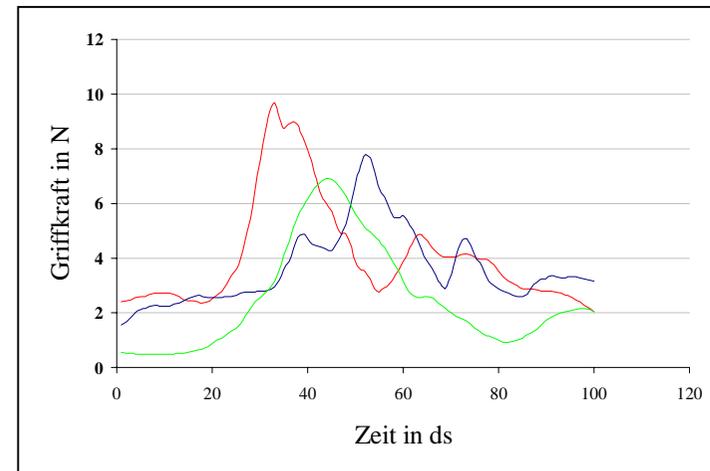
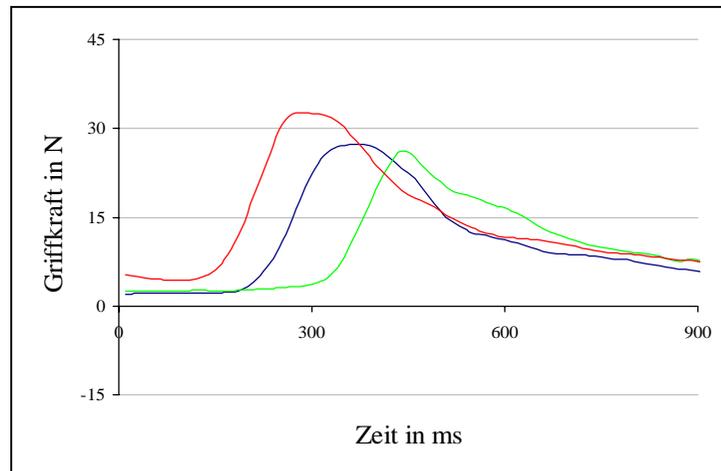
**6-jähriges Kind**



**3-jähriges Kind**



**Abb. 11:** *Beschleunigungskurven 3-er Bewegungsdurchgänge: bei dem 6-Jährigen hohe, bei dem 3-Jährigen geringe Wiederholgenauigkeit*



**Abb. 12:** *Griffkraftkurven der 3 Bewegungsdurchgänge: bei dem 6-Jährigen hohe, bei dem 3-Jährigen geringe Wiederholgenauigkeit*

\* einzelne Bewegungen werden in verschiedenen Farben dargestellt

# Einzelne „schnelle“ Vertikalbewegung (VES) : Änderung der Griffkraft/Zeit (Griffkrafttrate)

*eingipflige Griffkrafttratenkurve als Zeichen der antizipierten Griffkraft*

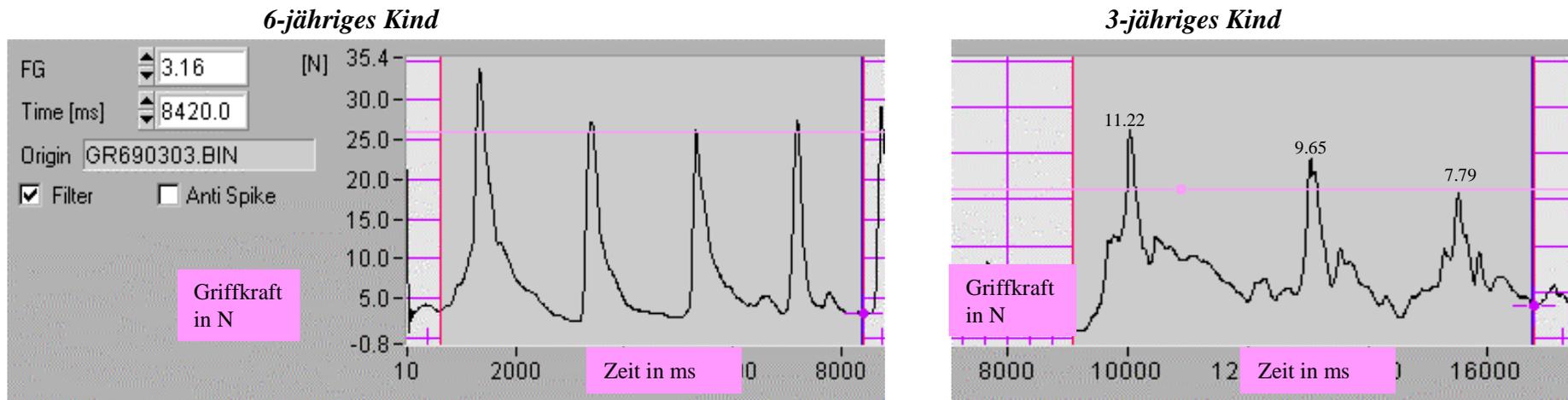


Abb. 13: Die Griffkraftkurven des 6-Jährigen zeigen einen gleichmäßigen Anstieg und Abfall mit nur einem Maximum, während diejenigen des 3-Jährigen v.a. bei dem Nachlassen der Kraft Unregelmäßigkeiten aufweisen

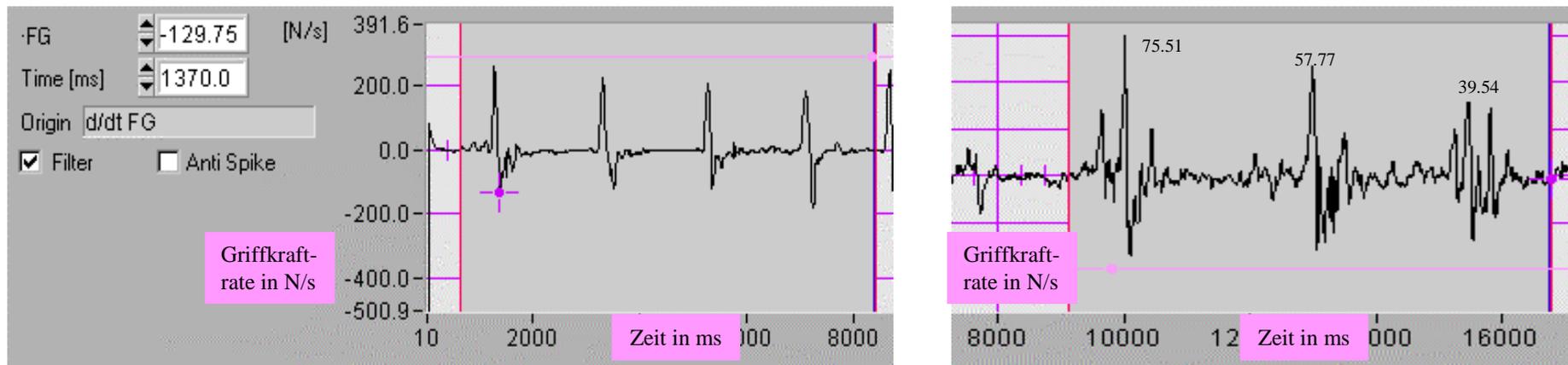


Abb. 14: Der Kraftzuwachs pro Zeit zielt bei dem 6-Jährigen auf ein einziges Maximum pro Aufwärtsbewegung, während die Kraftproduktion des 3-Jährigen im Verlauf einer Aufwärtsbewegung starken Schwankungen unterliegt

#### 4.2.1.2 Vertikale und sagittale Repetitivbewegungen

##### „mittlere“ Geschwindigkeit

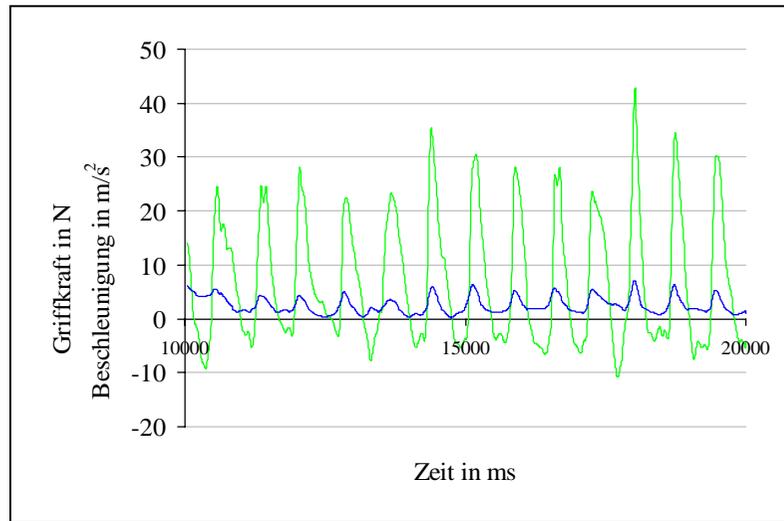
In der *Vertikalebene* führen sechsjährige Kinder repetitive Bewegungen (**VRmi**) mit einem steilen Griffkraftanstieg am Bewegungsbeginn und einem gleichmäßigen weiteren Kraftverlauf bei etwa gleichbleibender Amplitude durch (Abb. 15). Die Griffkraftmaxima steigen bei jeder Bewegungseinheit in etwa der gleichen Zeit um etwa den gleichen Betrag an (Abb. 17). Für das jüngere Kind kann trotz wechselnder Kraftamplituden (7 bis 12N) und unterschiedlich langen Latenzdauern zwischen Kraft- und Beschleunigungsmaxima (bis zu 200ms) ein ähnlich steiler Kraftanstieg gezeigt werden (Abb. 17). Die Abwärtsbewegung mit dem Bremsvorgang und dem Übergang zur nächsten Beschleunigung verläuft gegenüber dem Sechsjährigen deutlich ungleichmäßiger (Abb. 15).

Repetitive *Sagittalbewegungen* (**SRmi**, Abb. 16) zeigen für beide Altersgruppen einen weniger regelmäßigen Verlauf als Vertikalbewegungen. Bei flüchtiger Betrachtung erscheinen die Kraftkurven des Sechsjährigen regelmäßig, doch die Überlagerung der Kraftkurven (Abb. 18) verdeutlicht den bei jeder Bewegungseinheit unterschiedlichen zeitlichen Kraftanstieg und -abfall sowie die wechselnd hohen Griffkraftamplituden. Das dreijährige Kind hebt das Griffkraftniveau insgesamt leicht an, moduliert den Griffkrafteinsatz trotz wechselnder Beschleunigungen nur geringfügig und reduziert den Krafteinsatz nur selten auf den Ausgangswert (Abb. 16). Auch die Beschleunigungskurve demonstriert stellvertretend für die Bewegung einen unregelmäßigen Verlauf mit niedrigeren absoluten Beschleunigungsmaxima. Eine zeitliche Parallelität von Kraft und Beschleunigung ist kaum zu erkennen.

# Vertikale (VRmi) und sagittale (SRmi) Repetitivbewegung „mittlerer“ Geschwindigkeit

zeitliche Kohärenz von Griffkraft und Beschleunigung

vertikal, 6-jähriges Kind



vertikal, 3-jähriges Kind

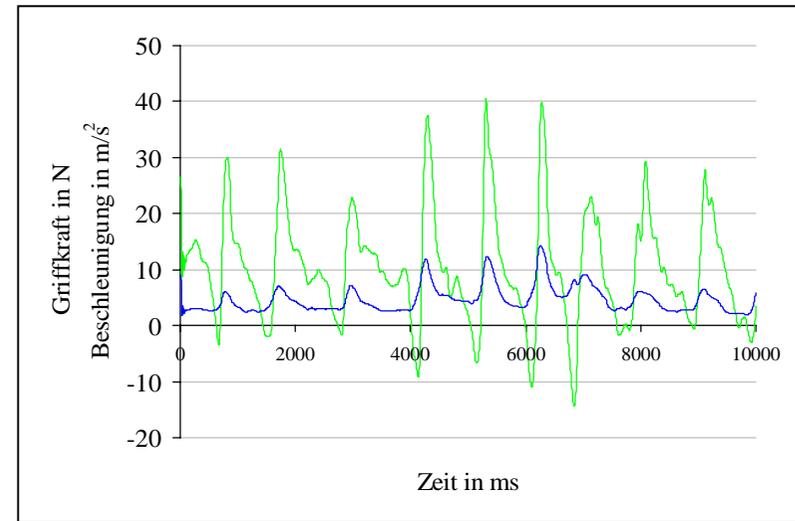
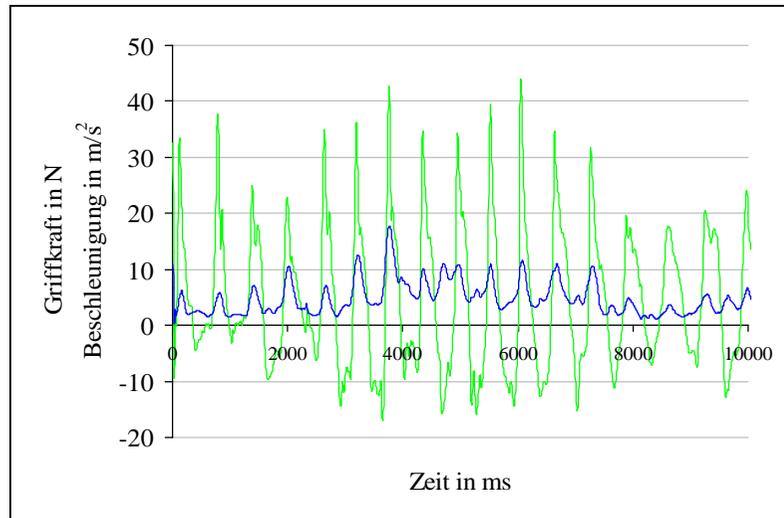


Abb. 15: Gleichmäßige, parallele Griffkraft- und Beschleunigungsänderung bei vertikalen Repetitivbewegungen

sagittal, 6-jähriges Kind



sagittal, 3-jähriges Kind

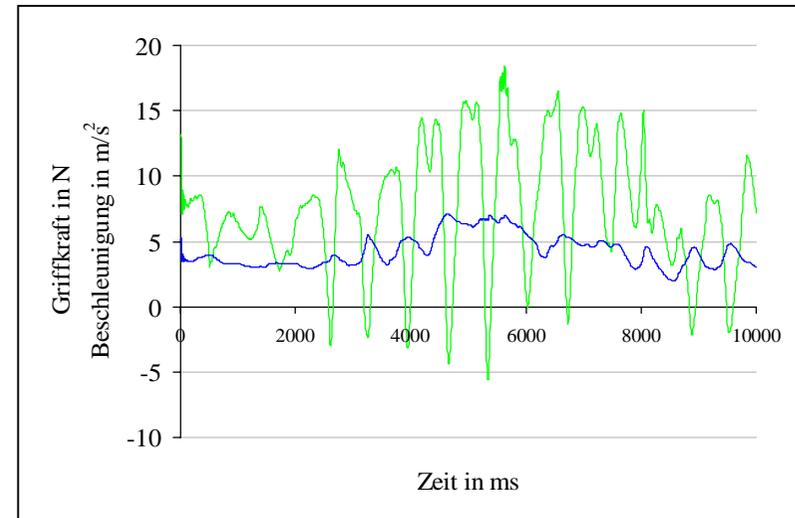
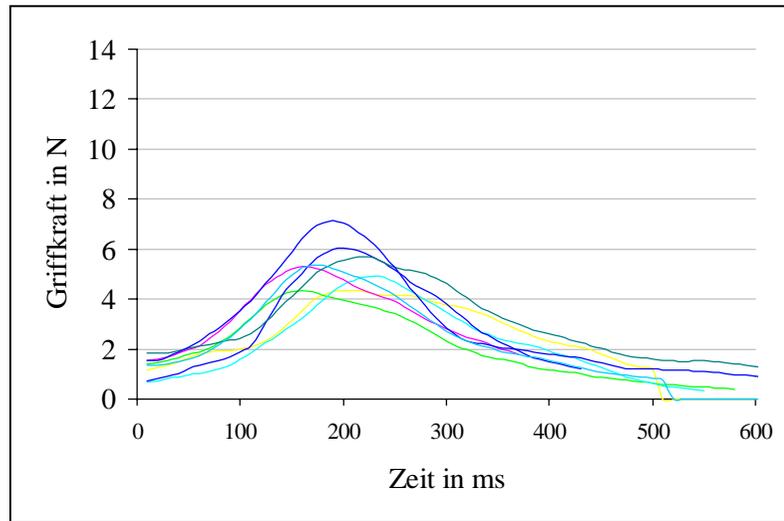


Abb. 16: Ungleichmäßigere Griffkraft- und Beschleunigungsänderung bei sagittalen Repetitivbewegungen; bei dem 3-Jährigen aufgehobene Parallelität von Griffkraft- und Beschleunigungsänderung

# Vertikale (VRmi) und sagittale (SRmi) Repetitivbewegung „mittlerer“ Geschwindigkeit

Wiederholgenauigkeit\* des Griffkrafteinsatzes

vertikal, 6-jähriges Kind



vertikal, 3-jähriges Kind

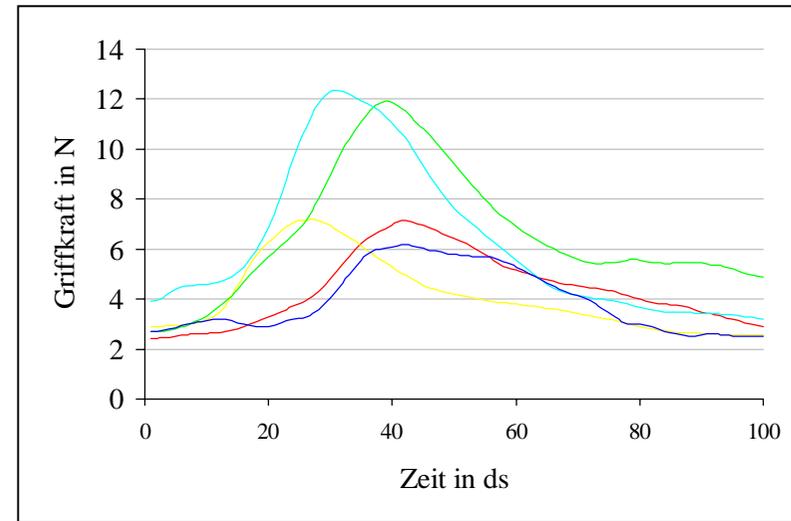
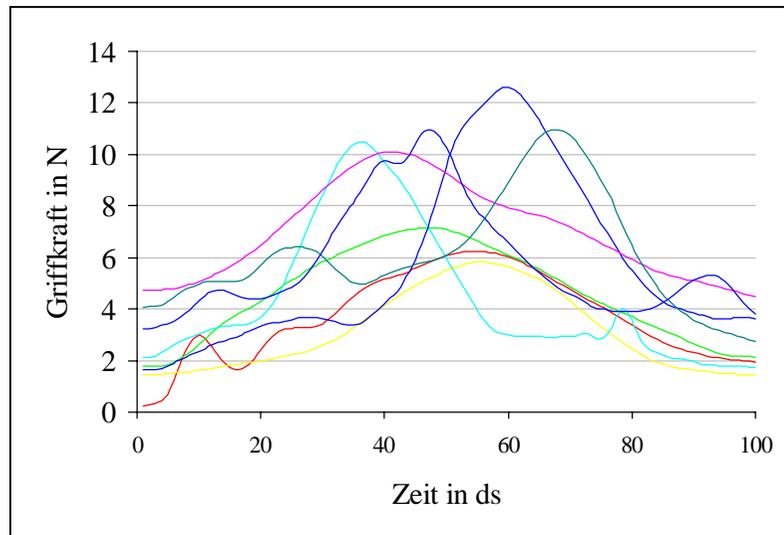


Abb. 17: Intraindividueller Vergleich der Griffkraftänderung während einzelner Bewegungseinheiten repetitiver Vertikalbewegungen

sagittal, 6-jähriges Kind



sagittal, 3-jähriges Kind

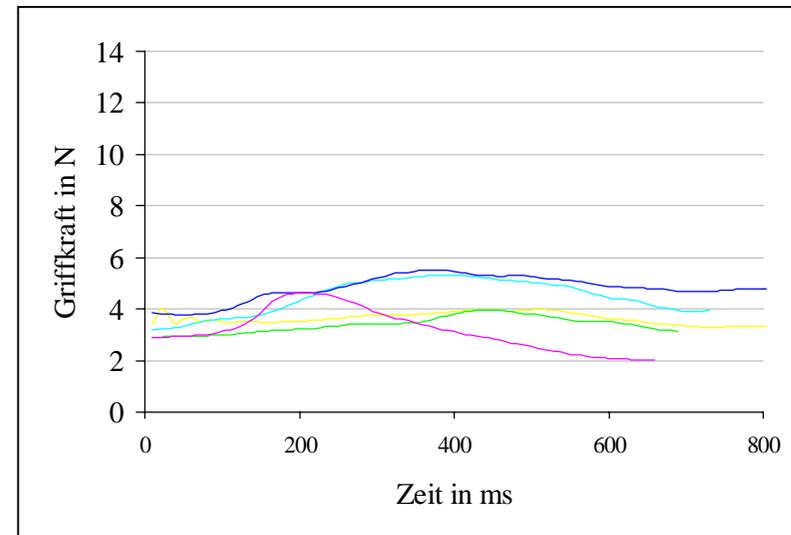


Abb. 18: Intraindividueller Vergleich der Griffkraftänderung während einzelner Bewegungseinheiten repetitiver Sagittalbewegungen

\*einzelne Bewegungen in verschiedenen Farben dargestellt

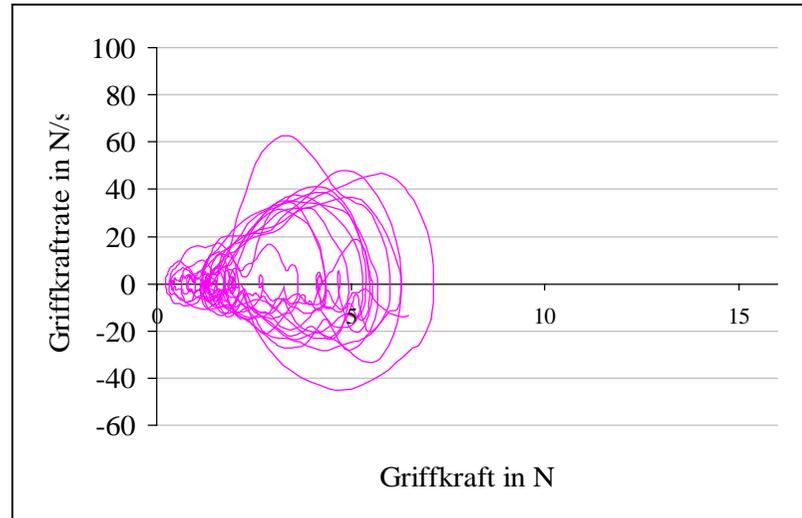
Die Gleichmäßigkeit der Kraftzu- und -abnahme (Kraftproduktion) lässt sich anhand der *Griffkrafttraten* ( $(N/s)/\text{Griffkraft}$ , Abb. 19, 20) am besten beurteilen, da hier Kraftproduktion pro Zeit im Verhältnis zur Höhe der Griffkraft grafisch dargestellt werden. Die Symmetrie der Kurven ist Ausdruck für eine gleichmäßige Kraftproduktion. Während sich bei Vertikalbewegungen des sechsjährigen Kindes Kraftänderung und Kraftdosis pro Bewegungseinheit nicht oder nur wenig ändern (Deckungsgleichheit und Symmetrie der Kurven), sind die Krafttratenkurven des dreijährigen Kindes deutlich unregelmäßiger, weniger deckungsgleich und nehmen z.T. hohe absolute Kraftbeträge an (Abb. 19).

Die Krafttraten diagramme der Sagittalebene (Abb. 20) zeigen für das sechsjährige Kind im Vergleich zur Vertikalebene höhere Griffkraftmaxima und eine insgesamt ungleichmäßigere sowie stärkere Kraftänderung pro Zeiteinheit. Für das dreijährige Kind ist sagittal ebenfalls ein ungleichmäßiger Kraftverlauf zu erkennen. Das Krafttraten diagramm nimmt kaum eine kreisförmige Gestalt an, die Kreisradien sind klein, es findet nur eine geringfügige Kraftmodulation statt (3 bis 7N).

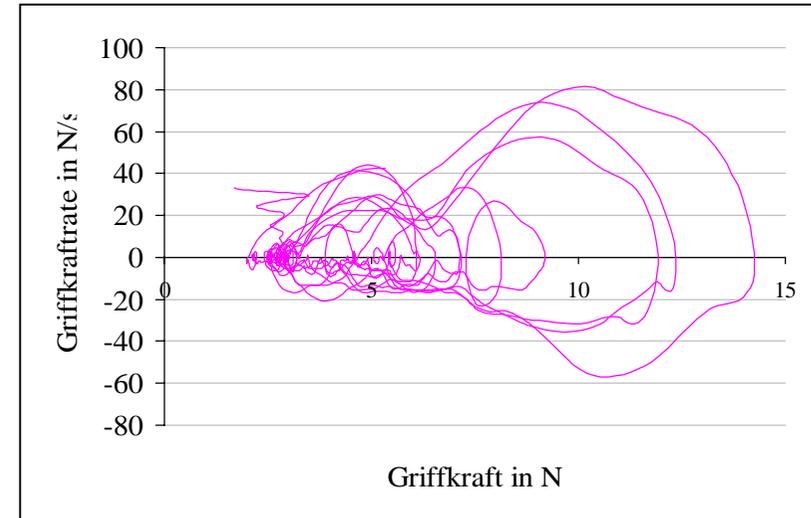
# Vertikale (VRmi) und sagittale (SRmi) Repetitivbewegung „mittlerer“ Geschwindigkeit

*Kraftratendiagramm (N/s) zur Darstellung der antizipatorischen Griffkraftplanung bei Repetitivbewegungen*

*vertikal, 6-jähriges Kind*

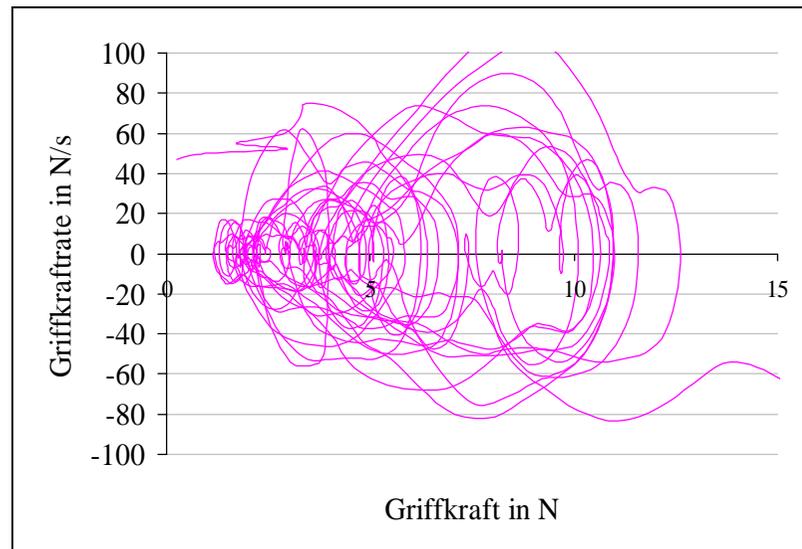


*vertikal, 3-jähriges Kind*

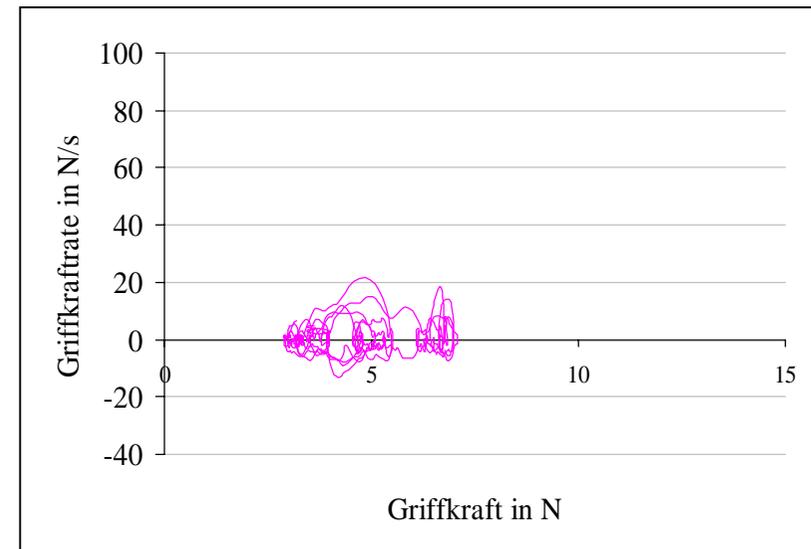


*Abb.19: Kraftratendiagramm zur Darstellung der Wiederholgenauigkeit des Griffkrafteinsatzes bei vertikalen Repetitivbewegungen*

*sagittal, 6-jähriges Kind*



*sagittal, 3-jähriges Kind*



*Abb. 20: Kraftratendiagramm zur Darstellung der Wiederholgenauigkeit des Griffkrafteinsatzes bei sagittalen Repetitivbewegungen*

### *Sagittale Repetitivbewegungen bei Steigerung der Bewegungsgeschwindigkeit am Beispiel eines Sechsjährigen*

Bisher wurden einzelne *oder* repetitive Bewegungen betrachtet. Abb. 21 hingegen gibt den Verlauf von Griffkraft- und Beschleunigungszeitfunktion unter Geschwindigkeitssteigerung wider. In der Vertikalen (**VRma**) wirkt die Gravitationskraft am Ende der Aufwärtsbewegung in die gleiche Richtung wie die negative Beschleunigung (Bremsen) des Objektes. Dadurch wird zur Initiierung der Abwärtsbewegung kein Griffkraftmaximum erforderlich. Im Gegensatz dazu zeigt die Griffkraftkurve in der Sagittalebene (**SRma**) nach den Griffkraftmaxima einen zweiten Griffkraftanstieg auf (Abb. 21, „Doppelgipfligkeit“ der blauen Kurve). Dieser weitere Griffkraftanstieg fällt zeitlich mit den negativen Beschleunigungsspitzen zusammen und wird durch auftretende Trägheitskräfte an den Umkehrpunkten der Vorwärts- bzw. Rückwärtsbewegung hervorgerufen. Diese Trägheitskräfte entstehen beim Beschleunigen bzw. Bremsen des Objektes bei Richtungsänderung der Armbewegung. Auch in den Beschleunigungskurven (rot) fallen zwei dicht aufeinanderfolgende Maxima vor allem im positiven Bereich (Vorwärtsbewegung) auf, das erste Maximum fällt mit dem Bewegungsbeginn zusammen, das zweite ist Ausdruck des beendeten Bremsvorganges und leitet die Rückwärtsbewegung ein.

Anhand des hier dargestellten Beispiels des sechsjährigen Kindes lässt sich zeigen, dass die Griffkraft (blaue Kurve) gemäß auftretenden Ladungskraftänderungen (rote Beschleunigungskurve) selbst bei koordinativ schwierigen Sagittalbewegungen (**SRma**) unter Geschwindigkeitssteigerung geändert wird. Die Feinmodulation des Griffkrafteinsatzes wird unmittelbar und ziemlich genau mit den bewegungsbedingten Trägheitskräften abgestimmt.

# Sagittale Repetitivbewegung (SRma) mit Geschwindigkeitssteigerung, 6-jähriges Kind

## Griffkraft und Beschleunigung

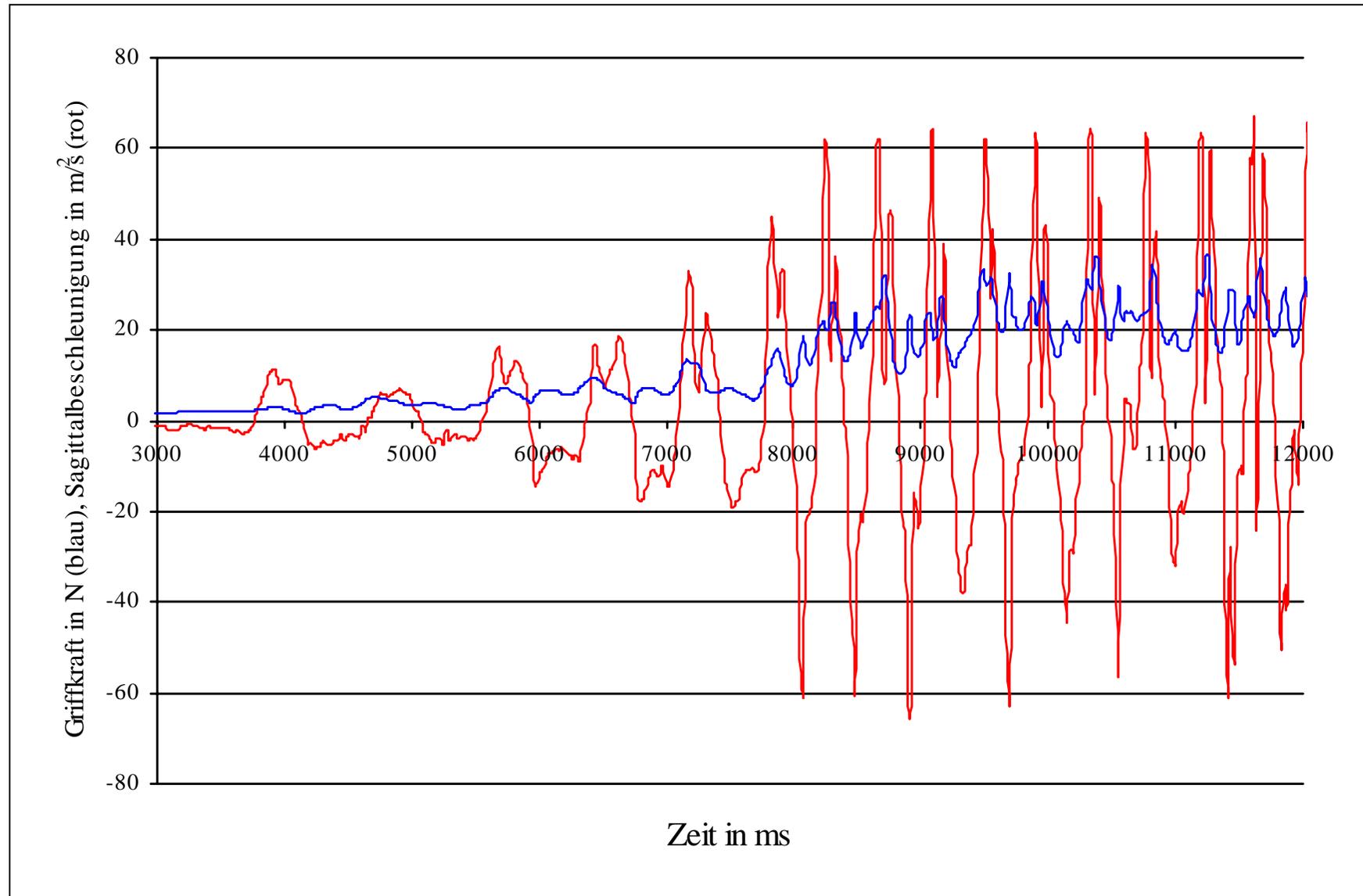


Abb. 21: Gleichmäßigkeit und Parallelität von Griffkraft- (blau) und Beschleunigungskurven (rot) bei Geschwindigkeitssteigerung der repetitiven Sagittalbewegung

## 4.2.2 Statische Aufgaben

Statische Aufgaben beinhalten die Messung der Griffkraft bei frei gehaltenem Objekt (*Maximalgriffkraft*) und beim Drücken des Objektes gegen den Hebel einer Wippe. Neben der *Griffkraft bei maximaler Hebekraft* wird die Hebekraft von einer am anderen Ende des Hebelarmes befindlichen Waage als *maximale Hebekraft* gemessen (vgl. Skizze S. 36).

### 4.2.2.1 Maximalgriffkraft

Die mittleren Maximalgriffkräfte der untersuchten Vorschulkinder sind normalverteilt und betragen bei frei gehaltenem Objekt 31,3N, Standardabweichung 7,4N (Abb. 22, Tabelle 4).

#### *Einflussfaktoren auf die Maximalgriffkraft*

##### Alter

Die Maximalgriffkraft steigt mit dem Lebensalter von im Mittel 27N bei Drei- auf im Mittel 38N bei Sechsjährigen an. Der Altersunterschied ist signifikant (*t-Test*; Differenz 3- und 6-jähriger Kinder:  $p < 0,000$  und  $df = 51$ ).

##### Geschlecht

Im Vorschulalter zeigt sich in der Gesamtgruppe der Mädchen eine signifikant geringere Maximalgriffkraft (im Mittel 29,8N) als in der Gesamtgruppe der Jungen (im Mittel 33,3N, *t-Test* für unverbundene Stichproben  $p < 0,01$ ,  $df = 107$ ).

##### Körpergröße und Körpergewicht

Mit der Maximalgriffkraft sind sowohl Körpergröße (*Pearson Korrelation*  $k = 0,49$ ) als auch Gewicht ( $k = 0,5$ ) als anthropometrische Parameter für den physischen Entwicklungszustand der untersuchten Kinder stark korreliert.

##### Handbreite und Unterarmlänge

Ein signifikanter Zusammenhang mit der Maximalgriffkraft besteht für die Handbreite ( $k = 0,47$ ) und die Unterarmlänge ( $k = 0,47$ ). Hand- und Fingerlänge hingegen haben auf die Maximalgriffkraft keinen tragenden Einfluss.

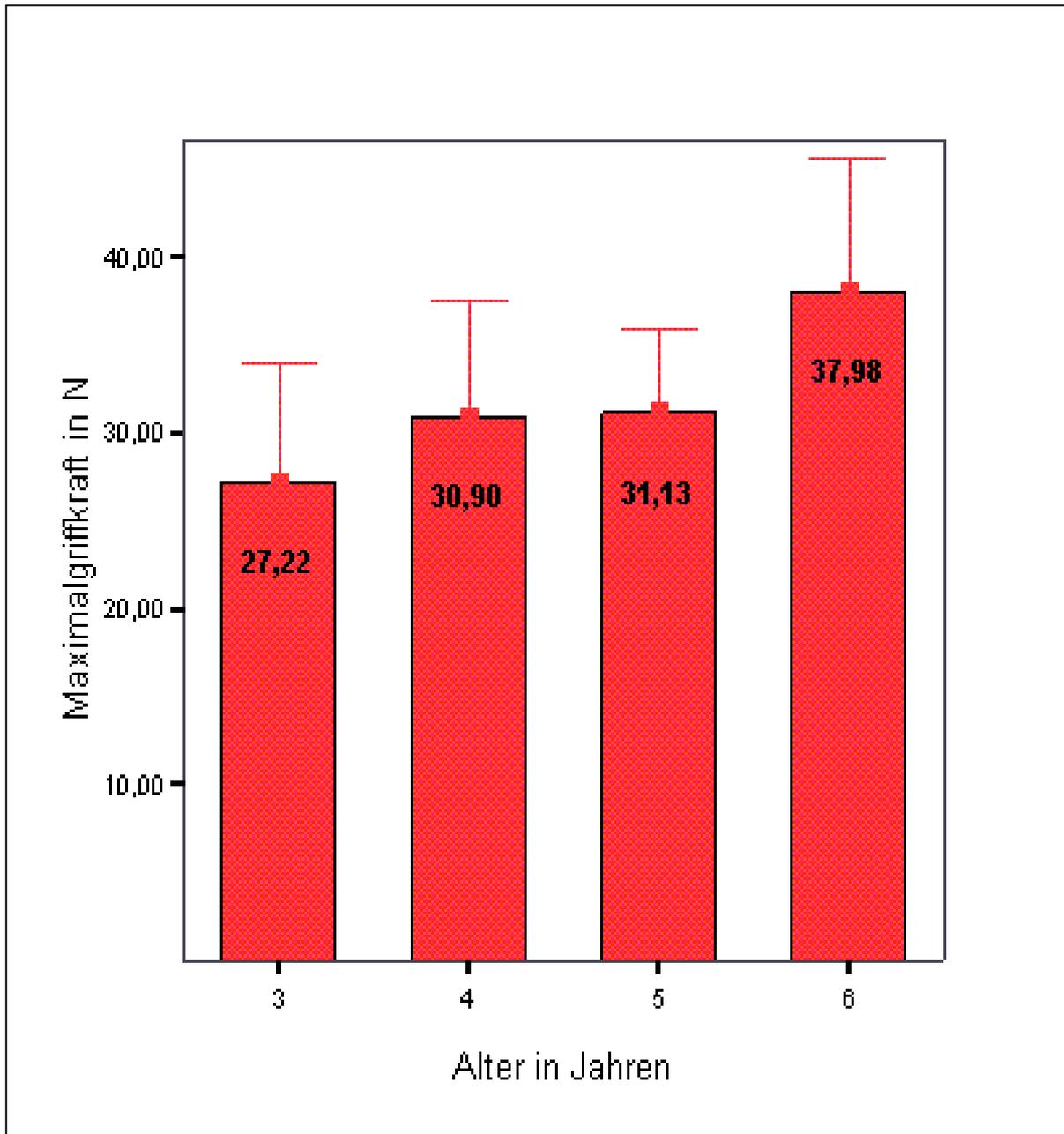


Abb. 22: Altersabhängigkeit der Maximalgriffkraft in N

**Tabelle 4**a) *isometrische Maximalgriffkraft in N*

<b>Alter in Jahren</b>	<i>Mittelwert (<math>\bar{x}</math>)</i>	<i>Standard- abweichung (sd)</i>	<i>Maximum</i>	<i>Minimum</i>
3	27,22	6,77	41,76	14,79
4	30,90	6,56	44,24	18,89
5	31,13	4,70	40,13	21,42
6	37,98	7,63	48,38	27,62

b) *Maximalgriffkraft in N in Halbjahresabständen, Mädchen und Jungen***Legende:**

( $\bar{x}$ ) = Mittelwert  
(sd); Stabw = Standardabweichung

**3 - 3 6/12 Jahre**

Mädchen

N=11	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	25,102	7,85	14,79	40,89

Jungen

N=6	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	25,6482	2,4503	23,88	30,42

**3 7/12 - 3 11/12 Jahre**

Mädchen

N=14	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	26,7885	6,0164	15,60	35,37

Jungen

N=9	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	34,1672	5,0729	26,85	41,76

**4 - 4 6/12 Jahre**

Mädchen

N=7	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	28,5069	3,0148	23,75	32,02

Jungen

N=11	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	32,7913	8,0379	18,89	44,12

**4 7/12 – 4 11/12 Jahre**

Mädchen

N=11	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	30,0389	7,0233	22,39	44,24

Jungen

N=6	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	33,4620	4,3142	27,15	39,72

**5 – 5 6/12 Jahre**

Mädchen

N=7	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	27,4596	6,1543	18,23	35,26

Jungen

N=8	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	34,7921	6,8381	24,45	46,71

**5 7/12 – 5 11/12 Jahre**

Mädchen

N=12	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	33,0003	7,9289	23,00	48,83

Jungen

N=10	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	34,0011	5,8219	26,63	46,71

**6 – 6 6/12 Jahre**

Mädchen

N=9	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	36,7231	6,9881	27,85	47,88

Jungen

N=6	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	37,9510	6,4639	30,45	45,74

**6 7/12 – 6 11/12 Jahre**

Mädchen

N=6	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	37,6780	8,0963	28,24	48,38

Jungen

N=9	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	41,3748	7,7781	27,62	47,82

#### 4.2.2.2 Griffkraft bei Maximaler Hebekraft

Zur Ermittlung der Griffkraft bei Maximaler Hebekraft wurde die Griffkraft zu dem Zeitpunkt gemessen, an dem die Kinder das Objekt mit maximaler Kraft gegen den Hebel einer Wippe nach oben drückten (vgl. Skizze S. 36). Diese nach oben gerichtete Kraft wird als maximale Hebekraft bezeichnet.

Die Griffkraft bei Maximaler Hebekraft betrug im Mittel 20N bei dreijährigen und 33N bei sechsjährigen Kindern (Abb. 23, Tabelle 8.1, vgl. Anhang). Der Altersunterschied zwischen drei- und sechsjährigen Kindern erwies sich im *t-Test* als signifikant ( $p < 0,000$ ,  $df = 50$ ), der Korrelationskoeffizient betrug  $k = 0,2$ .

Erstaunlicherweise zeigt der Vergleich von Griffkraft bei Maximaler Hebekraft und Maximalgriffkraft, dass Griffkräfte bei gleichzeitigem Aufbringen Maximaler Hebekräfte signifikant kleiner sind als bei frei gehaltenem Objekt (Abb. 23, *t-Test* für gepaarte Stichproben:  $p < 0,000$ ,  $df = 108$ ,  $n = 109$ ). Demnach gibt es eine „Griffkraftreserve“, die von der Handmuskulatur (zum Erreichen der Maximalgriffkraft) noch zusätzlich aufgebracht werden könnte, wenn die Notwendigkeit bestünde. Sie beträgt 15-25% der Maximalgriffkraft.

#### 4.2.2.3 Maximale Hebekraft

Die Maximale Hebekraft (vgl. Tabelle 8.2, Anhang, Normalverteilung) betrug im Mittel 20N. Im Altersgruppenvergleich ergab sich für Dreijährige ein mittlerer Wert von 15,9N, für Sechsjährige von 25,61N. Der *t-Test* bestätigte einen signifikanten Altersunterschied zwischen drei- und sechsjährigen Kindern für die Maximale Hebekraft ( $p < 0,000$  und  $df = 50$ ).

Eine weitere Beobachtung aus den statischen Kraftaufgaben bestärkte die Vermutung, dass Maximale Hebekraft und Griffkraft bei Maximaler Hebekraft parallel zueinander ansteigen ( $k = 0,44$ ). Die Kraftproduktion der Muskeln des Armes, aus der im Wesentlichen die maximale Hebekraft hervorgeht, und jene der Hand, aus der die notwendige Griffkraft zu einem stabilen Halten des Objektes sichergestellt wird, sind eng miteinander gekoppelt. Ein ähnliches Zusammenspiel von Bewegungs- und Kraftmuskulatur wird bei dynamischen Aufgaben erwartet.

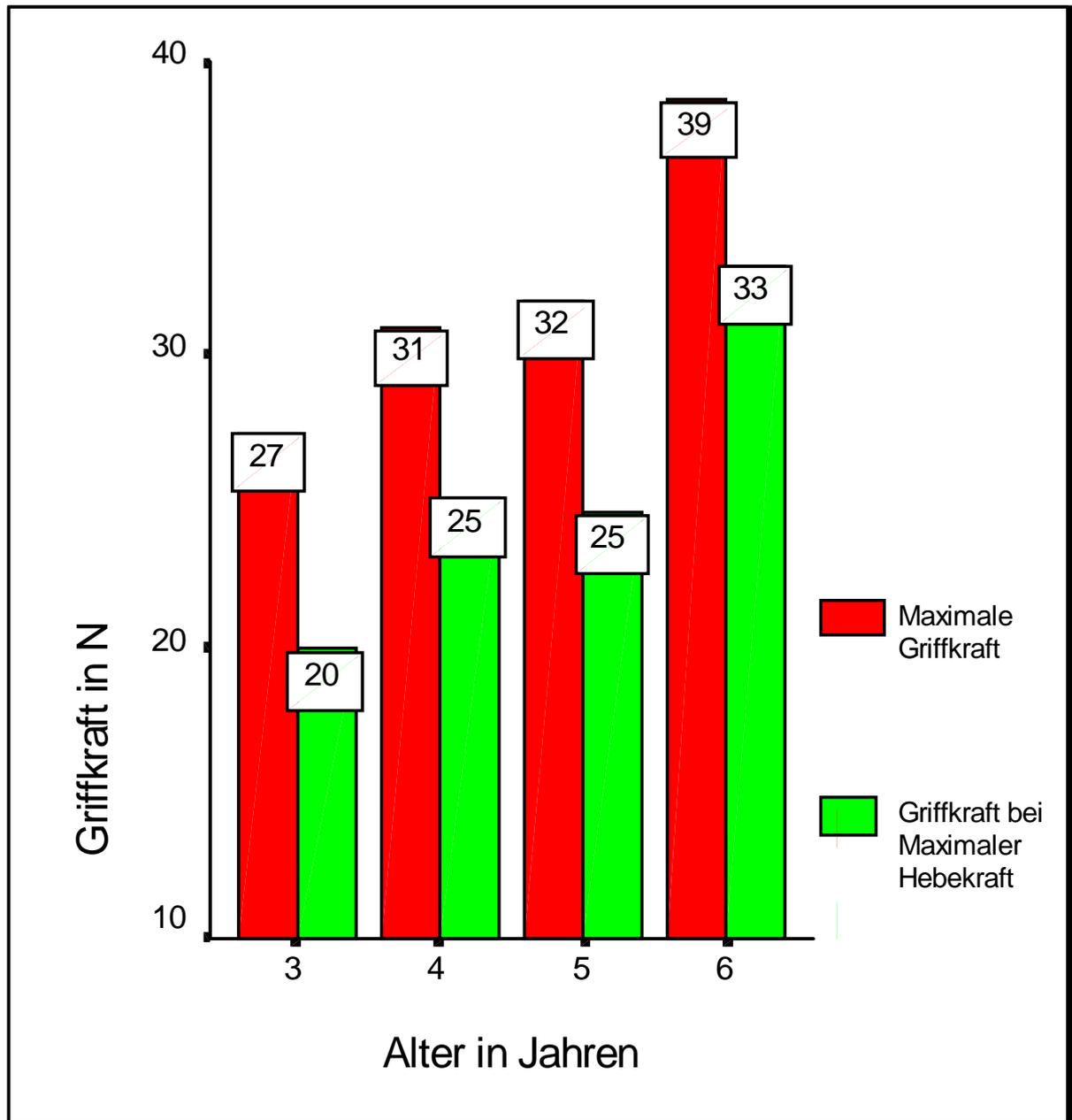


Abb. 23: Maximalgriffkraft (rot) und Griffkraft bei Maximaler Hebekraft (grün)

### 4.2.3 Dynamische Aufgaben

#### 4.2.3.1 Dynamische Griffkräfte im Überblick

In Analogie zu Bewegungen bzw. dynamischen Aufgaben wurden die dabei gemessenen Griffkräfte als „dynamische Griffkräfte“ bezeichnet. Im Gegensatz zu statischen Maximalgriffkräften (vgl. 4.2.2) waren die dynamischen Griffkräfte nicht normalverteilt. Zur Beschreibung dynamischer Griffkräfte dienten deshalb Median und 25. und 75. Quartile.

Abb. 24a für Vertikal- und Abb. 24b für Sagittalbewegungen und Tabelle 5 geben die dynamischen Griffkräfte für die verschiedenen Bewegungsformen und Altersgruppen wider.

Die *mediane Griffkraft* betrug ca. 5N bei langsamen Einzelbewegungen (**SEL, VEL**) unabhängig von Alter, Ebene und Richtung. Die maximalen Griffkräfte bei schnellen Einzelbewegungen (**VES**) lagen hingegen mit einem Median von 14,5N (Tabelle 5) signifikant höher. Sie waren ebenfalls höher als die Griffkräfte bei repetitiven vertikalen Armbewegungen mit „maximaler“ Geschwindigkeit (**VRma**) (11,75N), (*Friedmann-Test* für K-verbundene Stichproben: *Chi-Quadrat* = 317,42,  $p < 0,000$ ,  $df = 1$ ). Einzelne „schnelle“ Aufwärtsbewegungen (**VES**) wiesen zudem eine große *Spannbreite* des Griffkrafteinsatzes auf (25. Perzentile: 9,88N, 75. Perzentile: 19,10N, Tabelle 5).

Für alle *vertikalen* Bewegungen konnte auf hohem Signifikanzniveau gezeigt werden, dass je älter die Kinder, desto höher die eingesetzte Griffkraft. Am stärksten signifikant wurde der Altersunterschied bei Repetitivbewegungen „maximaler“ Geschwindigkeit (**VRma**) (Dreijährige: 9,5N, Sechsjährige: 14,4N, *Chi-Quadrat* = 22,85,  $p < 0,000$ ,  $df = 3$ ; für alle Altersgruppen *Chi-Quadrat* = 30,38,  $p < 0,000$ , *Kruskall-Wallis-Test*, Tabelle 5).

In der *Sagittalebene* waren die Altersunterschiede hinsichtlich des Griffkrafteinsatzes lediglich bei Bewegungen „maximaler“ Geschwindigkeit (**SRma**) signifikant ( $p < 0,001$ , *Chi-Quadrat* = 16,8, Tabelle 5), Sechsjährige führten die „schnellen“ Sägebewegungen mit 27N, Dreijährige nur mit 16,6N durch (Tabelle 5). Auch der Vergleich der maximalen Beschleunigungen in der Sagittalebene zeigte nur in der „schnellen“ Sägebewegung einen signifikanten Altersunterschied (Tabelle 6).

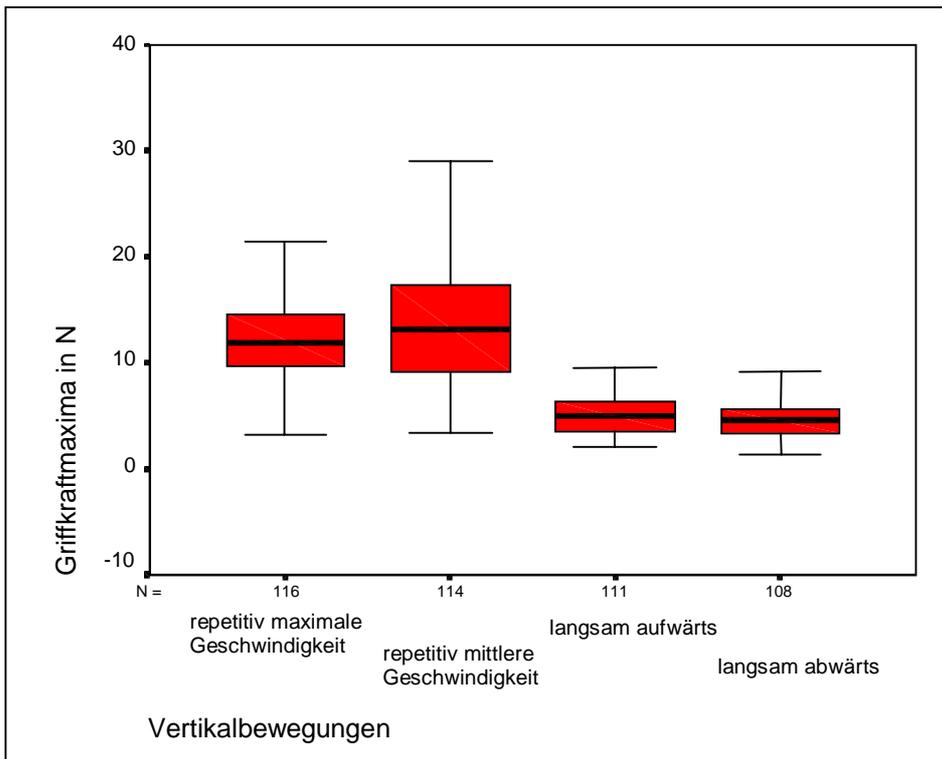


Abb. 24a: Dynamische Griffkräfte – Griffkraftmaxima bei Bewegungen in der Vertikalebene

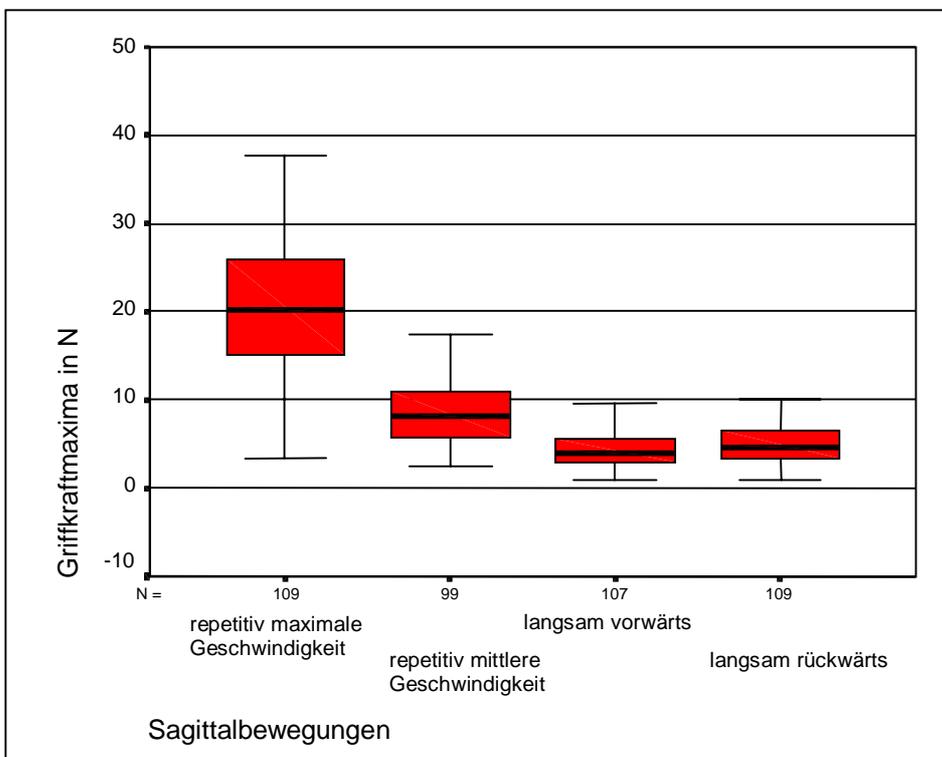


Abb. 24b: Dynamische Griffkräfte – Griffkraftmaxima bei Bewegungen in der Sagittalebene

Tabelle 5a: Dynamische Maximalgriffkräfte in N: Mediane und Quartile der verschiedenen Altersgruppen und Bewegungsmodi

Alter in Jahren/ Bewegungsart	3				4				5				6			
<i>Vertikal</i>	<i>N</i>	<i>M</i>	25%	75%												
<i>Vertikal einzel „schnell“</i>	32	<b>9,71</b>	7,31	13,27	32	<b>14,23</b>	11,90	17,37	28	<b>18,41</b>	11,76	21,39	24	<b>19,52</b>	12,95	23,39
<i>Vertikal repetitiv „maximale“ <math>\bar{v}</math></i>	32	<b>9,53</b>	7,02	11,05	32	<b>11,44</b>	10,04	13,79	28	<b>13,32</b>	10,32	15,15	24	<b>14,40</b>	12,21	17,67
<i>Vertikal repetitiv „mittlere“ <math>\bar{v}</math></i>	32	<b>10,82</b>	8,02	14,25	32	<b>12,29</b>	9,47	17,20	28	<b>12,54</b>	9,31	17,37	24	<b>16,79</b>	15,05	22,07
<i>Vertikal einzel „langsam“ aufw.</i>	32	<b>6,13</b>	3,43	6,48	32	<b>4,56</b>	3,37	5,89	28	<b>5,20</b>	3,81	6,05	24	<b>4,88</b>	3,78	7,32
<i>Vertikal einzel „langsam“ abw.</i>	32	<b>4,86</b>	3,10	6,79	32	<b>4,55</b>	3,47	5,09	28	<b>4,30</b>	3,48	5,16	24	<b>4,60</b>	3,28	6,81
<i>Sagittal</i>																
<i>Sagittal repetitiv „maximale“ <math>\bar{v}</math></i>	32	<b>16,64</b>	13,87	21,09	32	<b>19,02</b>	13,40	22,80	28	<b>21,34</b>	18,10	26,18	24	<b>27,21</b>	20,15	31,60
<i>Sagittal repetitiv „mittlere“ <math>\bar{v}</math></i>	32	<b>6,90</b>	5,43	10,75	32	<b>8,13</b>	5,77	9,98	28	<b>8,02</b>	6,25	10,54	24	<b>11,28</b>	5,71	15,53
<i>Sagittal einzel „langsam“ vorw.</i>	32	<b>4,55</b>	2,79	6,66	32	<b>4,11</b>	2,99	4,83	28	<b>3,66</b>	3,09	5,23	24	<b>4,51</b>	3,25	7,46
<i>Sagittal einzel „langsam“ rück.</i>	32	<b>4,49</b>	2,79	6,85	32	<b>4,52</b>	3,39	6,10	28	<b>4,80</b>	3,35	6,86	24	<b>4,98</b>	3,07	8,28

**Legende:**

M = Median, N = Anzahl der Probanden

 $\bar{v}$  = Geschwindigkeit entsprechend der Anweisung „maximal schnell“ bzw. „mittel schnell“

aufw. = aufwärts; abw. = abwärts; vorw. = vorwärts; rück. = rückwärts

25% = erstes Quartil bzw. 25-er Perzentile; 75% = drittes Quartil bzw. 75-er Perzentile

*Tabelle 5b: Dynamische Maximalgriffkräfte in N: Mediane und Quartile der Gesamtgruppe der Vorschulkinder (N = 116)*

<i>Vertikal</i>	<b>M</b>	<b>25%</b>	<b>75%</b>
<i>Vertikal einzel „schnell“</i>	<b>14,51</b>	9,88	19,10
<i>Vertikal repetitiv „maximale“ <math>\bar{v}</math></i>	<b>11,75</b>	9,66	14,57
<i>Vertikal repetitiv „mittlere“ <math>\bar{v}</math></i>	<b>13,13</b>	9,23	17,36
<i>Vertikal einzel „langsam“ aufw.</i>	<b>4,89</b>	3,60	6,32
<i>Vertikal einzel „langsam“ abw.</i>	<b>4,56</b>	3,29	5,63
<b><i>Sagittal</i></b>			
<i>Sagittal repetitiv „maximale“ <math>\bar{v}</math></i>	<b>20,15</b>	15,23	26,00
<i>Sagittal repetitiv „mittlere“ <math>\bar{v}</math></i>	<b>8,12</b>	5,78	11,16
<i>Sagittal einzel „langsam“ vorw.</i>	<b>3,91</b>	3,00	5,70
<i>Sagittal einzel „langsam“ rück.</i>	<b>4,61</b>	3,27	6,43

**Legende:**

M = Median, N = Anzahl der Probanden

$\bar{v}$  = Geschwindigkeit entsprechend der Anweisung „maximal schnell“ bzw. „mittel schnell“  
aufw. = aufwärts; abw. = abwärts; vorw. = vorwärts; rück. = rückwärts

25% = erstes Quartil bzw. 25-er Perzentile; 75% = drittes Quartil bzw. 75-er Perzentile

Der Griffkrafteinsatz bei Sägebewegungen „mittlerer“ Geschwindigkeiten (**SRmi**) lag altersunabhängig zwischen 6,9N und 11,3N (Tabelle 5) und ist damit niedriger als bei Vertikalbewegungen „mittlerer“ Geschwindigkeiten (**VRmi**). Sagittale Repetitivbewegungen „maximaler“ Geschwindigkeiten (**SRma**) wiesen hingegen einen wesentlich höheren Griffkrafteinsatz mit einer deutlich stärkeren Amplitudenvariabilität auf als maximal schnelle repetitive Vertikalbewegungen (**VRma**) (Tabelle 5; im Median sagittal 20,15N bzw. vertikal 11,75N).

#### 4.2.3.2 Beschleunigungen im Überblick

Objekte haben das Bestreben, eine gegebene Bewegungsrichtung beizubehalten (Trägheit, vgl. 1.2.2.4). Bei jeder Armbewegung entstehen Beschleunigungskräfte, z.B. auch an einem in der Hand gehaltenen Objekt. In der vorliegenden Studie wurden die durch Armbewegungen am Objekt entstehenden Beschleunigungen gemessen.

Die Maxima der Beschleunigungen waren *nicht normalverteilt* (vgl. 3.3.2, Tabelle 6, Abb. 25a, b).

Im *Altersgruppenvergleich* nahmen die erreichten Beschleunigungen in allen Bewegungsmodi der *Vertikalebene* signifikant mit dem Alter zu (in „langsamen“ Auf- und Abwärtsbewegungen **VEL**: *Chi-Quadrat* = 17,65, *df* = 3, in der „schnellen“ Aufwärtsbewegung **VES**: *Chi-Quadrat* = 29,27, in den repetitiven Vertikalbewegungen „mittlerer“ **VRmi**: *Chi-Quadrat* = 23,13 und „maximaler“ Geschwindigkeit **VRma**: *Chi-Quadrat* = 32,6; *df* = 3 bei allen Angaben,  $p < 0,000$ ).

In der *Sagittalebene* konnte lediglich für die repetitive Bewegung „maximaler“ Geschwindigkeit (**SRma**) eine mit dem Alter steigende Beschleunigung nachgewiesen werden (*Chi-Quadrat* = 16,78,  $p < 0,001$ ). Bewegungen mit der Arbeitsanweisung „mittlere“ oder „langsame“ Geschwindigkeit wurden sowohl von sechs- als auch von dreijährigen Kindern mit jeweils ähnlich hohen Beschleunigungen ausgeführt.

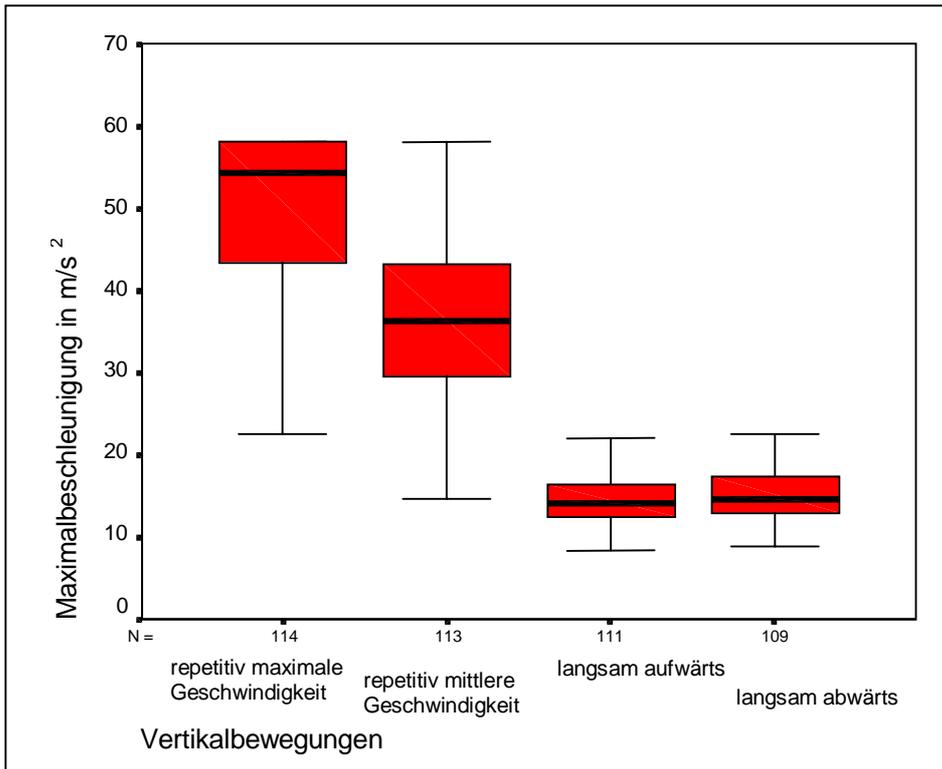


Abb. 25a: Mediane Maximalbeschleunigungen, vertikal

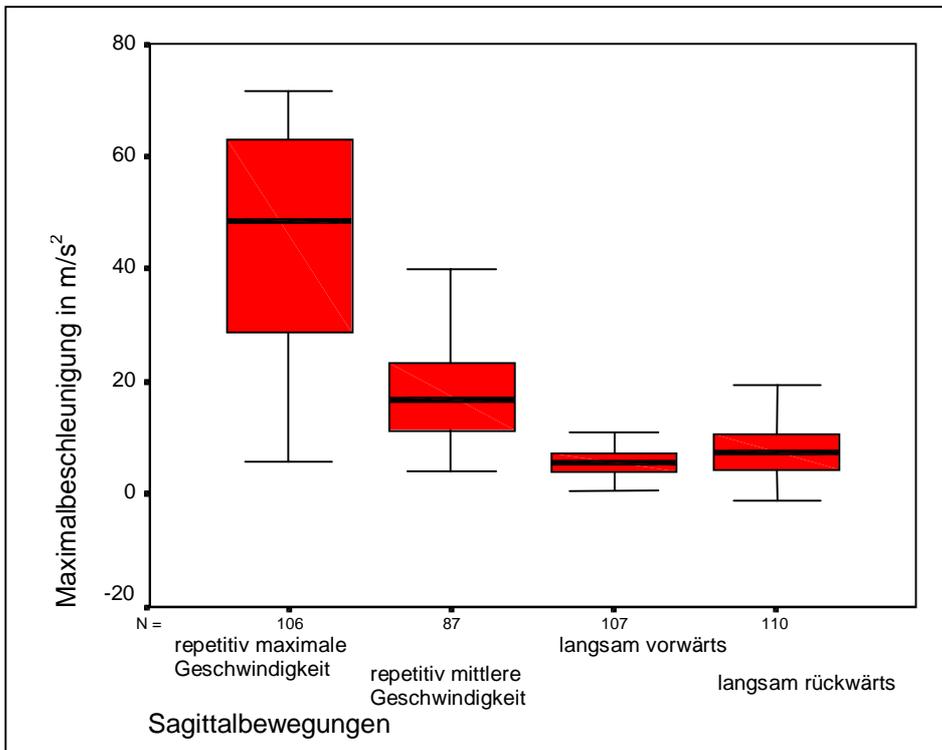


Abb. 25b: Mediane Maximalbeschleunigungen, sagittal

## 4 Ergebnisse - Beschreibung von Griffkraftverläufen: statische und dynamische Aufgaben

Tabelle 6a: Maximalbeschleunigungen in  $m/s^2$ : Mediane und Quartile der verschiedenen Altersgruppen und Bewegungsmodi

Alter in Jahren	3				4				5				6			
	N	M	25%	75%												
<b>Vertikal</b>																
Vertikal einzel „schnell“	32	<b>22,78</b>	17,82	27,05	32	<b>25,92</b>	20,31	33,99	28	<b>35,32</b>	27,84	38,89	24	<b>38</b>	31,57	42,68
Vertikal repetitiv „maximale“ $\bar{v}$	32	<b>44,46</b>	32,46	53,78	32	<b>51,03</b>	43,30	57,97	28	<b>57,97</b>	46,00	57,97	24	<b>57,97</b>	57,97	57,97
Vertikal repetitiv „mittlere“ $\bar{v}$	32	<b>30,80</b>	25,52	37,75	32	<b>33,63</b>	29,79	41,00	28	<b>35,74</b>	25,66	42,91	24	<b>45,37</b>	39,54	56,09
Vertikal einzel „langsam“ aufw.	32	<b>14,36</b>	11,45	16,76	32	<b>12,68</b>	11,31	14,05	28	<b>14,21</b>	12,43	16,70	24	<b>15,64</b>	14,28	17,24
Vertikal einzel „langsam“ abw.	32	<b>13,91</b>	11,82	17,98	32	<b>14,10</b>	13,25	16,10	28	<b>13,89</b>	12,44	16,17	24	<b>17,26</b>	16,08	19,12
<b>Sagittal</b>																
Sagittal repetitiv „maximale“ $\bar{v}$	32	<b>34,13</b>	26,94	54,94	32	<b>48,59</b>	27,21	63,26	28	<b>53,99</b>	36,83	62,90	24	<b>56,11</b>	35,13	64,15
Sagittal repetitiv „mittlere“ $\bar{v}$	32	<b>12,32</b>	12,62	13,43	32	<b>18,47</b>	15,18	17,51	28	<b>14,85</b>	14,24	16,03	24	<b>26,23</b>	15,02	25,88
Sagittal einzel „langsam“ vorw.	32	<b>5,79</b>	4,24	9,74	32	<b>5,23</b>	4,01	6,76	28	<b>5,35</b>	4,00	7,60	24	<b>5,83</b>	4,35	6,44
Sagittal einzel „langsam“ rück.	32	<b>8,81</b>	4,28	12,55	32	<b>5,69</b>	4,19	10,15	28	<b>7,60</b>	4,26	10,34	24	<b>8,16</b>	4,79	12,57

**Legende:**

M = Median; N = Anzahl der Probanden

 $\bar{v}$  = Geschwindigkeit entsprechend der Anweisung „maximal schnell“ bzw. „mittel schnell“

aufw. = aufwärts; abw. = abwärts; vorw. = vorwärts; rück. = rückwärts

25% = erstes Quartil bzw. 25-er Perzentile; 75% = drittes Quartil bzw. 75-er Perzentile

*Tabelle 6b: Maximalbeschleunigungen in  $m/s^2$ ;  
Mediane und Quartile der verschiedenen Bewegungsmodi;  
Gesamtgruppe der Vorschulkinder (N=116)*

<i>Vertikal</i>	<b>M</b>	<b>25%</b>	<b>75%</b>
<i>Vertikal einzel „schnell“</i>	<b>29,41</b>	21,72	38,19
<i>Vertikal repetitiv „maximale“ <math>\bar{v}</math></i>	<b>54,29</b>	43,30	57,97
<i>Vertikal repetitiv „mittlere“ <math>\bar{v}</math></i>	<b>36,19</b>	29,23	43,19
<i>Vertikal einzel „langsam“ aufw.</i>	<b>14,12</b>	12,32	16,32
<i>Vertikal einzel „langsam“ abw.</i>	<b>14,55</b>	13,04	17,26
<b><i>Sagittal</i></b>			
<i>Sagittal repetitiv „maximale“ <math>\bar{v}</math></i>	<b>48,58</b>	28,78	62,91
<i>Sagittal repetitiv „mittlere“ <math>\bar{v}</math></i>	<b>16,72</b>	11,17	23,51
<i>Sagittal einzel „langsam“ vorw.</i>	<b>5,48</b>	4,18	7,27
<i>Sagittal einzel „langsam“ rück.</i>	<b>7,50</b>	4,35	10,65

**Legende:**

M = Median; N = Anzahl der Probanden

 $\bar{v}$  = Geschwindigkeit entsprechend der Anweisung „maximal schnell“ bzw. „mittel schnell“  
aufw. = aufwärts; abw. = abwärts; vorw. = vorwärts; rück. = rückwärts

25% = erstes Quartil bzw. 25-er Perzentile, 75% = drittes Quartil bzw. 75-er Perzentile

Die *höchste mediane Beschleunigung* wurde bei repetitiven Vertikalbewegungen „maximaler“ Geschwindigkeit (**VRma**) erreicht und betrug  $54\text{m/s}^2$ .  $60\text{m/s}^2$  oder noch höhere Beschleunigungen erzielten 9,7% der dreijährigen, 25,8% der vierjährigen, 53,6% der fünfjährigen und 83,3% der sechsjährigen Kinder. Mit zunehmendem Alter stieg der Anteil der Kinder einer Altersgruppe, die Beschleunigungen von mindestens  $60\text{m/s}^2$  erzielten.

Vertikale Einzelbewegungen, für die „maximale“ Geschwindigkeiten gefordert waren (**VES**), ergaben niedrigere Maximalbeschleunigungen (Median  $30\text{m/s}^2$ , Tabelle 6) als vertikale Repetitivbewegungen mit der gleichen Geschwindigkeitsanweisung (**VRma**, Abb. 26). Der Unterschied der Beschleunigungen „schnellster“ repetitiver zu „schnellster“ einzelner Bewegung ist signifikant (*Wilcoxon Test*:  $Z = -13,02$ ,  $p < 0,000$ ). Auch hinsichtlich des Griffkrafteinsatzes unterschieden sich vertikale Repetitiv- und Einzelbewegungen „maximaler“ Geschwindigkeit. Repetitivbewegungen kam der geringere Kraftaufwand zu (s.o.).

In sagittalen Repetitivbewegungen (**SRma**) betragen die Maximalbeschleunigungen im Median  $48,15\text{m/s}^2$ , die durchschnittliche Beschleunigung bei „mittleren“ Geschwindigkeiten (**SRmi**) erreichte im Median  $17\text{m/s}^2$ . Damit lag sie nur geringfügig über dem Wert für einzelne „langsame“ Vertikalbewegungen (**VEL**, Aufwärts/Abwärtsbewegung: Median  $15\text{m/s}^2$ , Tabelle 6). Die geringsten Beschleunigungen am Objekt wurden bei „langsamen“ Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen gemessen (**SEL**, Median 5 bzw.  $7\text{m/s}^2$ , Abb. 25b, Tabelle 6).

Die gemessene Größe *Beschleunigung* war in Vertikalbewegungen aller geforderter Bewegungsmodi signifikant höher als in Sagittalbewegungen (*Wilcoxon Test*:  $Z = -4$  bei repetitiven,  $Z = -12$  bei einzelnen Bewegungen, beide  $p < 0,000$ ).

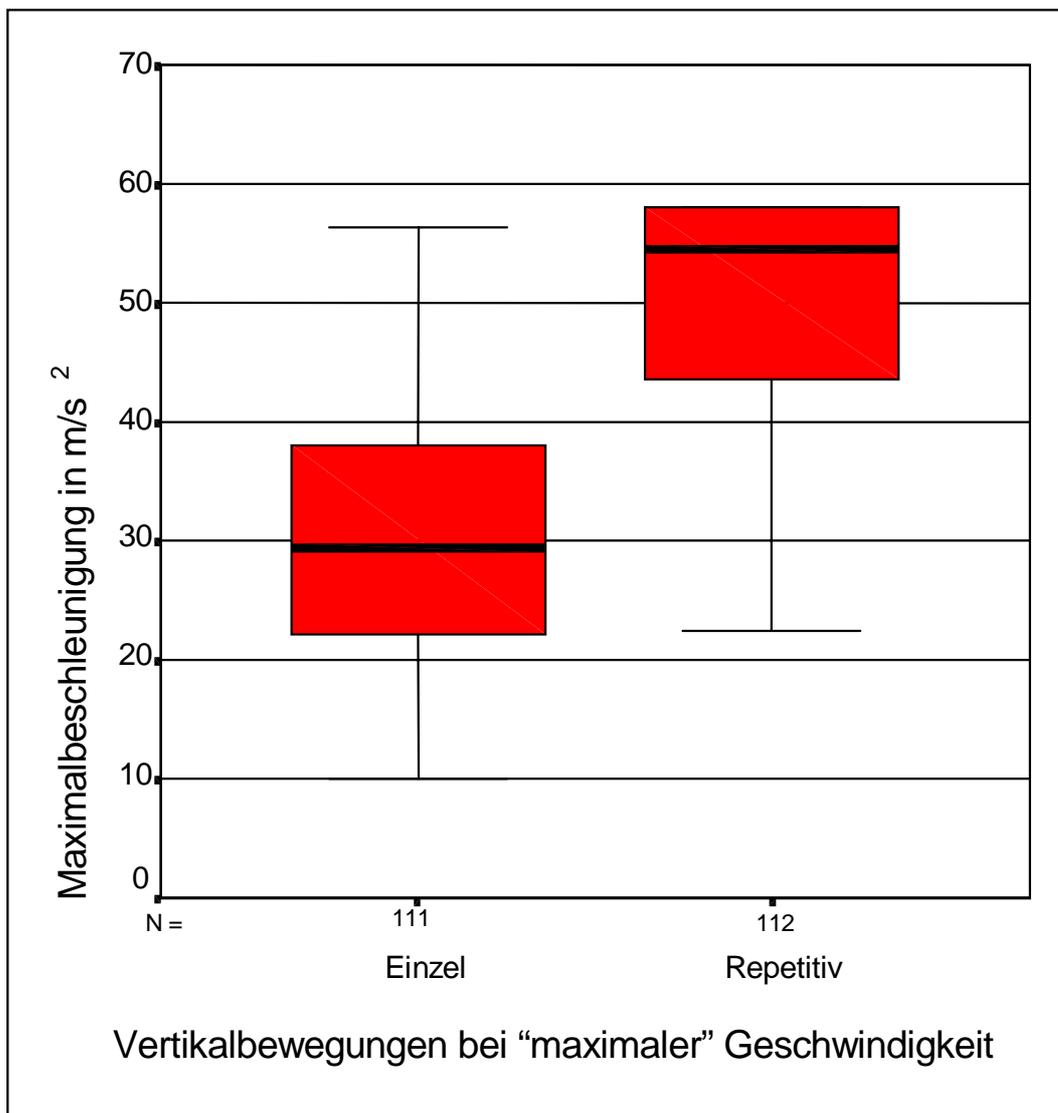


Abb. 26: Maximal erreichte Beschleunigungen bei repetitiven (VRma) bzw. einzelnen (VES) Vertikalbewegungen

#### 4.2.4 Zusammenfassung

In diesem ersten beschreibenden Ergebnisabschnitt dienen die Fallbeispiele dem Aufzeigen der phänomenologischen Unterschiede der Kraft- und Bewegungskurven jüngerer gegenüber jener älterer Kinder.

Während sich die Bewegungskurven der einzelnen „schnellen“ Aufwärtsbewegung des sechsjährigen Kindes durch einen gleichmäßigen Anstieg und Abfall mit zeitnaher, paralleler Griffkraftänderung auszeichnet (Abb. 10a), zeigt entsprechende Beschleunigungs- bzw. Griffkraft-Zeit-Funktion des dreijährigen Kindes eine Vielzahl zusätzlicher Kraftmaxima (Abb. 10b).

In der überlagernden Darstellung der Kurven ist die geringere Wiederholgenauigkeit in Bewegung und Krafteinsatz des Dreijährigen in der Variabilität von zeitlichem Verlauf und maximaler Griffkraftdosis zu erkennen (Abb. 11 und 12). Dieses Phänomen ist andeutungsweise auch bei sagittalen Repetitivbewegungen erkennbar (Abb. 17 und 18).

Die Darstellung der Griffkräfte bei statischen sowie der Griffkräfte und Beschleunigungen bei dynamischen Aufgaben legte ein besonderes Augenmerk auf die Altersabhängigkeit und den Ebenenvergleich. Es zeigte sich, dass statische Griffkräfte (Maximalgriffkraft, Griffkraft bei Maximaler Hebekraft) mit dem Alter ansteigen (4.2.2). Sie sind im Betrag größer als Griffkräfte bei dynamischen Aufgaben (Bewegungen, 4.2.3). Daraus lässt sich ableiten, dass selbst bei (durch das Individuum selbst gewählter) maximaler Beschleunigung des in der Hand gehaltenen Gegenstandes, die maximal mögliche Kraft im Handgriff (individuelle Maximalgriffkraft) in jeder Ebene und Geschwindigkeit ausreichend ist, um einen stabilen Griff zu gewährleisten.

Bei Repetitivbewegungen in der Vertikalebene werden die höchsten Beschleunigungen erzielt (**VR<sub>ma</sub>**, 4.2.3.2). Die Griffkraftamplituden nehmen mit zunehmender Beschleunigung ab (4.2.3.1). Sagittal gilt, dass je höher die bei Repetitivbewegungen erreichte Beschleunigung, desto höher auch die eingesetzte Griffkraft (**SR<sub>ma</sub>**).

Ungeachtet der ungleichmäßigen, weniger wiederholgenauen Bewegungsausführung und Kraftdosierung drei- gegenüber sechsjährigen Kindern ist die grundsätzliche Abstimmung der Kraft- und Bewegungskomponente im Vorschulalter bemerkenswert.

Im folgenden Abschnitt soll dargestellt werden, welchen Einfluss die „Bewegungsebene“, die „Bewegungsrichtung“ und die Geschwindigkeitsanweisung „schnell“, „mittel“ oder „langsam“ auf Griffkraftdosierung und Griffkrafttiming im Vorschulalter haben.

### 4.3 Quantitative Analyse dynamischer Griffkräfte

Die Studie soll zeigen, inwieweit bereits im Vorschulalter die feinmotorischen Fertigkeiten des Griffkrafteinsatzes bei verschiedenen Armbewegungen entwickelt sind. Feinmotorische Fertigkeiten drücken sich u.a. in Griffkraftökonomie und exaktem Griffkrafttiming aus. Aus diesem Grunde wurden hier die Höhe des Krafteinsatzes (*Kraftdosierung*) und die zeitliche Abstimmung des Krafteinsatzes mit bei Bewegungen auftretenden Beschleunigungs- bzw. Trägheitskräften (*Timing*) analysiert (4.3.1). Es soll der Krafteinsatz verschiedener Bewegungsanforderungen (Bewegungsebenen „vertikal“ und „sagittal“ (4.3.2), Geschwindigkeitsanweisungen „schnell“, „mittel“ und „langsam“ (4.3.3), Einfluss der Bewegungswiederholung „repetitiv“ und „einzeln“ (4.3.4), wechselnde Bewegungsrichtungen „vorwärts/rückwärts“ bzw. „aufwärts/abwärts“ (4.3.5)) verglichen werden. Zusätzlich werden probandenbezogene Faktoren wie Alter, Geschlecht und anatomische Maße der Hand berücksichtigt (4.3.6).

#### 4.3.1 Griffkraftdosierung und Griffkrafttiming im Überblick

##### *Griffkraftdosierung: Höhe des Griffkrafteinsatzes*

Die Höhe des Griffkrafteinsatzes bei Bewegungen wird von einer Vielzahl von Faktoren bestimmt. Neben den Absolutwerten ist das Verhältnis von eingesetzter Kraft zu der individuellen Maximalkraft ( $FG_{ant}$ ) interessant, da es darüber Auskunft gibt, wie sicher der Proband den Gegenstand handhabt. Eine sichere Handhabung eines Gegenstandes setzt voraus, dass die Eigenschaften des Objektes gut bekannt bzw. als *interne Repräsentation* von Objekteigenschaften im motorischen Assoziationskortex verankert sind (vgl. Einleitung).

Ein anderer Quotient setzt die eingesetzte Kraft ins Verhältnis zur Beschleunigung (*ratio*), prüft also, inwieweit die aktuelle Bewegung in die Kraftprogrammierung einfließt bzw. ob es eventuell sogar ein gekoppeltes motorisches Kraft-Bewegungs-Programm gibt.

$FG_{ant}$  und *ratio* sind in Tabelle 7 nach Bewegungsmodus und Alter dargestellt. Abbildung 27 zeigt die Lagemaße von  $FG_{ant}$  und *ratio* im Boxplot als Geschwindigkeits- und Ebenenvergleich.

## 4 Ergebnisse - Beschreibung von Griffkraftverläufen: statische und dynamische Aufgaben

Tabelle 7: Griffkraftdosierung: Mediane der Griffkraftmaxima im Verhältnis zu den Beschleunigungsmaxima (ratio) bzw. zu der individuellen Maximalgriffkraft ( $FG_{ant}$ ) nach Altersgruppen und Bewegungsmodi

Bewegungsmodus	Alter in Jahren	3				4				5				6			
	Griffkraft- dosierung	N	M	25%	75%	N	M	25%	75%	N	M	25%	75%	N	M	25%	75%
Vertikal „schnell“	ratio	28	<b>,44</b>	,35	,56	31	<b>,54</b>	,46	,65	28	<b>,49</b>	,36	,54	28	<b>,52</b>	,37	,60
	$FG_{ant}$	28	<b>,40</b>	,30	,48	31	<b>,44</b>	,35	,59	28	<b>,55</b>	,38	,76	28	<b>,48</b>	,33	,57
Vertikal repetitiv „maximale“ $\bar{v}$	ratio	31	<b>,22</b>	,18	,29	31	<b>,24</b>	,19	,27	28	<b>,25</b>	,21	,29	28	<b>,25</b>	,22	,32
	$FG_{ant}$	32	<b>,37</b>	,28	,44	32	<b>,37</b>	,30	,43	28	<b>,40</b>	,32	,49	28	<b>,41</b>	,34	,46
Vertikal repetitiv „mittlere“ $\bar{v}$	ratio	30	<b>,38</b>	,28	,45	32	<b>,38</b>	,33	,43	27	<b>,36</b>	,30	,45	27	<b>,39</b>	,30	,47
	$FG_{ant}$	30	<b>,43</b>	,26	,57	32	<b>,41</b>	0,33	0,59	28	<b>0,42</b>	0,30	0,55	24	<b>,49</b>	0,39	0,56
Vertikal einzel „langsam“ aufwärts	ratio	29	<b>,37</b>	,29	,45	32	<b>,36</b>	,29	,42	25	<b>,33</b>	,28	,42	25	<b>,32</b>	,25	,40
	$FG_{ant}$	29	<b>,19</b>	,14	,25	32	<b>,15</b>	,11	,20	26	<b>,16</b>	,11	,19	26	<b>,14</b>	,10	,17
Vertikal einzel „langsam“ abwärts	ratio	28	<b>,30</b>	,25	,45	31	<b>,31</b>	,25	,33	26	<b>,28</b>	,24	,39	26	<b>,27</b>	,22	,38
	$FG_{ant}$	28	<b>,15</b>	,12	,25	31	<b>,13</b>	,11	,19	26	<b>,14</b>	,12	,16	26	<b>,12</b>	,08	,18

**Legende:**

M = Median; N = Anzahl der Probanden

ratio = Griffkraftmaxima/Beschleunigungsmaxima;  $FG_{ant}$  = Griffkraftmaximum/Maximalgriffkraft $\bar{v}$  = Geschwindigkeit entsprechend der Anweisung „maximal schnell“ bzw. „mittel schnell“

25% = erstes Quartil bzw. 25-er Perzentile; 75% = drittes Quartil bzw. 75-er Perzentile

## 4 Ergebnisse - Beschreibung von Griffkraftverläufen: statische und dynamische Aufgaben

Tabelle 7 (Fortsetzung): Griffkraftdosierung: Mediane der Griffkraftmaxima im Verhältnis zu den Beschleunigungsmaxima (ratio) bzw. zu der individuellen Maximalgriffkraft ( $FG_{ant}$ ) nach Altersgruppen und Bewegungsmodi

Bewegungsmodus	Alter in Jahren	3				4				5				6			
		N	M	25%	75%	N	M	25%	75%	N	M	25%	75%	N	M	25%	75%
<b>Sagittal</b>	<b>Griffkraft-</b> <b>dosierung</b>	N	M	25%	75%	N	M	25%	75%	N	M	25%	75%	N	M	25%	75%
<i>Sagittal repetitiv</i> <i>„maximale“ <math>\bar{v}</math></i>	<b>ratio</b>	28	<b>,46</b>	,34	,58	29	<b>,42</b>	,35	,53	24	<b>,41</b>	,34	,51	24	<b>,51</b>	,46	,53
	<b><math>FG_{ant}</math></b>	29	<b>,60</b>	,46	,86	31	<b>,64</b>	,39	,78	26	<b>,71</b>	,51	,76	26	<b>,66</b>	,57	,72
<i>Sagittal repetitiv</i> <i>„mittlere“ <math>\bar{v}</math></i>	<b>ratio</b>	21	<b>,56</b>	,43	,80	23	<b>,44</b>	,38	,57	21	<b>,54</b>	,39	,74	21	<b>,43</b>	,38	,60
	<b><math>FG_{ant}</math></b>	23	<b>,27</b>	,20	,36	29	<b>,25</b>	,19	,35	23	<b>,26</b>	,20	,35	23	<b>,28</b>	,17	,41
<i>Sagittal einzel</i> <i>„langsam“ vorwärts</i>	<b>ratio</b>	26	<b>,67</b>	,51	1,03	29	<b>,88</b>	,61	1,13	28	<b>,68</b>	,54	,89	28	<b>,84</b>	,60	1,37
	<b><math>FG_{ant}</math></b>	27	<b>,16</b>	,10	,21	29	<b>,14</b>	,10	,17	28	<b>,11</b>	,10	,17	28	<b>,12</b>	,08	,20
<i>Sagittal einzel</i> <i>„langsam“ rückwärts</i>	<b>ratio</b>	27	<b>,50</b>	,45	,72	31	<b>,66</b>	,55	,98	27	<b>,66</b>	,52	,85	27	<b>,69</b>	,41	1,05
	<b><math>FG_{ant}</math></b>	27	<b>,14</b>	,11	,23	31	<b>,14</b>	,12	,19	27	<b>,16</b>	,11	,23	27	<b>,13</b>	,08	,24

**Legende:**

M = Median; N = Anzahl der Probanden

ratio = Griffkraftmaxima/Beschleunigungsmaxima;  $FG_{ant}$  = Griffkraftmaximum/Maximalgriffkraft

$\bar{v}$  = Geschwindigkeit entsprechend der Anweisung „maximal schnell“ bzw. „mittel schnell“

25% = erstes Quartil bzw. 25-er Perzentile; 75% = drittes Quartil bzw. 75-er Perzentile

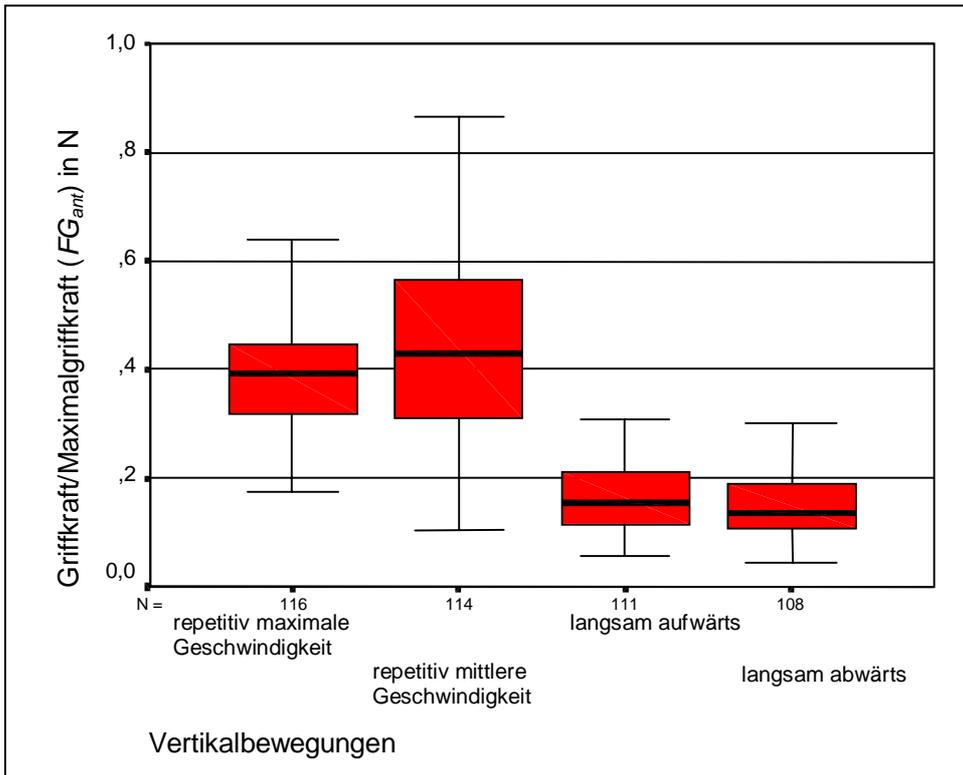


Abb. 27a: Vertikalbewegungen; Griffkraft/individuelle Maximalkraft ( $FG_{ant}$ ) verschiedener Bewegungsmodi

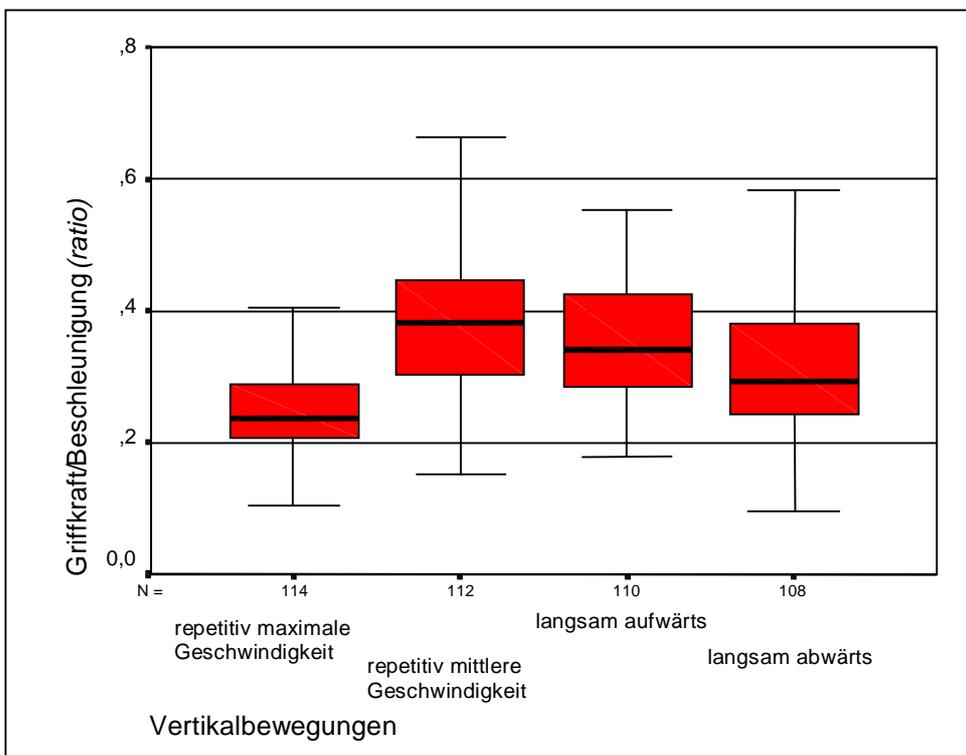


Abb. 27b: Vertikalbewegungen; Mittelwerte des Quotienten Griffkraft/Beschleunigung (ratio)

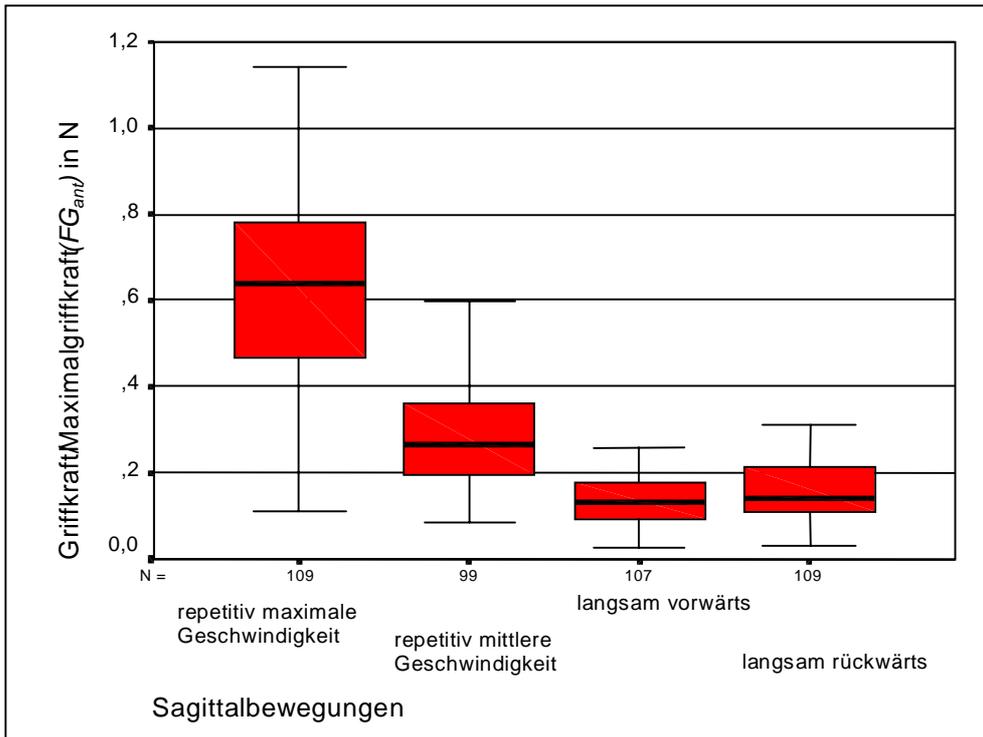


Abb. 27c: Sagittalbewegungen; Griffkraft/individuelle Maximalkraft ( $FG_{max}$ ) verschiedener Bewegungsmodi

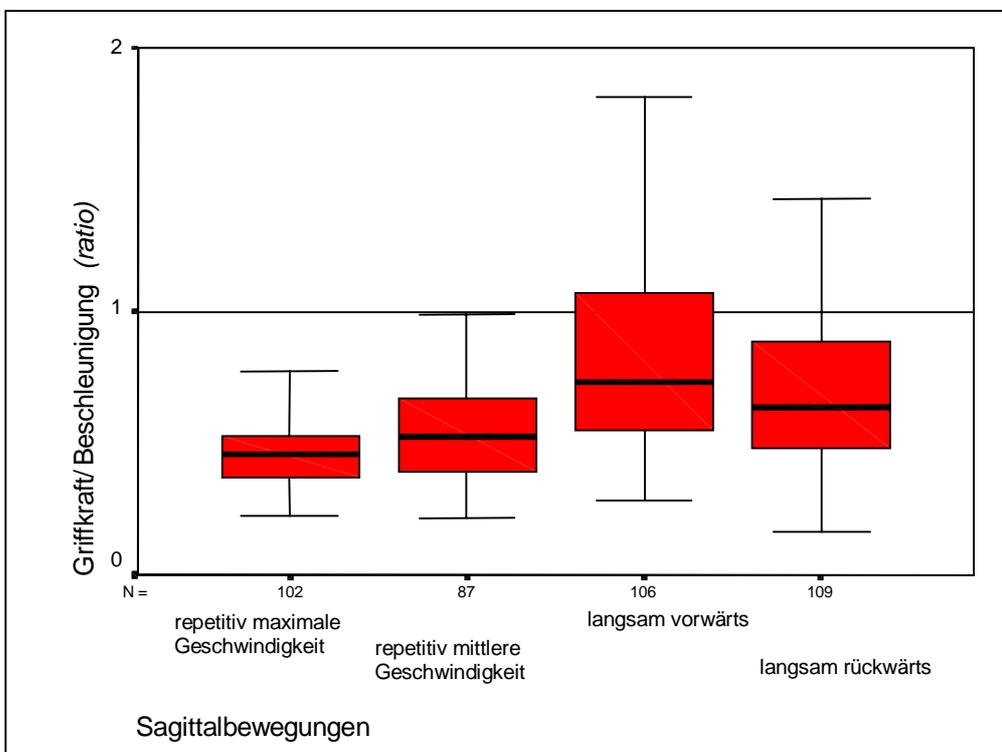


Abb. 27d: Sagittalbewegungen; Mittelwerte des Quotienten Griffkraft/Beschleunigung (ratio)

Tabelle 7 und Abbildung 27 zeigen, dass sich  $FG_{ant}$  und  $ratio$  abhängig von der Bewegungsaufgabe unterschiedlich verhalten.

Bei langsamen Einzelbewegungen (**VEL**, **SEL**) ist die  $ratio$  deutlich höher als die  $FG_{ant}$ , im Verhältnis zur Beschleunigung wird also eine hohe Griffkraft eingesetzt, die im Verhältnis zur individuellen Maximalkraft jedoch gering ist (15%, Tabelle 7).

Bei Bewegungen hoher Geschwindigkeit (**VRma**, **SRma**) hingegen verkehrt sich diese Beobachtung in das Gegenteil: der eingesetzte Kraftanteil ( $FG_{ant}$ ) steigt auf 40%, während die eingesetzte Griffkraft im Verhältnis zur erreichten Beschleunigung ( $ratio$ ) sinkt. Trotz steigender Beschleunigungskräfte wurde die Griffkraft weniger stark erhöht.

#### *Griffkrafttiming: Zeitliche Koordination des Griffkrafteinsatzes*

Zur Beurteilung der zeitlichen Koordination von Krafteinsatz und Ladungskraft (Griffkrafttiming) wurde die Zeitdauer zwischen dem Auftreten der Beschleunigungs- und der Griffkraftmaxima gemessen (Latenz). Bei Vertikalbewegungen sinkt die Dauer der Latenzen bei abnehmender Geschwindigkeit (Abb. 28a), bei Sagittalbewegungen ist die Dauer der Latenzen nicht eindeutig von der Geschwindigkeit abhängig (Abb. 28b).

Die Werte sind in Tabelle 8 wiedergegeben. Da es sich um nicht normalverteilte Daten handelt, werden neben dem Median Werte für die 25. und 75. Perzentile angegeben.

Grafisch werden die Ergebnisse aus Tabelle 8 in Abbildung 28a und b dargestellt.

## 4 Ergebnisse - Beschreibung von Griffkraftverläufen: statische und dynamische Aufgaben

Tabelle 8: Latenzdauer in ms: Mediane und Quartile der verschiedenen Altersgruppen und Bewegungsmodi

<b>Alter in Jahren/ Bewegungsart</b>	<b>3</b>				<b>4</b>				<b>5</b>				<b>6</b>			
<i>Vertikal</i>	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>25%</i>	<i>75%</i>	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>25%</i>	<i>75%</i>	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>25%</i>	<i>75%</i>	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>25%</i>	<i>75%</i>
<i>Vertikal einzel „schnell“</i>	28	<b>52,50</b>	33,33	88,33	31	<b>60,00</b>	33,33	86,67	27	<b>83,33</b>	46,67	125,00	24	<b>76,67</b>	37,50	172,50
<i>Vertikal repetitiv „maximale“ <math>\bar{v}</math></i>	32	<b>43,92</b>	19,06	57,43	29	<b>54,29</b>	37,78	100,07	21	<b>67,50</b>	36,00	83,33	23	<b>38,00</b>	30,99	117,14
<i>Vertikal repetitiv „mittlere“ <math>\bar{v}</math></i>	30	<b>42,50</b>	32,22	68,18	32	<b>45,00</b>	32,20	68,19	26	<b>38,66</b>	29,58	79,29	23	<b>30,83</b>	24,44	46,67
<i>Vertikal einzel „langsam“ aufw.</i>	28	<b>35,00</b>	10,00	66,25	30	<b>35,83</b>	16,67	50,00	24	<b>20,83</b>	7,50	71,25	23	<b>33,33</b>	10,00	60,00
<i>Vertikal einzel „langsam“ abw.</i>	28	<b>20,00</b>	1,25	55,00	31	<b>30,00</b>	6,67	63,33	24	<b>15,83</b>	6,67	38,33	23	<b>16,67</b>	,00	46,67
<i>Sagittal</i>																
<i>Sagittal repetitiv „maximale“ <math>\bar{v}</math></i>	16	<b>101,25</b>	37,50	145,63	28	<b>95,84</b>	46,45	129,07	22	<b>100,41</b>	56,67	206,66	24	<b>75,00</b>	37,08	121,80
<i>Sagittal repetitiv „mittlere“ <math>\bar{v}</math></i>	29	<b>50,00</b>	33,00	79,17	31	<b>63,00</b>	37,14	91,67	27	<b>43,75</b>	30,00	66,00	23	<b>47,00</b>	28,23	69,00
<i>Sagittal einzel „langsam“ vorw.</i>	26	<b>22,50</b>	5,00	45,00	30	<b>21,67</b>	3,33	50,00	26	<b>25,00</b>	10,00	50,00	22	<b>40,00</b>	23,33	86,67
<i>Sagittal einzel „langsam“ rück.</i>	24	<b>63,33</b>	27,50	157,50	26	<b>33,33</b>	5,00	75,00	24	<b>98,33</b>	22,50	147,50	21	<b>53,33</b>	,00	83,75

**Legende:**

M = Median; N = Anzahl der Probanden

 $\bar{v}$  = Geschwindigkeit entsprechend der Anweisung „maximal schnell“ bzw. „mittel schnell“

aufw. = aufwärts; abw. = abwärts; vorw. = vorwärts; rück. = rückwärts

25% = erstes Quartil bzw. 25-er Perzentile; 75% = drittes Quartil bzw. 75-er Perzentile

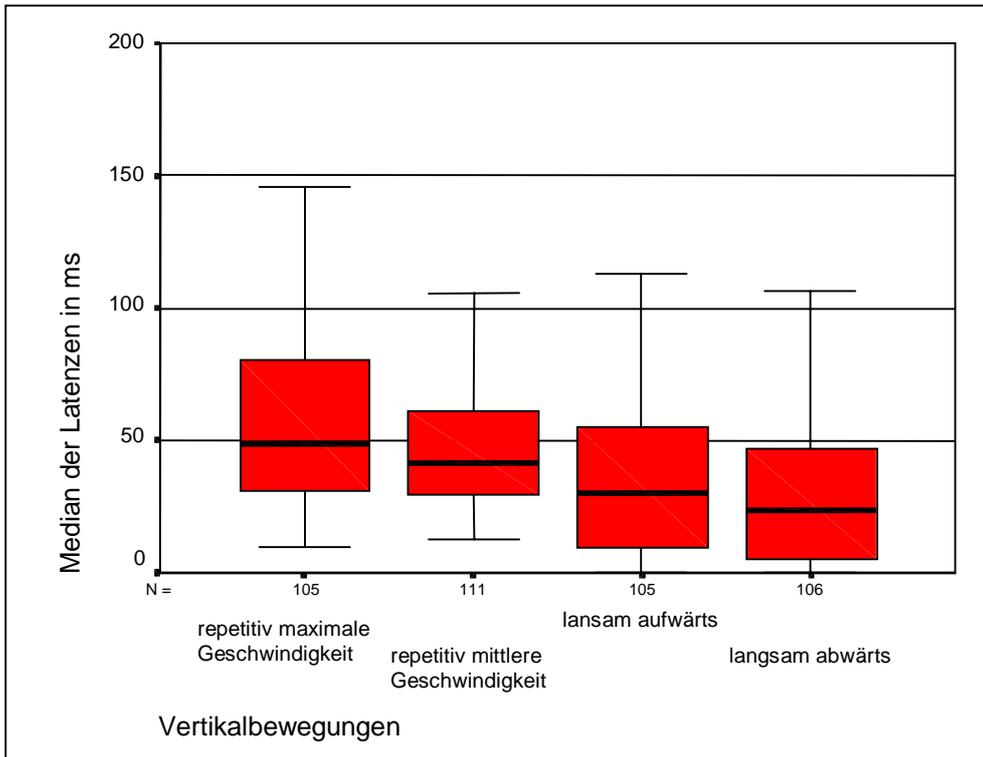


Abb. 28a: Zeitabstände von Beschleunigungsmaxima bis zu Griffkraftmaxima (Latenz) bei Vertikalbewegungen

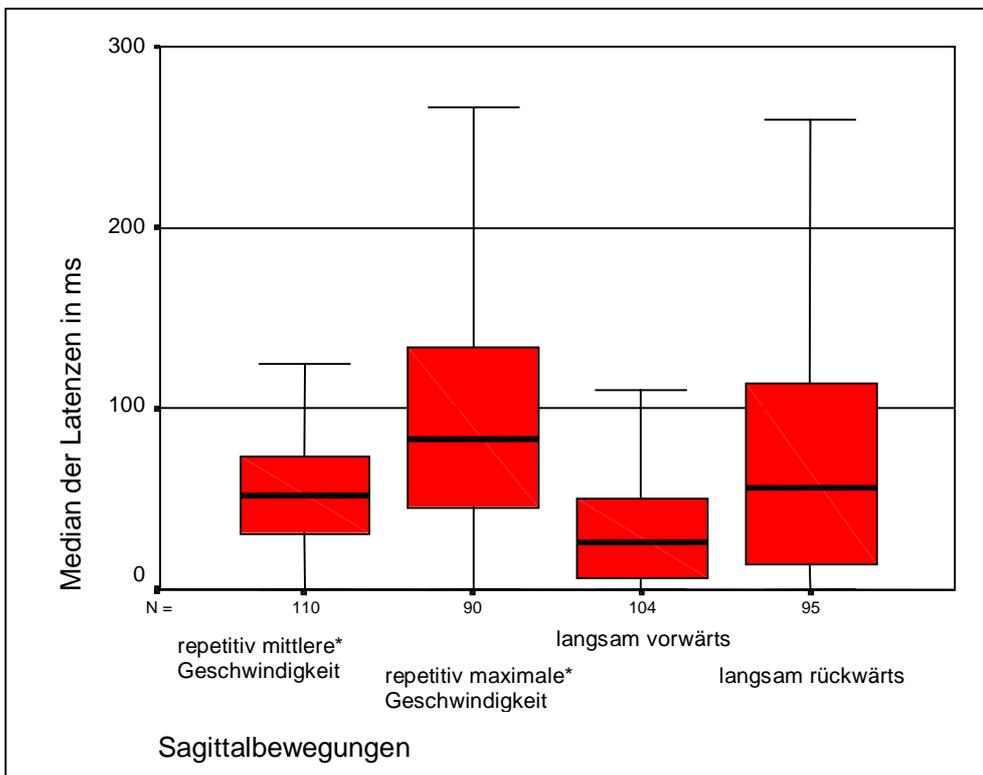


Abb. 28b: Zeitabstände von Beschleunigungsmaxima bis zu Griffkraftmaxima (Latenz) bei Sagittalbewegungen (\*cave!: in 28a steht der Plot für „maximal“ links)

### 4.3.2 Vertikal- und Sagittalebene im Vergleich

Die bisherige Darstellung dynamischer Griffkräfte bei definierten Bewegungsmodi zeigte, dass der Griffkrafteinsatz hinsichtlich Dosis und Timing gewisse Gesetzmäßigkeiten aufweist, die im Zusammenhang mit dem geforderten Bewegungsmodus stehen. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der Griffkrafteinsatz in Abhängigkeit von einer geplanten Bewegung dosiert und *getimed* wird. Wie gut die Abstimmung von Bewegung und Krafteinsatz bei Vorschulkindern möglich ist, soll die vorliegende Studie zeigen. Dazu ist es notwendig, die verschiedenen Bewegungsmodi hinsichtlich ihrer Auswirkung auf den Griffkrafteinsatz näher zu betrachten.

#### *Griffkraftdosierung*

Um die Griffkraftdosis im Ebenenvergleich beurteilen zu können ist es notwendig, die einflussnehmenden Trägheitskräfte zu berücksichtigen. In der Vertikalebene werden beim Abwärtsführen des Objektes Bewegungen in Richtung der Erdanziehungskraft ausgeführt. Zur Initiierung der Abwärtsbewegung ist also keine weitere Griffkraft am Objekt notwendig, für einen stabilen Griff ist es lediglich nötig, das Eigengewicht des Objektes zu halten. Bei dem Aufwärtsbewegen des Objektes hingegen muss entgegen der Gravitationskraft beschleunigt werden. Die Summe der Kräfte, die an dem in der Hand gehaltenen Gegenstand entstehen, müssen durch die Griffkraft kompensiert werden, damit ein stabiler Griff gewährleistet ist.

Bewegungen in der Sagittalebene finden im Gegensatz zur Vertikalebene parallel zur Gravitationskraft statt. Die Gravitationskraft bleibt zwar konstant, bei Richtungsumkehr am vorderen bzw. hinteren Umkehrpunkt müssen hingegen zusätzlich am Objekt auftretende Trägheitskräfte durch einen entsprechenden Griffkraftanstieg ausgeglichen werden.

Im Ebenenvergleich sind also Gravitations- und Trägheitskräfte relevant für den Griffkrafteinsatz, so dass im Folgenden dargestellt wird, welchen Einfluss sie auf den Griffkrafteinsatz haben. In beiden Ebenen wurden die niedrigsten Griffkräfte für Einzelbewegungen gemessen (**VEL**, **SEL**) (5N, vgl. Tabelle 5). Bei „mittleren“ Geschwindigkeiten (**VRmi**, **SRmi**) waren die eingesetzten Griffkräfte sagittal niedriger als vertikal (8N bzw. 12N). Im Gegensatz dazu führten die Kinder Repetitivbewegungen „maximaler“ Geschwindigkeit (**VRma**, **SRma**) vertikal mit einem deutlich niedrigeren medianen Krafteinsatz aus (12N) als sagittal (20N). Der Ebenenunterschied lässt sich anhand der *ratio* (Quotient aus Griffkraft und Beschleunigung) noch deutlicher zeigen: sagittal ist die *ratio* mit 0,4 bis 1 fast doppelt so hoch wie vertikal. Der Ebenenunterschied in der Griffkraftdosierung in Relation zur Beschleunigung (*ratio*) ist signifikant in „langsamen“ und

„maximalen“ Geschwindigkeiten (**VEL**, **SEL**; **VRma**, **SRma**) ( $p < 0,05$ ,  $Z = -10,23$  bei Einzelbewegungen,  $Z = -11,11$  bei Repetitivbewegungen „maximal“, vgl. Abbildung 27b, d). Dynamische Griffkräfte bei Bewegungen entlang der Gravitationskraft wurden demnach niedriger dosiert als jene parallel zur Gravitation.

Kennzeichnend für die vertikalen Bewegungen ist das konstante Verhältnis von Beschleunigungskraft/Griffkraft (*ratio* = 0,2 bei „maximalen“ Geschwindigkeiten und 0,4 bei Einzelbewegungen), während die *ratio*-Quotienten der Sagittalebene deutlichen Schwankungen unterliegen (vgl. Tabelle 7, Abb. 27d).

### *Griffkrafttiming*

Auch für die zeitliche Abstimmung von Griffkraft und Beschleunigung(skraft) ist der Ebenenvergleich interessant. In der Vertikalebene stellte sich ein deutlicher Zusammenhang von Latenz und Bewegungsgeschwindigkeit heraus, der sich in der Sagittalebene nicht bestätigen ließ.

Für die *Vertikalebene* konnte gezeigt werden, dass je langsamer die Bewegungsgeschwindigkeit, desto kürzer die Latenzzeit zwischen Griffkraft- und Beschleunigungsmaximum (63ms bei „schnellen“ Einzelbewegungen (**VES**), 49ms bei Repetitivbewegungen „maximaler“ (**VRma**) und 41ms bei denen „mittlerer“ Geschwindigkeit (**VRmi**), Tabelle 8, Abb. 28a). Bei gleichen Bewegungsabläufen scheint die Übereinstimmung von Kraft und Bewegung an der Endstrecke Hand um so besser zu sein, je langsamer die Bewegung ausgeführt wird. Diese Gesetzmäßigkeit gilt nicht für die einzelne, „maximal schnelle“ Vertikalbewegung (**VES**). Obwohl die Beschleunigungen mit  $25\text{m/s}^2$  geringer waren, als jene bei maximal „schnellen“ Repetitivbewegungen (**VRma**,  $60\text{m/s}^2$  Abb. 32b, 4.3.4), waren die gemessenen Latenzen zwischen Griffkraft und Beschleunigungsmaximum mit bis zu 83ms bedeutend länger.

In der *Sagittalebene* hingegen ließ sich keine eindeutige Gesetzmäßigkeit für den Zusammenhang von Latenzzeit und Bewegungsmodus erkennen (Abb. 28b). Die Latenzen waren bei „langsamen“ Rückwärtsbewegungen (**SELrück**) deutlich länger als bei „langsamen“ Vorwärtsbewegungen (**SELvor**) und bei „mittleren“ Geschwindigkeiten (**SRmi**) länger als bei „maximal schnellen“ (**SRma**) Bewegungen (Tabelle 8).

Kein Ebenenunterschied trat im Vergleich der Latenzen „maximal schneller“ Repetitivbewegungen (**VRma/SRma**) auf. In beiden Ebenen betragen die zeitlichen Abstände der Kraftmaxima im Median 50ms. Im Ebenenvergleich ließ sich ferner feststellen, dass sagittal längere zeitliche Abstände zwischen Kraft- und Beschleunigungsmaximum bestehen als vertikal. Die Latenzen der Sagittalebene fielen zudem durch eine größere Spannbreite der Messwerte auf (Abb. 28).

### 4.3.3 Auswirkung von Geschwindigkeitssteigerung auf Griffkrafttiming und -dosierung

Um neben dem Einfluss der Bewegungsebenen auch den Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit beurteilen zu können, sollen Kraftdosierung und -timing im Folgenden für repetitive und einzelne Bewegungen beurteilt werden.

#### 4.3.3.1 Geschwindigkeitsunterschiede bei Repetitivbewegungen

##### *Griffkrafttiming*

Anstelle der Geschwindigkeit wurde in der vorliegenden Studie die Beschleunigung gemessen. Dabei konnte für die Vertikalebene gezeigt werden, dass eine Beschleunigungszunahme von im Median  $36\text{m/s}^2$  auf  $54\text{m/s}^2$  in einer Latenzverkürzung von im Median 50ms auf 40ms nach sich zog. Sagittal konnte bei Steigerung der Beschleunigung von im Median  $16,7\text{m/s}^2$  auf  $48,6\text{m/s}^2$  eine Latenzabnahme von 80 auf 50ms beobachtet werden. In der Sagittalebene wurde der Latenzunterschied der Repetitivbewegungen signifikant ( $p < 0,000$ ,  $Z = -4,08$ ). Für Repetitivbewegungen beider Ebenen gilt, dass je höher die Beschleunigung einer Bewegung, desto näher liegen Beschleunigungs- und Griffkraftmaximum beieinander.

Als weitere Darstellungsmöglichkeit der Geschwindigkeit bietet sich die Frequenz an. Für eine Frequenz gilt, dass je schneller eine Bewegung durchgeführt wird, desto mehr Bewegungseinheiten werden pro Zeiteinheit gezählt und die *Frequenz* der Bewegungseinheiten nimmt zu. Stellvertretend für die Geschwindigkeit einer Bewegung wurde die Bewegungsfrequenz als X – Koordinate gegen Kraftdosierung und Latenz aufgetragen (Abb. 29).

Abbildung 29 zeigt bis zu einer Frequenz von 2Hz in beiden Ebenen einen Abfall der Latenzen. Bei steigender Frequenz nimmt die Latenz ab. Während ab dem Frequenzbereich von 2 Hz weiterhin ein stetiges Abfallen der Latenzdauern in der Sagittalebene zu verzeichnen ist, stellt sich in der Vertikalebene ein leichter Anstieg der Latenzdauern dar. Dieses Phänomen ist dadurch zu erklären, dass ab bei einer Bewegungsfrequenz von 2Hz in der Vertikalebene bereits die Messgrenze des vertikalen Beschleunigungssensors erreicht ist. In vivo treten die wirklichen Beschleunigungsmaxima aber erst zu einem späteren Zeitpunkt auf. Die Zeitdauer von fälschlicherweise zu früh gemessenen Beschleunigungsmaxima und Griffkraftmaxima verlängert sich entsprechend und erklärt die ab der Frequenz von 2Hz wieder ansteigende Latenz.

Insgesamt waren die Latenzen im niedrigeren Frequenzbereich (1,5 - 2Hz) sagittal signifikant länger als vertikal ( $p < 0,000$ ,  $Z = -5,65$ ,  $N_{\text{sag}} = 90$ ,  $N_{\text{vert}} = 111$ , *Mann-Whitney-U-Test*). Im höheren Frequenzbereich (2,5 bis 3Hz) unterschieden sie sich nicht oder nur unwesentlich.

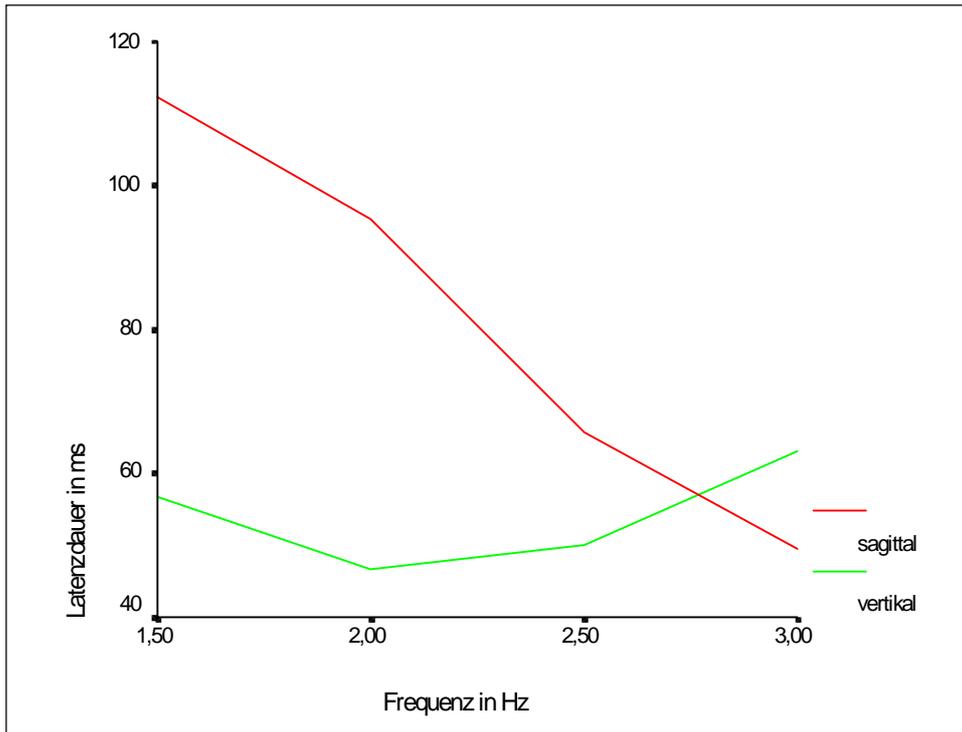


Abb. 29: Veränderung der Latenzdauer bei Frequenzzunahme

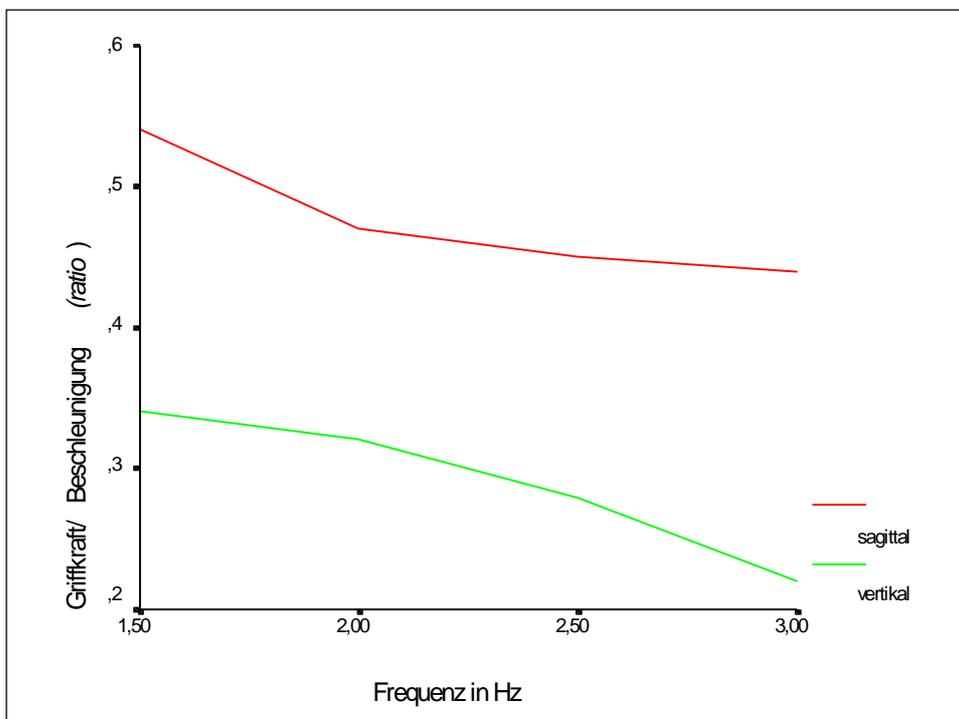


Abb. 30: Veränderung der ratio (Griffkraft/Beschleunigung) bei Frequenzzunahme

### *Griffkraftdosierung*

Hinsichtlich der Griffkraftdosierung fällt zunächst ein über das gesamte Frequenzspektrum signifikanter Ebenenunterschied der *ratio* auf ( $p < 0,000$ ,  $Z = -5$ , Abb. 30). Mit steigenden Frequenzen fällt die *ratio* in beiden Ebenen signifikant ab ( $p < 0,000$ ,  $Z = -9,01$ , vertikal;  $p < 0,027$ ,  $Z = -2,21$ , sagittal; Abb. 30). Eine Abnahme der *ratio* bedeutet, dass die aktuell eingesetzte Griffkraft im Verhältnis zur Beschleunigungskraft nur geringfügig oder gar nicht zunimmt. Es wird nur so viel Kraft eingesetzt, wie für die entsprechende Bewegungsgeschwindigkeit nötig.

Betrachtet man bei „maximalen“ Geschwindigkeiten den Griffkrafteinsatz, so fällt auf, dass der Krafteinsatz sagittal grundsätzlich auf höherem Niveau liegt als vertikal (20N im Vergleich zu 12N, Tabelle 5), und die *ratio* sagittal um 0,2N höher ist als vertikal. Bei Geschwindigkeitssteigerung nimmt die *ratio* sagittal geringfügiger ab (um 0,04, von 0,49 auf 0,45) als vertikal (um 0,14, von 0,38 auf 0,24, vgl. Tabelle 7, Abb. 27). Ferner ließ sich zeigen, dass Sagittalbewegungen bei hohen Beschleunigungen mit einem größeren Anteil der Maximalgriffkraft ( $FG_{ant}$ ) ausgeführt werden als jene in der vertikalen Ebene. Bei Geschwindigkeitssteigerung stieg der individuelle Griffkraftanteil sagittal signifikant von 27% auf 65% ( $p < 0,000$ ), während in der Vertikalebene ein Abfall der  $FG_{ant}$  von 44% auf 39% ( $p < 0,007$ ) zu verzeichnen war. Abfall von *ratio* und  $FG_{ant}$  zeigen eindeutig eine Verminderung des Griffkrafteinsatzes bei Geschwindigkeitssteigerung in der Vertikalebene an.

Der Griffkrafteinsatz zeigte sich nach den vorliegenden Ergebnissen insofern von der Bewegungsgeschwindigkeit abhängig, als sich sowohl die zeitliche Latenz als auch die Griffkraftdosis mit zunehmenden Geschwindigkeiten verringerten. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit war in der Vertikalebene stärker ausgeprägt, als in der Sagittalebene und verdeutlichte sich bei Geschwindigkeitssteigerung (vgl. 4.3.2).

#### *4.3.3.2 Geschwindigkeitsunterschiede bei Einzelbewegungen*

Da die „maximal schnelle“ Einzelbewegung (**VES**) nur in der Vertikalebene durchgeführt wurde, beschränkt sich die folgende Abhandlung über die Geschwindigkeitsabhängigkeit einzelner Bewegungen auf die vertikale Ebene. Hinsichtlich der *Griffkraftdosierung* zeigte sich, dass die Kinder bei hohen Geschwindigkeiten (**VES**) das Greifobjekt stärker griffen als bei „langsamen“ Bewegungen (**VEL**). Bei „schnellen“ Aufwärtsbewegungen betrug die *ratio* 0,49, bei „langsamen“ Aufwärtsbewegungen lediglich 0,37 (Tabelle 7, Abb. 31).

Auch die  $FG_{ant}$  ergab einen geringeren Wert für „langsame“ (**VEL**) (15% der Maximalgriffkraft) als für „schnelle“ Bewegungen (**VES**, 46%, Tabelle 7, Abb. 31). Der signifikant höhere absolute Griffkrafteinsatz bei „schnellen“ gegenüber „langsamen“ vertikalen Einzelbewegungen ( $Z = -7,06$  bei  $p < 0,000$ ) unterstreicht den ökonomischeren Krafteinsatz bei geringer Bewegungsgeschwindigkeit.

Hinsichtlich des *Griffkrafttiming* fiel eine signifikant kürzere Latenz „langsamer“ (**VEL**) gegenüber „schneller“ Bewegungen (**VES**) auf. In der „langsamen“ Aufwärtsbewegung betrug die Latenz 30ms ( $N = 105$ ), in der „schnellen“ Aufwärtsbewegung war sie hingegen im Median mit 63ms doppelt so lang (Tabelle 8,  $N = 110$ ,  $p < 0,000$ ,  $Z = -5,66$ ).

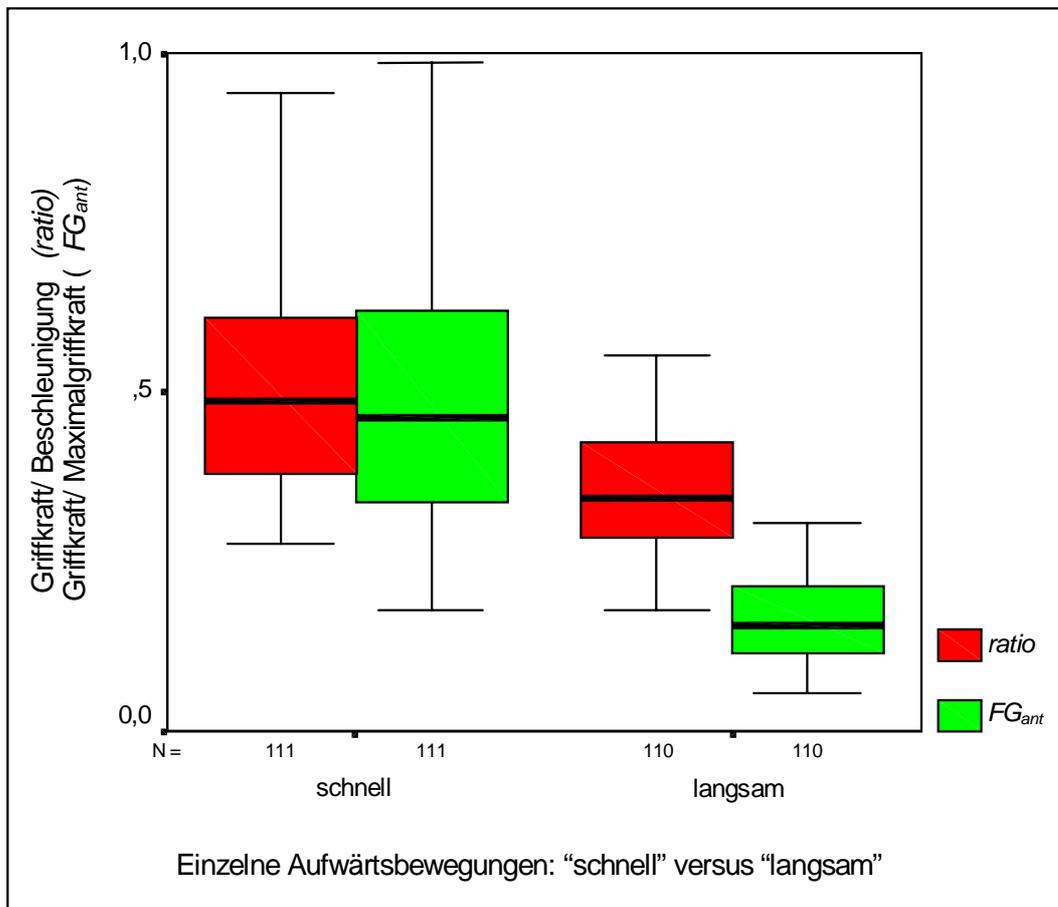


Abb. 31: Griffkraftdosierung bei „langsamen“ (VEL) und „schnellen“ (VES) einzelnen Aufwärtsbewegungen

### 4.3.4 Einzel- und Repetitivbewegungen im Vergleich

Bereits im vorherigen Abschnitt über die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Griffkrafteinsatzes wurden die Ergebnisse für einzelne und repetitive Bewegungen getrennt dargestellt. Im Mittelpunkt dabei stand jedoch der Geschwindigkeitsvergleich der repetitiven bzw. der einzelnen Bewegungen untereinander. Dieser Abschnitt soll Aufschluss über den Einfluss der Bewegungswiederholung bei vergleichbar schnellen Bewegungen geben.

Der Vergleich maximal „schneller“ Einzelbewegung (**VES**) und maximal „schneller“ Repetitivbewegung (**VRma**) zeigte erstaunlicherweise, dass die Griffkraft bei Einzelbewegungen höher dosiert wird als bei Repetitivbewegungen, obwohl bei Repetitivbewegungen effektiv die höheren Beschleunigungen erzielt werden. Es scheint demnach für die Griffkraftdosierung von Bedeutung zu sein, ob sich die Geschwindigkeitsmaximierung auf Einzelbewegungen oder auf repetitive Bewegungen bezieht.

#### *Griffkraftdosierung*

Bei „maximal schnellen“ Repetitivbewegungen (**VRma**) betrug der Median der *ratio* nur 50% der *ratio* bei Einzelbewegung (0,24 bzw. 0,5, Tabelle 7, Abb. 32a). Ein kleiner *ratio*-Quotient zeigt einen stärkeren Beschleunigungsanstieg als Griffkraftanstieg an. Bei Repetitivbewegungen mit der kleineren *ratio* ist die Griffkraftdosierung geringer als bei Einzelbewegungen.

Der  $FG_{ant}$ -Vergleich einzelner und repetitiver Bewegungen bestätigt, dass bei „schnellen“ Einzelbewegungen (**VES**) ein höherer Kraftanteil (47%) eingesetzt wurde, als bei Wiederholbewegungen (39%, Tabelle 7). Die Unterschiede von *ratio* und  $FG_{ant}$  der einzelnen und repetitiven Vertikalbewegung sind signifikant ( $p < 0,000$ ,  $Z = -5$ , *Mann-Whitney-U-Test*).

#### *Griffkrafttiming*

In den Einzelbewegungen (**VES**) zeigten sich im Vergleich zu Repetitivbewegungen (**VRma**) signifikant längere Latenzen zwischen Beschleunigungs- und Griffkraftmaxima (67ms gegenüber 50ms, jeweils Median aller Altersgruppen,  $p < 0,012$ ,  $Z = -2,5$ , *Mann-Whitney-U-Test*, Abb. 32b, Tabelle 8).

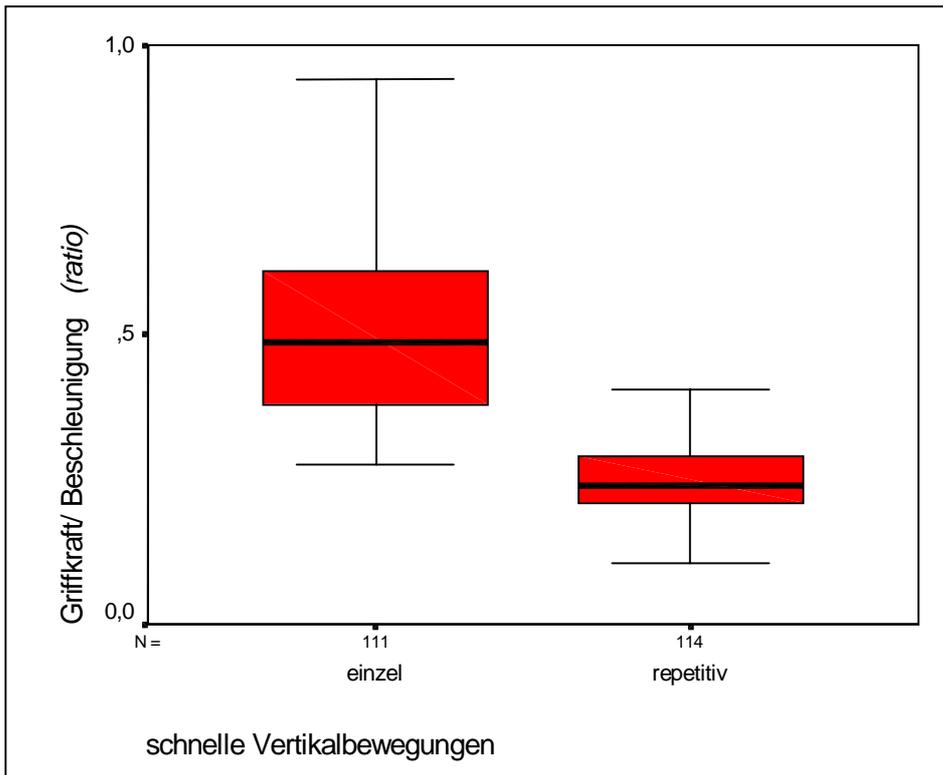


Abb. 32a: Griffkraftdosierung bei einzelnen „schnellen“ (VES) und repetitiv „schnellen“ (VRma) Vertikalbewegungen

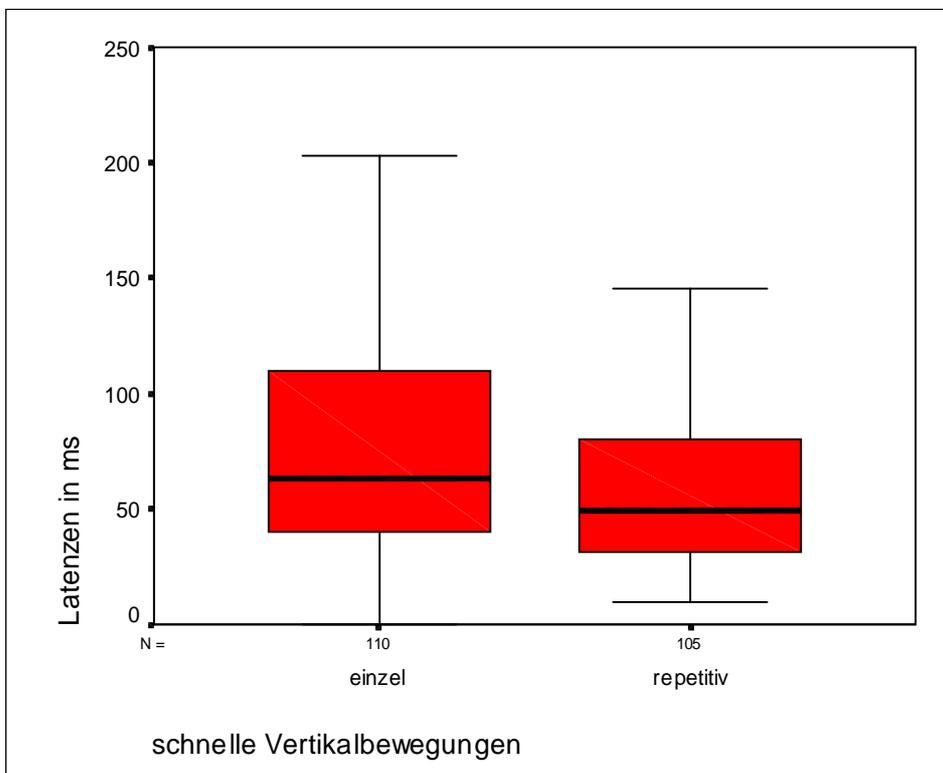


Abb. 32b: Latenz bei einzelnen „schnellen“ (VES) und repetitiv „schnellen“ (VRma) Vertikalbewegungen

### 4.3.5 Richtungsvergleich der „langsamen“ Einzelbewegungen

In den vorangehenden Darstellungen wurde bereits auf den entscheidenden Einfluss der Trägheitskräfte eingegangen. In diesem Abschnitt soll herausgearbeitet werden, inwieweit die Bewegungsrichtung „vorwärts/rückwärts“ (**SEL**) bzw. „aufwärts/abwärts“ (**VEL**) Einfluss auf Kraftdosierung und -timing nimmt. Bei „langsamen“ Bewegungen ist die  $FG_{ant}$  (Anteil der verwendeten Griffkraft an der individuellen Maximalgriffkraft) die geeignete Größe zur Beurteilung der Kraftdosierung, da die erreichten Beschleunigungen gering sind und nur eine untergeordnete Rolle spielen.

#### *Griffkraftdosierung*

Bei Aufwärtsbewegungen ist die  $FG_{ant}$  geringfügig größer als bei Abwärtsbewegungen ( $FG_{ant}=16\%$  bzw.  $13\%$ , vgl. Tabelle 7, Abb. 33a). Um das Greifobjekt initial gegen die Gravitationskraft nach oben zu beschleunigen, muss die Griffkraft höher dosiert werden als bei Abwärtsbewegungen in Richtung der Gravitation. Sechsjährige Kinder wendeten einen signifikant geringeren Anteil ihrer Griffkraft auf als dreijährige ( $Z = -2,287$  bei Aufwärtsbewegungen und  $Z = -2,328$  bei Abwärtsbewegungen,  $p < 0,02$ ).

Sagittal nahmen Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen im Median eine  $FG_{ant}$  von  $14\%$  ein (Tabelle 7). Die Vorwärtsbewegungen erfolgten bei Sechs- und Dreijährigen mit geringfügig niedrigerer Griffkraft als die Rückwärtsbewegungen (Abb. 33b). Während die Spannbreite der  $FG_{ant}$  in Vorwärtsbewegungen ( $15\%$  bis  $35\%$ ) in beiden Altersgruppen vergleichbar groß war, zeigte sich die Spannbreite der Rückwärtsbewegungen dreijähriger ( $5\%$  bis  $38\%$ ) deutlich größer als jene sechsjähriger Kinder ( $5\%$  bis  $28\%$ ).

#### *Griffkrafttiming*

Bei Abwärtsbewegungen waren die Latenzen mit  $23\text{ms}$  kürzer als bei Aufwärtsbewegungen mit  $30\text{ms}$  (Tabelle 8). Sagittal wiesen die vom Körper weg führenden Vorwärtsbewegungen den signifikant kürzeren Abstand zwischen den Kraftmaxima auf ( $26\text{ms}$  gegenüber  $56\text{ms}$  bei Rückwärtsbewegungen des Armes;  $p < 0,001$ ,  $Z = -3,321$ ,  $N_{\text{vor}} = 104$ ,  $N_{\text{rück}} = 95$ ). Zusammengefasst war das *Krafttiming* einzelner Bewegungen in Vorwärts- und Abwärtsbewegungen mit kürzeren Latenzen besser als bei Bewegungen entgegen der Gravitation bzw. zurück zum Körper (Tabelle 8).

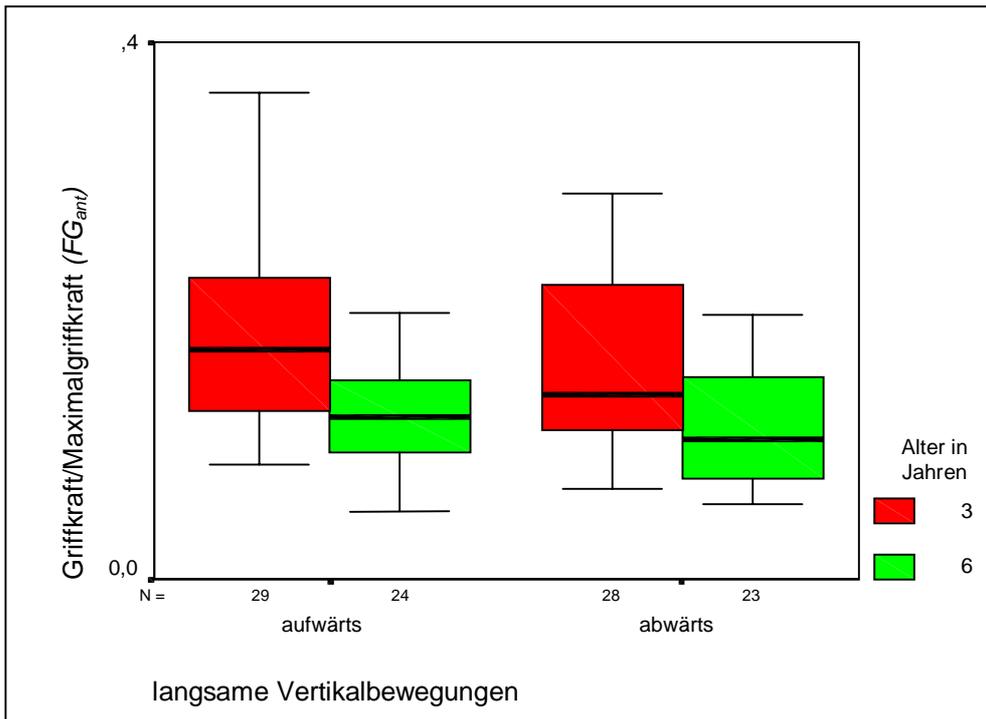


Abb. 33a: Anteil der eingesetzten Griffkraft an der individuellen Maximalgriffkraft (FG<sub>ant</sub>) bei „langsamen“ Vertikalbewegungen (VEL) im Richtungs- und Altersvergleich

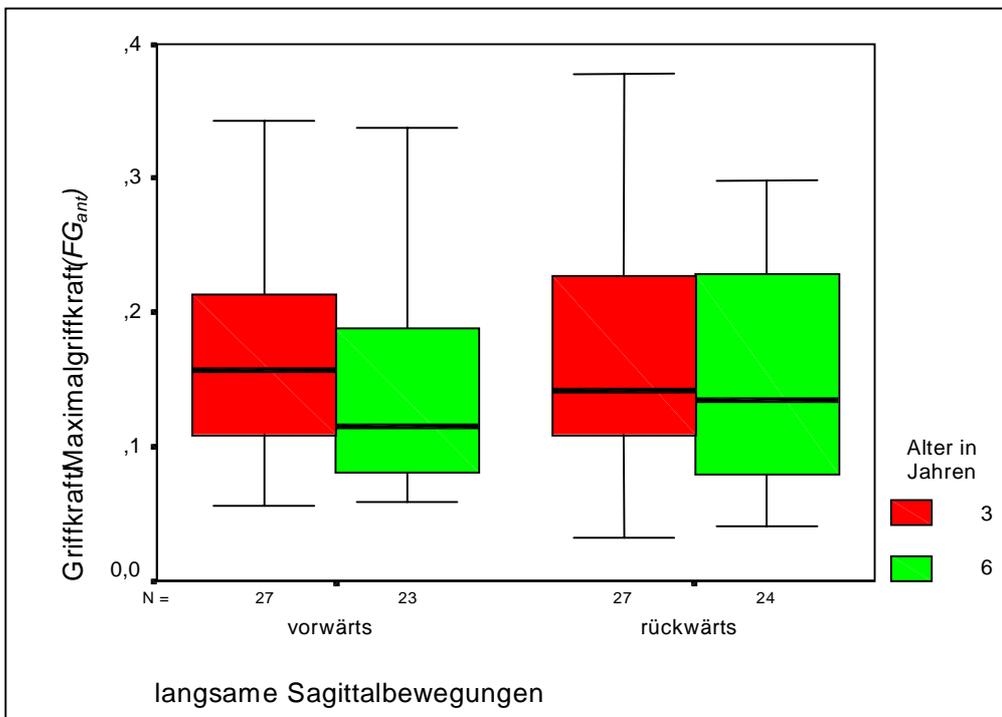


Abb. 33b: Anteil der eingesetzten Griffkraft an der individuellen Maximalgriffkraft (FG<sub>ant</sub>) bei „langsamen“ Sagittalbewegungen (SEL) im Richtungs- und Altersvergleich

### 4.3.6 Probandenbezogene Einflussfaktoren

#### 4.3.6.1 Alter

Die gegebenen signalstatistischen Auswertemethoden ließen keinen signifikanten Unterschied in Griffkraftdosierung und Griffkrafttiming drei- bis sechsjähriger Kinder bei dynamischen Aufgaben erkennen. Die Tabellen zur Signifikanzprüfung der Altersunterschiede von *ratio*,  $FG_{ant}$  und Latenz belegen dies (vgl. Tabelle 8.3).

#### 4.3.6.2 Geschlecht

Im Vergleich der Gruppe der Mädchen gegenüber der Gruppe der Jungen zeigte sich, dass Mädchen in den statischen Aufgaben eine signifikant geringere Griffkraft einsetzten. Bei frei gehaltenem Objekt betrug die mittlere Griffkraft der Mädchen 29,8N, die der Jungen 33,1N. Für die Griffkraft bei maximaler Hebekraft konnte ebenfalls eine Differenz zwischen Mädchen und Jungen festgestellt werden (23,3N bzw. 26,8N, *t-Test für unverbundene Stichproben*  $p < 0,05$ , vgl. Tabelle 8.4b). Eine geringere Kraftdifferenz zwischen den Geschlechtern fand sich in der Maximalen Hebekraft, die durch das Drücken des Objektes gegen einen Hebel auf eine Waage aufgebracht wurde. Bei relativ geringerer Griffkraft übertrugen Mädchen eine ähnlich hohe Kraft wie Jungen (Tabelle 8.4b).

Für den Krafteinsatz bei maximal „schnellen“ Repetitivbewegungen sagittal (**SRma**) konnte beobachtet werden, dass Jungen einen höheren Anteil ihrer Maximalgriffkraft einsetzten als Mädchen. Mädchen hingegen steigerten ihre Griffkraft lediglich im Verhältnis zur Beschleunigung. Der Geschlechtsunterschied ist signifikant ( $p < 0,05$  für *ratio* und  $FG_{ant}$ , *Mann-Whitney-U-Test*, vgl. Tabelle 8.4a).

Auch im Krafttiming zeigten sich geschlechtsabhängige Unterschiede. Sowohl in „schnellen“ vertikalen Einzelbewegungen (**VES**) als auch in „schnellen“ vertikalen Repetitivbewegungen (**VRma**) fanden sich für Jungen signifikant längere Latenzen der Kraft- und Beschleunigungsmaxima als bei Mädchen (99:70ms bzw. 70:53ms,  $p < 0,05$ , *Mann-Whitney-U-Test*, Tabelle 8.4a).

#### 4.3.6.3 Größe und Gewicht

Es besteht eine gute Korrelation von Größe bzw. Gewicht und Maximalgriffkraft bei frei gehaltenem Objekt bzw. Griffkraft bei Maximaler Hebekraft ( $k = 0,5$  für Größe und Griffkraft bei Maximaler Hebekraft bzw.  $k = 0,49$  für Größe und Maximalgriffkraft;  $k = 0,6$  für Gewicht und Griffkraft bei Maximaler Hebekraft bzw.  $k = 0,5$  für Gewicht und Maximalgriffkraft;  $p < 0,001$ , *bivariate Korrelation nach Pearson*).

#### 4.3.6.4 Handparameter

Es wurde vermutet, dass anatomische Voraussetzungen der Probanden hinsichtlich ihrer mechanischen Auswirkung vor allem bei der Beurteilung der Maximalgriffkraft und der Griffkraft bei Maximaler Hebekraft eine Rolle spielen. Ein indirekter Alterszusammenhang zwischen Handparametern und Kraft konnte ausgeschlossen werden ( $k = 0,2$  für Handbreite, Unterarmlänge, Handlänge, Fingerbreite). Die frei gehaltene Maximalgriffkraft ist insbesondere von Handbreite und Unterarmlänge abhängig (4.2.2.1). Die Abhängigkeit der Griffkraft bei maximaler Hebekraft von Handlänge ( $k = 0,47$ ), Fingerlänge ( $k = 0,46$ ) und Handbreite ( $k = 0,45$ ,  $p < 0,001$ ) konnte in der *bivariaten Korrelation nach Pearson* bestätigt werden.

### 4.3.7 Zusammenfassung

Drei-, vier-, fünf- und sechsjährige Kinder können ihre Griffkraft grundsätzlich an Beschleunigungskräfte anpassen, wie bereits in der phänomenologischen Darstellung der Kraft- bzw. Beschleunigungs-Zeit-Funktionen dargestellt wurde.

#### *Griffkraftdosierung*

Die Griffkraft wird bei Bewegungen in der Vertikalebene geringer dosiert als in der Sagittalebene (4.3.1). Sie wird ebenfalls geringer dosiert bei Repetitivbewegungen hoher gegenüber mittlerer Geschwindigkeiten (4.3.2), bei Bewegungswiederholung gegenüber Einzelbewegungen (4.3.3) und bei Bewegungen in Richtung der Gravitation gegenüber jenen entlang der Gravitation, also sagittalen Bewegungen (4.3.4).

#### *Griffkrafttiming*

Das Griffkrafttiming ist in der Vertikalebene mit kürzeren Latenzen zwischen Griffkraft und Beschleunigungskraft besser als sagittal (4.3.1). Eine Verkürzung der Latenzdauern lässt sich bis zu einem gewissen Grad bei zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit feststellen (4.3.2). Auch bei Bewegungswiederholung sind die Latenzen kürzer als bei Einzelbewegungen vergleichbarer Geschwindigkeit (4.3.4).

#### *Vergleich Jungen - Mädchen*

Der Vergleich von Jungen und Mädchen stellte heraus, dass Mädchen zwar geringere statische Maximalkräfte aufbringen, ihre Kraftdosierung bei Maximaler Hebekraft und bei repetitiven Sagittalbewegungen jedoch ökonomischer ist. Auch das Griffkrafttiming in Vertikalbewegungen erfolgte bei Mädchen besser als bei Jungen.

#### *Altersvergleich*

Eine signifikante Altersentwicklung zwischen drei und sechs Jahren hat sich für den Griffkraft-einsatz bei dynamischen Aufgaben nicht bestätigt. Es gibt einzelne Hinweise darauf, dass ältere Kinder relativ geringere Griffkräfte einsetzen. Phänomenologisch zeigen Sechsjährige eine bessere zeitliche Koordination von Kraft und Bewegung. Dies wird unter schwierigen Bewegungen z.B. in der Sagittalebene und bei hohen Geschwindigkeiten deutlich (Abb. 20).

## 5 Diskussion

### 5.1 Methodik

#### 5.1.1 Probandengruppe – Auswahl und klinische Untersuchung

Die in der vorliegenden Studie untersuchte Probandengruppe umfasste insgesamt 125 dreijährige, vierjährige, fünfjährige und sechsjährige Kinder. Die Gruppengröße der verschiedenen Altersstufen war ähnlich und ließ den Vergleich der Altersgruppen zu. Innerhalb jeder Altersgruppe zeigte sich eine gleichmäßige Altersverteilung über beide Lebenshalbjahre. Das Verhältnis der teilnehmenden Mädchen und Jungen war ausgeglichen (66:59). Die Ermittlung der Handlateralität, die nach einem standardisierten Schema erfolgte (vgl. Untersuchungsbogen im Anhang) (46), ergab insgesamt ein Überwiegen der Rechtshänder (108:17 bzw. 86,4%:13,6%). Die Größenordnung des Verhältnisses von Rechts- zu Linkshändern der untersuchten Kinder entspricht den Ergebnissen einer grundlegenden kultur- und sozialstatusübergreifenden Studie zur Lateralisation der Hirnfunktionen, die in Kulturen ohne hohen Anpassungsdruck in der Erwachsenenbevölkerung 10-13% Linkshänder ermittelt hat (14).

Um eine ausreichende Repräsentativität der untersuchten Stichprobe zu gewährleisten, wurden gesunde Kinder aus verschiedenen Kindergärten Münchens rekrutiert, die dem Querschnitt eines Stadtkollektivs entsprachen. 7% der ursprünglich vorgestellten Kinder wurden aufgrund von Auffälligkeiten in der motorischen Entwicklung nicht in die Auswertung genommen, so dass die ausgewertete Probandenzahl im günstigsten Fall 116 Kinder betrug.

#### *Klinische Untersuchung und Erhebung des Kräftestatus*

Die den Kraftmessungen vorangestellte klinisch-neurologische Untersuchung zur Beurteilung der kindlichen Entwicklung diente der Probandenauswahl (Untersuchungsbogen vgl. Anhang). Elemente standardisierter grob- und feinmotorischer Untersuchungen waren darin enthalten (83). Die Sensibilität wurde durch den semiquantitativen *Semmes-Weinstein-Test* mit Monofilamenten überprüft. Der Kräftestatus der oberen Extremität wurde klinisch erhoben.

#### 5.1.2 Mess-System – Aufbau, Durchführung, Auswertung

Die bisher für die klinische Routine verwendeten Kraftmess-Systeme wie Handdynamometer („*Jamar*“, „*B&L pinch gauge*“) (69) oder pneumatische Instrumente (45) beschränkten sich auf

die Ermittlung der isometrischen Kraftproduktion. Erste dynamische Untersuchungen der Kraft waren bei Kindern ausschließlich für einzelne Vertikalbewegungen durchgeführt worden (27). Dynamische Kräfte Erwachsener waren ebenfalls bei Repetitivbewegungen in der Horizontal- und Vertikalebene untersucht worden (24).

Das in dieser Studie verwendete Messobjekt (Abb. 4) war in der Lage, die Kraftproduktion der Hand am gehaltenen Objekt gleichzeitig mit den bei Armbewegungen entstehenden Beschleunigungen aufzuzeichnen. Es war zuvor an Erwachsenen evaluiert und in Größe und Gewicht für den Einsatz im Kindesalter angepasst worden.

Die Kraftmessung fand im *Handgriff*, einer im kindlichen Alltag häufig verwendeten Griffart, statt (vgl. Abb. 1b). Der Handgriff vereint funktionell den Präzisionsgriff (*precision grip*, Abb. 1b) mit dem Faust- oder Kraftgriff (*power grip*) (71). Bisherige Untersuchungen hatten sich auf Untersuchungen im Präzisionsgriff konzentriert (24, 27, 87, 88).

Der zur Kraftmessung verwendete Sensor war zum Ausschluss von Störeinflüssen derartig im Schwerpunkt des Objektes angebracht, dass auftretende Drehmomente vernachlässigt werden konnten.

Abweichungen von der geforderten Bewegungsebene konnten durch die parallele Aufzeichnung der beiden anderen Bewegungsebenen festgestellt werden. Nur jene Kurvenabschnitte wurden für die Auswertung herangezogen, die einer exakten Bewegungsausführung entsprachen. Ein parallel geführtes Versuchsprotokoll gab Auskunft über weitere Störfaktoren.

Die Beschleunigungsmessung erfolgte durch beschleunigungssensitive Sensoren (Messbereich bis  $60\text{m/s}^2$ ). Da von den Kindern teilweise höhere Beschleunigungen erzielt wurden, wäre eine Erweiterung des Messbereiches für einen weiteren Einsatz bei gesunden Kindern zu wünschen. Allerdings müssten dann Einbußen in Genauigkeit und Auflösung des unteren Messbereiches hingenommen werden.

Probedurchgänge vor den eigentlichen Messungen stellten sicher, dass die Kinder die Aufgabenstellung verstanden hatten.

### *Auswertung*

Gemäß den Kriterien für die Kurvenauswahl (vgl. 3.4.1.2), wurden Anfangs- und Endpunkt der in die Analyse eingehenden Kurven festgelegt. Mit Hilfe der Signalverarbeitung der Auswertesoftware *Move* gelang eine exakte Bestimmung der Werte für Griffkraft und Beschleunigung sowie für die zeitliche Parallelität von Bewegungs- und Griffkraftänderung.

Die analytische Beurteilung der Griffkraft erfolgte anhand der *zeitlichen Parallelität* von Beschleunigung und Griffkrafteinsatz sowie anhand der *Griffkraftdosierung* (vgl. 4.2.3). Deskriptiv

wurden *Gleichmäßigkeit* der Kraftproduktion und *Wiederholgenauigkeit* der Griffkraftdosierung bei repetitiven Bewegungen bewertet (vgl. 4.2.1).

Die Gleichmäßigkeit der Kraftproduktion spricht für eine hohe *feinmotorische Koordinationsleistung* der beteiligten Muskeln. Die Wiederholgenauigkeit in der Kraftproduktion spiegelt den *Automatisationsgrad* wider, mit dem das motorische Programm abgerufen werden kann, das die Griffkraftdosierung einer Bewegung anpasst. Die zeitliche Parallelität von Kraft- und Bewegungsänderung weist auf die Fähigkeit hin, den notwendigen Krafteinsatz bei einer Bewegung zu *antizipieren*. Die Griffkraftdosierung gibt Auskunft über die *Ökonomie* des Krafteinsatzes.

Die im Rahmen dieser Studie bei verschiedenen Bewegungen bzw. dynamischen Aufgaben erhobenen Griffkräfte wurden zunächst anhand einzelner *Fallbeispiele* sowie *deskriptiv* beurteilt und schließlich hinsichtlich *Koordination, Antizipation, Ökonomie und Automatisierung* bewertet.

### 5.1.3 Zusammenfassung

Die den Kraftmessungen vorangestellte klinisch-neurologische Untersuchung einschließlich der Anamneseerhebung erfüllte ihre Funktion in der Auswahl gesunder, altersentsprechend entwickelter Vorschulkinder. Neun Kinder wurden in der Folge von der Untersuchung ausgeschlossen, so dass zuletzt 116 Kinder zu vergleichbaren Anteilen an Mädchen und Jungen und in einem der Bevölkerung entsprechenden Verhältnis von Rechts- und Linkshändern in die Auswertung eingingen.

Hinsichtlich der technischen Durchführung der Kraftmessungen ergaben sich keine Schwierigkeiten. Das kindgerecht modifizierte Messobjekt zeichnete zuverlässig Beschleunigungen und Griffkraft auf, mit dem einzigen Nachteil des zu geringen Messbereiches der Beschleunigungssensoren von  $60\text{m/s}^2$ . Durch die entwickelte Auswertungssoftware war ein rasches Überprüfen des Messerfolges und der Ausschluss von protokollierten Artefakten möglich. Mit Hilfe der Signalverarbeitung der Auswertungssoftware gelang ferner die exakte Bestimmung einzelner Messwerte für Griffkraft und Beschleunigung sowie die Darstellung ihrer Veränderung über die Zeit.

## 5.2 Ergebnisse der Griffkraftmessung bei statischen und dynamischen Aufgaben

### 5.2.1 Fallbeispiele

Die vergleichende Darstellung der Griffkraft- und Beschleunigungskurven eines sechs- bzw. eines dreijährigen Kindes sollten grafisch den Altersunterschied hinsichtlich der Fähigkeit herausarbeiten, die Griffkraft dem Bewegungsverlauf anzupassen und sie zudem gleichmäßig und wiederholgenau zu dosieren.

#### 5.2.1.1 Zeitliche Parallelität der Griffkraft- und Beschleunigungskurven (Timing)

Bei schnellen vertikalen Einzelbewegungen (**VES**) sowie bei repetitiven Vertikalbewegungen (**VR**, **SR**) wurde sowohl bei sechs- als auch sogar bei dreijährigen Kindern ein zeitgleiches Auftreten der Griffkraft- und Beschleunigungsmaxima beobachtet (Abb. 10a und b). Der bereits grundsätzlich für Kinder (27) und Erwachsene (87) beschriebene zeitliche Zusammenfall der Kraftmaxima bei einfachen Hebevorgängen konnte hierdurch bestätigt werden.

Für horizontale Repetitivbewegungen (**SR**) war beschrieben worden, dass die Griffkraft entweder auf ein individuelles Kraftniveau angehoben und ungeachtet der Bewegung beibehalten oder entsprechend der wechselnden Ladungskräfte bei dem Beschleunigen und Bremsen moduliert wird ((25):  $N_{\text{ges}} = 11$ ). Ändert sich die Griffkraft gemäß der Ladungskraft, so koinzidieren Griffkraftmaximum und Beschleunigungsmaximum zeitlich, und zwar bei Bewegungsumkehr an Punkten maximaler Beschleunigung bzw. Trägheit. Bei einem Anstieg der Trägheitskraft des Objektes erhöht sich die Reibungskraft zwischen Objektoberfläche und Fingeroberfläche und damit das Risiko, das in der Hand gehaltene Objekt zu verlieren (28, 38). Daher muss bei jedem Anstieg der Trägheitskraft auch die Griffkraft entsprechend der Reibungskraft zwischen Fingern und Objektoberfläche erhöht werden, um das Objekt sicher „im Griff“ zu behalten. Das Auftreten zweier Kraftmaxima bei horizontalen bzw. sagittalen Bewegungen ist Ausdruck eines adäquaten Griffkraftzuwachses zu Zeitpunkten erhöhter Trägheitskräfte bei Bewegungsumkehr (24). Zweigipflige Kraftkurven fanden sich auch bei Vorschulkindern der vorliegenden Studie (z.B. Abb. 21), so dass von einem antizipierten Griffkrafteinsatz ausgegangen werden kann.

### 5.2.1.2 Gleichmäßigkeit und Wiederholgenauigkeit der Griffkraftdosierung

Hinsichtlich der Griffkraftdosierung fiel in den einzelnen „schnellen“ Vertikalbewegungen (**VES**) bei dem dreijährigen Kind auf, dass bei jedem Bewegungsdurchgang unterschiedliche Griffkraftdosen appliziert wurden (Abb. 13) und dass die Maxima bei an sich gleicher Aufgabenstellung zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht wurden (Abb. 12). Als sensible Größe für die Gleichmäßigkeit der Kraftproduktion dient die *Krafrate* als Ableitung der Griffkraft über die Zeit. Die Zeitfunktion der Krafrate ist idealerweise „eingipflig“, zu dem Zeitpunkt der maximalen Griffkraft beträgt sie  $0\text{m/s}^2$  (27). Weist die Krafratenkurve pro Griffkraftmaximum ebenfalls nur eine einzige Spitze auf und beträgt sonst  $0\text{m/s}^2$ , kann davon ausgegangen werden, dass der Zielbetrag der Griffkraft vor Beginn der Kraftproduktion durch die Handmuskeln im motorischen Programm festgelegt war und nicht mehr durch visuelle oder sensible Informationen moduliert wurde (44). In diesem Fall wird die Griffkraftdosis antizipiert und der Kraftanstieg kann gleichmäßig erfolgen.

Der Kraftanstieg der „schnellen“ vertikalen Einzelbewegung (**VES**) des sechsjährigen Kindes erfolgte mit einer „eingipfligen“ Krafratenkurve bis zu einem scheinbar vordefinierten Kraftmaximum (Abb. 14). Das Kraftmaximum wurde antizipiert. Die Krafratenkurven des Dreijährigen sind hingegen vielgipflig (Abb. 14), d.h. die Griffkraft musste während der Bewegung neu angepasst werden. Bereits bei einfachen Hebevorgängen war das sequenzielle Ansteigen der Griffkraft bei Kindern unter zwei Jahren beobachtet worden (27). Es besteht bis zum 8. Lebensjahr fort, erst ab dem 9. bis 11. Lebensjahr kann von einer reifen Koordination der „Griffkraft- und Beschleunigungsgeneratoren“ des Zentralnervensystems ausgegangen werden, die sich in einem gleichmäßigen Griffkraftanstieg ausdrückt. Dieser gleichmäßige Griffkraftanstieg deutete sich in der vorliegenden Studie bei dem sechsjährigen Kind an (Abb. 10a, 12, 14). Die Amplitudenvariabilität des Krafteinsatzes (Abb. 13), die unruhige Krafratenkurve (Abb. 14) und die fehlende Wiederholgenauigkeit im zeitlichen Ablauf der Kraftproduktion (Abb. 12) werden als gegenüber dem sechsjährigen Kind nicht sicher antizipierte, weniger ausgereifte feinmotorische Koordinationsleistung gewertet.

Auch die *Repetitivbewegungen* (**VR**, **SR**) wurden unter den Aspekten Gleichmäßigkeit und Wiederholgenauigkeit der Kraftproduktion beurteilt. Betrachtet wurden Repetitivbewegungen mittlerer Geschwindigkeit, Sagittal- und Vertikalebene wurden verglichen.

Die beste Wiederholgenauigkeit der Kraftdosierung fand sich in der vertikalen Ebenen (**VR**) bei dem sechsjährigen Kind (Abb. 15), die Griffkraftkurven projizieren sich hinsichtlich des zeitli-

chen Verlaufes (Timing) und des maximalen Betrages annähernd deckungsgleich übereinander (Abb. 17). Die Kraftkurven der repetitiven Sagittalbewegungen zeigen sich hingegen auch für ältere Kinder sowohl hinsichtlich des Timing als auch der Dosierung irregulär (Abb. 18). Das Kraftniveau wurde bei erhaltener Kraftmodulation angehoben, bei Dreijährigen hingegen ist die Griffkraftmodulation nur noch minimal vorhanden (Abb. 18).

Wiederum tragen die Krafratendiagramme zur besseren Beurteilbarkeit der Kraftproduktion bei. Wird die Krafrate über die Kraft aufgetragen (vgl. Abb. 19, 20), oder wie in vergleichbaren Studien die Kraftbeschleunigung über die Krafrate (47), lassen sich Kraftzuwachs und Kraftreduktion anhand kreisförmiger Diagramme beurteilen. Anhand der Deckungsgleichheit und der Symmetrie der entstehenden Kreise kann die Wiederholgenauigkeit und Gleichmäßigkeit des Kraftanstiegs und -abfalles beurteilt werden.

Für vertikale Repetitivbewegungen (**VR**) lassen die Krafratendiagramme bei fast jeder Bewegungsumkehr einen anderen Ausgangswert der Kraftproduktion für das dreijährige Kind erkennen (Abb. 19). Die Kreise sind kaum deckungsgleich, unsymmetrisch, und die kleinen Kreisdurchmesser weisen auf eine nur geringe Kraftmodulation hin (vgl. 4.2.1.2). Im Gegensatz dazu stellen sich bei dem sechsjährigen Kind Kraftwechsel mit „identischen dynamischen Charakteristika“ dar (Abb. 19), wie es für eine reife Kraftkontrolle zu erwarten ist (44). Obwohl die Zeitfunktionen der Griffkraft auch für jüngere Kinder einen gewissen Automatisationsgrad suggerieren, lassen sich anhand der Krafratendiagramme der Einzelbewegungen ähnliche Defizite in Kraftantizipation und –koordination zeigen. Noch deutlicher und nun auch für das sechsjährige Kind stellen sich die Defizite in der Sagittalebene dar.

## 5.2.2 Statische Griffkräfte

Ziel der Studie war neben der qualitativen Deskription und grafischen Darstellung der zeitlichen Griffkraftveränderung bei verschiedenen Bewegungen auch die Beurteilung des quantitativen Griffkrafteinsatzes. Es galt zu zeigen, ob Vorschulkinder ihre Griffkraft ökonomisch, d.h. eng an die Erfordernisse der ausgeführten Bewegung anpassen können, ob sie also die Kraft so niedrig wie möglich aber so hoch wie nötig dosieren können. Dazu sollte die eingesetzte Griffkraft in Relation zur individuellen Maximalgriffkraft gesetzt werden ( $FG_{ant}$ ). Ferner sollte ermittelt werden, welche Kraft gleichzeitig maximal auf das Objekt wirken kann, das in der Hand gehalten wird. Anders ausgedrückt: welche Trägheitskräfte dürfen maximal am Objekt entstehen, um es immer noch sicher in der Hand halten zu können? Die Hebekraft sei dabei hinsichtlich ihrer Kraftrichtung mit Vertikalbeschleunigungen vergleichbar.

Die statischen Aufgaben der Untersuchung sollten einerseits helfen, die Bezugsgröße „individuelle Maximalgriffkraft“ zu ermitteln. Andererseits sollte die Größe „Griffkraft bei Maximaler Hebekraft“ (vgl. Skizze S. 36) den Zusammenhang zwischen gleichzeitig am Objekt auftretenden bzw. durch den Probanden produzierten Kräften näher beleuchten.

Statische Griffkräfte zeigten sich in der vorliegenden Studie normalverteilt. Je älter die Kinder, desto höher die Griffkraft (Tabelle 4, Anhang Tabelle 8.3). Die Maximalgriffkraft ist stets höher als die Griffkraft bei Maximaler Hebekraft.

### 5.2.2.1 Individuelle Maximalgriffkraft: Geschlechtsunterschied

Die isometrische Maximalgriffkraft im Handgriff betrug im Mittel 31N und stieg mit dem Alter signifikant von im Mittel 27N bei Dreijährigen auf 38N bei Sechsjährigen an. In einer Normierungsstudie mit 5- bis 12-jährigen Kindern wurde mittels eines *Jamar Dynamometers* ebenfalls eine mit dem chronologischen Alter zunehmende Muskelkraft beobachtet (1). Bei männlichen Probanden im Alter von 20 bis 24 Jahren wurde im „*palmar pinch*“, d.h. der Daumen ist in Opposition zu den Langfingern, eine isometrische Maximalkraft von im Mittel 99,2N gemessen (69). Die Maximalkräfte Erwachsener (99N) sind bis zu dreimal so hoch wie jene bei Vorschulkindern (30N).

Bei Vorschulkindern konnte ein für die Maximalgriffkraft signifikanter Kraftunterschied zwischen Mädchen und Jungen gezeigt werden (vgl. 4.3.6). Dieses Ergebnis deckt sich mit Untersuchungen an Erwachsenen, auch hier wird der Geschlechtsunterschied als signifikant beschrieben (69, 1). Dennoch ließ sich in der vorliegenden Studie ein entscheidender Unterschied im Krafteinsatz zwischen Jungen und Mädchen herausarbeiten: während Jungen bei frei gehaltenem Ob-

jekt zwar eine höhere Griffkraft produzierten, war die Hebekraft, die auf der Personenwaage gemessen wurde (vgl. Skizze S. 36), bei Jungen und Mädchen im Mittel gleich groß. Der funktionelle, ökonomische Einsatz der Griffkraft, z.B. bei der Umsetzung der Griffkraft in eine Hebekraft, ist ungeachtet der maximal möglichen Griffkraft, für Jungen und Mädchen vergleichbar. Ein zweites Beispiel für den ökonomischen Griffkrafteinsatz der Mädchen birgt die „maximal schnelle“ Sagittalbewegung (**SR<sub>ma</sub>**). Die Mädchen steigerten ihre Griffkraft entsprechend der Beschleunigung, während sich der Anteil der Griffkraft an der Maximalgriffkraft nicht wesentlich änderte (Tabelle 7). Jungen hingegen wendeten einen insgesamt höheren Anteil ihrer Maximalgriffkraft für die Durchführung der kraftintensivsten Aufgabe auf (Tabelle 5). Die Befunde ließen sich dahingehend interpretieren, dass Mädchen im Rahmen der gestellten Aufgaben durch den Einsatz bestimmter Muskelsynergien ökonomisch und damit trotz geringerer Maximalgriffkraft ebenso ausdauernd arbeiten können wie Jungen.

#### 5.2.2.2 Griffkraft bei Maximaler Hebekraft: die Griffkraftreserve

Die Messergebnisse ergaben, dass die individuelle Maximalgriffkraft stets um 15 bis 25% höher ist als die Griffkraft bei Maximaler Hebekraft (vgl. 4.2.2.2). Die Differenz zwischen Maximalkraft und Kraft bei Maximaler Hebekraft lässt vermuten, dass weitere 15 bis 25% der individuellen Maximalgriffkraft als „Reserve“ bei auftretenden Perturbationen mit Kraftwirkung auf das gehaltene Objekt zur Verfügung stehen, um bei Bedarf für die Stabilisierung des Griffes genutzt zu werden. In der Literatur wird allerdings der submaximale Griffkrafteinsatz bei gleichzeitiger Kontraktion mehrerer z.T. antagonistischer Muskelgruppen des Armes auch auf sensible Afferenzen aus Hautorganellen der Fingerauflageflächen zurückgeführt (88). Ein weiterer Kraftanstieg wird antagonisiert und verhindert somit, dass sensible Reize weniger differenziert wahrgenommen werden (88) und die Griffstabilität nicht mehr gewährleistet ist.

Die Studie konnte die altersunabhängigen anatomischen Gegebenheiten der Hand als weitere Einflussfaktoren auf die Höhe der Griffkraft bei Maximaler Hebekraft eruieren. So korrelierte die Unterarmlänge der hier untersuchten Kinder deutlich mit der Maximalgriffkraft und die Fingerlänge mit der Griffkraft bei Maximaler Hebekraft (vgl. 4.3.6.4). Neben der funktionellen Querschnittsfläche der Muskeln für die isometrische Kraftproduktion (*physiological cross-sectional area*, abhängig von der Handbreite, (31), vgl. 1.2.1), trägt die mit der Hand-, Unterarm- und Fingerlänge zunehmende Hebelwirkung zur Kraftentwicklung auf das gehaltene Objekt bei. Insgesamt lässt sich feststellen, dass nach den vorliegenden Ergebnissen die Griffkraft jeder Kraftentwicklung proximaler Muskeln des Armes sicher standhalten kann.

### 5.2.3 Dynamische Griffkräfte

Bei der Beurteilung statischer Griffkräfte lag das Augenmerk auf der Koordination von kraftproduzierenden Muskeln der Hand (*Maximalgriffkraft*) und des Armes (*Hebekraft*). Die Beurteilung dynamischer Griffkräfte hingegen konzentriert sich auf die Koordination von Griffkraft und *Armbewegung*.

#### 5.2.3.1 Griffstabilität als Voraussetzung für ein sicheres Bewegen von Gegenständen

Ein sicherer, stabiler Griff ist die notwendige Voraussetzung für Armbewegungen mit in der Hand gehaltenen Gegenständen (vgl. 1.2.1). Ein stabiler Griff entsteht durch eine exakte Positionierung der Finger um den Gegenstand (71) sowie durch eine der Bewegung angepasste Griffkraftdosis (87). Ob die Fingerposition einen sicheren Griff gewährleistet, kann vom Zentralnervensystem vornehmlich durch die Rückmeldung sensibler Afferenzen aus den Hautpartien der Finger beurteilt werden, die dem Objekt aufliegen. Nach Integration der Informationen über das gegriffene Objekt sorgen motorische Efferenzen für eine adäquate Griffkraftdosierung und ein exaktes Griffkrafttiming (87).

#### 5.2.3.2 Griffstabilität durch adäquate Kraftdosierung und adäquates Krafttiming

Das Griffkrafttiming beurteilt die zeitliche Abgestimmtheit von Kraftmaximum und Beschleunigungsmaximum. Treten beide Maxima zum gleichen Zeitpunkt auf, ist ein stabiler Griff gewährleistet. Ist zudem die Griffkraft ausreichend hoch dosiert, kann das Objekt auch bei Auftreten hoher Beschleunigungskräfte sicher gehalten bzw. kontrolliert werden.

Um die für das Kindesalter ausschlaggebenden Einflussfaktoren für die Griffkraftkontrolle zu analysieren, wurden Quotienten aus den Variablen *eingesetzte Griffkraft* und *individuelle Maximalkraft* ( $FG_{ant}$ ) bzw. *eingesetzte Griffkraft* und *Maximalbeschleunigung* (*ratio*) gebildet. *Ratio* und  $FG_{ant}$  dienen der Beurteilung der Griffkraftdosis und lassen durch die Relation zu Maximalgriffkraft und Maximalbeschleunigung eine Aussage über die *Griffkraftökonomie* zu. Bisher wurde die Griffkraftökonomie ausschließlich in Relation zur Beschleunigung (*load force*, 55) beurteilt, oder anders ausgedrückt: ist die Griffkraftdosis der Bewegung angemessen? Unberücksichtigt bleibt dabei, ob die Kraftdosis gemessen am *eigenen Kraftvermögen* des Probanden unökonomisch hoch oder niedrig ist.

### 5.2.3.3 Geschwindigkeitseinfluss

Erwachsenenstudien zur Untersuchung der Griffkraftstabilität bei zyklischen Armbewegungen mit im Präzisionsgriff gehaltenem Objekt (26) ergaben, dass bei hohen Bewegungsfrequenzen die Griffkraft initial anstieg. Im Laufe der Bewegung wurde die eingesetzte Griffkraft im Verhältnis zur Ladungskraft jedoch vermindert. Bei steigender Bewegungsgeschwindigkeit fällt also die *ratio* ab. Dass die Zunahme der Bewegungsfrequenz auch bei Vorschulkindern in einer abfallenden *ratio* resultiert, bestätigt die vorliegende Studie (Abb. 27b, d, Abb. 30, Tabelle 8).

Erwachsenenstudien stellten einen weiteren Aspekt der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Griffkrafteinsatzes heraus: es wurde gezeigt, dass die initiale Griffkraft beim Bewegen von Objekten mit glatter Oberfläche bei vergleichbaren Bewegungsfrequenzen höher ist, als beim Bewegen von Objekten mit rauher Oberfläche (26, 28, 53, 56). Glatte Oberflächen gehen mit einer geringen Haftreibung zwischen Objekt und Fingeroberfläche einher. Taktile Informationen aus den Hautorganellen der Finger leiten die Information über die geringe Haftreibung an das ZNS. Diese sensible Information wird mit dem Ziel das Objekt sicher zu halten in eine motorische Efferenz übersetzt, die den Griffkrafteinsatz der Hand steigert. Die Griffkraft ist demnach bei gleichen Geschwindigkeiten immer dann höher dosiert, wenn der Griff als unsicher empfunden wird, sei es aufgrund glatter oder unbekannter Objektoberflächen (28, 30, 37). In der vorliegenden Studie mit Vorschulkindern fiel auf, dass bei hohen Bewegungsfrequenzen ein höherer Anteil der individuellen Maximalgriffkraft für Sagittalbewegungen, nicht aber für Vertikalbewegungen aufgewendet wurde (Abb. 27a, c). Daraus lässt sich die Annahme ableiten, dass die Reibungskraft zwischen Objekt und Fingern bei Vertikalbewegungen besser abgeschätzt und die Griffkraft ökonomischer dosiert werden kann, als bei Sagittalbewegungen. Betrachtet man nun das Verhalten der Griffkraftdosierung ( $FG_{ant}$ ) unter Geschwindigkeitssteigerung, zeichnet sich ein weiterer Griffkraftzuwachs in der Sagittalbewegung ab, während die Griffkraft bei Vertikalbewegungen bei Geschwindigkeitssteigerung abfällt (Abb. 27a, c). Die Griffkraftdosierung wird im Vorschulalter in der Sagittalebene unökonomisch hoch dosiert. Die qualitative Analyse des Griffkrafteinsatzes zeigte ferner eine fast aufgehobene Griffkraftmodulation in der Sagittalebene vor allem für das dreijährige Kind (Abb. 16, 18, 20). Studien an Erwachsenen hingegen wiesen mehrfach eine unabhängig von Beschleunigung und initialer Griffkraft kontinuierliche Griffkraftmodulation nach (23, 26). Diese Beobachtung unterstützt die Vermutung, dass der Griffkrafteinsatz im Vorschulalter sagittal weniger gut erfolgt, als vertikal. In der Vertikalebene wurde, wie für Erwachsene auch, eine trotz verschiedener Geschwindigkeiten annähernd konstante Griffkraftdosierung beobachtet (Tabelle 7, Abb. 27b).

Hinsichtlich des Griffkrafttimings konnte eine mit Geschwindigkeitssteigerung zunehmende Latenz in der Vertikalebene gezeigt werden (Tabelle 8). Die maximale Beschleunigung ist vor der maximalen Griffkraft erreicht. Zur Begründung dieses Phänomens kann einerseits der limitierte Messbereich des vertikalen Beschleunigungssensors diskutiert werden. Das Mess-System registrierte ein Beschleunigungsmaximum, das zeitlich vor dem eigentlichen Beschleunigungsmaximum lag. Die langen Latenzen in der Vertikalebene müssten als Artefakt gedeutet werden, wenn es sich nicht nur um hundertstel Millisekunden bei einem kleinen Teil der Probanden handelte. Es lohnt sich daher zu diskutieren, ob im ZNS die motorische Efferenz für „Kraft“ erst nach jener für „Bewegung“ an die Zielmuskulatur gesendet wird. Entsprechend wären die Latenzen um so höher zu erwarten, je weniger automatisiert der einer Bewegung entsprechende Kraft-einsatz abgerufen werden kann. Ungeübte Bewegungen oder das Transportieren unbekannter Objekte würden lange Latenzen erwarten lassen. Den bei Vorschulkindern beobachteten längeren Latenzen bei Geschwindigkeitssteigerung könnte also entnommen werden, dass Bewegungen hoher Geschwindigkeit im Vorschulalter noch mit einem zeitlich weniger gut angepassten Griffkraft-einsatz einhergehen.

#### *5.2.3.4 Griffkraft-einsatz in verschiedenen Bewegungsebenen*

Die oben abgeleitete Hypothese, aufgrund der weniger ökonomischen Griffkraftdosierung handele es sich bei Sagittalbewegungen um die ungeübtere Bewegungsebene, wurde durch die grundsätzlich längeren Latenzen bei Sagittalbewegungen bestätigt (vgl. Abb. 28a, b).

Erstaunlicherweise zeigte sich der zeitliche Abstand der Kraftspitzen bei Bewegungen in „mittleren“ Geschwindigkeiten (**SR<sub>mi</sub>**) mit im Median 80ms wesentlich länger als in „maximalen“ Geschwindigkeiten (**SR<sub>ma</sub>**) mit 50ms (vgl. Tabelle 8, Abb. 28a, b). Das beobachtete Phänomen lässt sich nach kinematischen Gesichtspunkten darauf zurückführen, dass es in der Sagittalebene bei „mittleren“ Geschwindigkeiten (**SR<sub>mi</sub>**) nur an dem Beginn der Rückwärtsbewegung notwendig ist, die Griffkraft für einen stabilen Griff zu erhöhen, um das Objekt vor auftretenden Trägheitskräften zu bewahren. Bei dem Bremsen bzw. Vorwärtsbeschleunigen am körpernahen Umkehrpunkt der Bewegung ist keine Griffkraftsteigerung erforderlich, da die Trägheitskräfte in Richtung Handinnenfläche gerichtet sind und durch die Geometrie der Hand aufgefangen werden. Das „Ausfallen“ einer Griffkraftspitze pro Bewegungsdurchgang resultiert in fast doppelt so langen Abständen zwischen Ladungskraftmaximum und Griffkraftmaximum. Bei hohen Geschwindigkeiten in der Sagittalen (**SR<sub>ma</sub>**) muss jedoch bei jedem Richtungswechsel ein Griff-

kraftanstieg erfolgen, da die anatomischen Verhältnisse der Hand nicht alleine für die Griffstabilisierung bei zunehmenden Trägheitskräften ausreichen. Wie Abbildung 29 zeigt, nahm die Latenzdauer repetitiver Sagittalbewegungen mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit bzw. -frequenz ab, bis sie zwischen 2,5Hz und 3Hz (wie bei Vertikalbewegungen) 60ms betrug. Bei diesen Frequenzen erfordern die Bewegungsgeschwindigkeiten auch in der Sagittalen einen Kraftzuwachs bei jedem Richtungswechsel der Bewegung. Die unterstützende Wirkung der Handgeometrie bei Sagittalbewegungen war auch bei Erwachsenen im Präzisionsgriff beobachtet worden, bei denen plötzliche Ladungskraftapplikationen in Richtung der Handinnenfläche zu längeren Latenzen führten, als jene, die vom Körper weg gerichtet waren (74).

Zur Beurteilung der Ebenenabhängigkeit der *Griffkraftökonomie* ist nochmals auf den entscheidenden Einfluss der Gravitationskraft hinzuweisen, die im Wesentlichen die Bewegungen der vertikalen Ebene beeinflusst. Für die Vertikalebene zeigt die niedrige *ratio* (Griffkraft/Beschleunigung), dass die Griffkraft nur so hoch dosiert wird, wie es den auftretenden Trägheitskräften entspricht (4.3.2). Obwohl in der Sagittalebene geringere absolute Beschleunigungen erreicht wurden (Tabelle 6) und somit niedrigere Ladungskräfte auftraten, war die *ratio* signifikant höher (0,4) als vertikal (0,22, Tabelle 7).

Die Gravitationskraft scheint bereits bei Vorschulkindern zur Minderung des Krafteinsatzes genutzt werden zu können. Bereits zum Zeitpunkt der Geburt beginnt das motorische System, sich mit der Gravitationskraft auseinander zu setzen, während willkürliche Bewegungen parallel zur Erdoberfläche ein gewisses Maß an motorischer Kompetenz zur Durchführung einer Bewegung an sich voraussetzen. Demnach ist anzunehmen, dass die Gravitationskraft im Vorschulalter bereits in das Bewegungsprogramm integriert ist und in die Kraftplanung einfließt.

Für Erwachsene wird bei medial/lateral-Bewegungen ein Griffkraftanstieg bei dem Beschleunigen und Bremsen eines Objektes kurz vor dem Richtungswechsel beschrieben (25). In Analogie dazu lässt sich bei den in der vorliegenden Studie durchgeführten sagittalen Bewegungen (**SR**) ein Griffkraftanstieg bei Richtungswechseln beobachten, allerdings nur bei hohen Frequenzen (Abb. 21). Bei „mittlerer“ Geschwindigkeit (**SR<sub>mi</sub>**) scheint die Anatomie von Hand und Arm am körpernahen Umkehrpunkt für das Bremsen und erneute Beschleunigen genutzt werden zu können, um auf eine Griffkrafterhöhung zu verzichten. So zeigten sich sagittal sogar niedrigere absolute Griffkräfte als vertikal (Tabelle 5).

### 5.2.3.5 Einzel- versus Repetitivbewegungen

Während sich die bisherigen Ausführungen vorwiegend auf Änderungen der äußeren kinematischen Untersuchungsbedingungen bezogen (Einfluss der beschleunigungsabhängigen Trägheit des Objektes sowie ebenenabhängige Nutzung der Gravitationskraft), soll der Vergleich einzelner und repetitiver Bewegungen Aufschluss über den Einfluss der Bewegungsplanung auf Kraftdosis und -timing bringen.

In der vorliegenden Studie wurde die bei Erwachsenen mit fortgeschrittener feinmotorischer Entwicklung festgehaltene Beobachtung (26) bestätigt, dass der Griffkrafteinsatz (*ratio*) bei Aufgaben mit Bewegungswiederholung im Vergleich zu einzelnen Bewegungen geringer ist (Abb. 27b, d). Dies gilt allerdings nur, wenn die wiederholten, d.h. repetitiven Bewegungen mit hoher Geschwindigkeit ausgeführt werden (**V/SR<sub>ma</sub>**). Es wird angenommen, dass ein übergeordneter zentralnervöser Regelkreis für eine Griffkraftreduktion sorgt, sobald ein Mindestmaß an Griffstabilität hergestellt ist (28, 30, 36, 37, 38). Insbesondere für lange andauernde Bewegungen ist ein ökonomischer Griffkrafteinsatz erforderlich.

### 5.2.3.6 Einfluss der Bewegungsrichtung

Die Kinder wurden angehalten, das Greifobjekt entlang einer definierten Strecke aufwärts/abwärts (**VEL**) bzw. vorwärts/rückwärts (**SEL**) zu bewegen. Der Einfluss der Bewegungsrichtung wurde untersucht.

Bei Erwachsenen war beobachtet worden, dass es eine zeitliche Differenz zwischen Beschleunigungsmaximum und Griffkraftmaximum bei langsamen Einzelbewegungen gibt (4ms, (25)). Die zeitliche Differenz war bei horizontalen Bewegungen etwas größer, als bei Vertikalbewegungen. Für Vorschulkinder konnte die vorliegende Studie ebenfalls bestätigen, dass es Latenzen zwischen Beschleunigungs- und Griffkraftmaximum gibt, die bei repetitiven Vertikalbewegungen (**VR**) kürzer sind, als bei repetitiven Sagittalbewegungen (**SR**) (4.3.1, Abb. 29). Hinsichtlich der Einzelbewegungen (**VEL**) ergab sich, dass abwärts gerichtete Bewegungen geringfügig kürzere Latenzen aufwiesen als aufwärts gerichtete Bewegungen. Dieses Phänomen mag wiederum mit der frühen Auseinandersetzung von motorischem System und Gravitation zusammenhängen: Das Transportieren eines Objektes in Richtung der Gravitation ist vergleichbar mit der Intention, das Objekt vor dem Herunterfallen zu bewahren. Die notwendige Griffkraft kann frühzeitig eingesetzt werden. Bei Aufwärtsbewegungen hingegen verstreicht eine gewisse Zeitdauer, bis die

Haftreibung an der Objekt-Finger-Berührungsfläche so groß ist, dass ein Griffkraftanstieg erforderlich ist.

In der Sagittalebene fanden sich in den Vorwärts- gegenüber den Rückwärtsbewegungen kürzere Latenzen (**SEL**) (Tabelle 8). Bei dem Vorwärtsbeschleunigen des Objektes nimmt auch die Handinnenfläche die auf das Objekt wirkenden Trägheitskräfte wahr (kurze Latenz zwischen Beschleunigungsmaximum und Griffkraftmaximum), während bei dem Rückwärtsbeschleunigen eine gewisse Latenz verstreicht, bis die Haftreibung an der Objekt-Finger-Berührungsfläche so groß ist, dass ein Griffkraftanstieg erforderlich ist.

#### *5.2.3.7 Einfluss der Eigenschaften der Probanden*

Kinder aller Altersgruppen zeigten sich im Rahmen der vorliegenden Studie bei sämtlichen Aufgabenstellungen in der Lage, ihre Griffkraft entsprechend auftretender Trägheitskräfte zu dosieren. Ein signifikanter Altersunterschied konnte weder für die Griffkraftdosierung noch für das Griffkrafttiming gefunden werden (Tabelle 8.3).

Untersuchungen anderer Arbeitsgruppen mit Kindern ergaben, dass bei gezielten Armbewegungen eine Anpassung der Griffkraft an durch Trägheit und Gravitation entstehende Reibungskräfte am gegriffenen Objekt ab dem 2. Lebensjahr möglich ist (27). Dennoch weisen Kinder unter fünf Jahren einen relativ hohen Griffkrafteinsatz und ein geringes Adaptationsvermögen an plötzlich auftretende Trägheitskräfte auf, wie auch die vorliegende Studie bestätigen konnte (Tabellen 7, 8).

Eine Studie zur kindlichen Greifentwicklung zeigte, dass vier- bis neunjährige Kinder die Geschwindigkeit des Greifens nicht signifikant beschleunigen können (63). Die Steigerung der Griffkraft ist hinsichtlich des Muskeleinsatzes prinzipiell mit einer Greifbewegung vergleichbar. Griffkraftsteigerungen waren in der vorliegenden Studie bei Objektbeschleunigung notwendig. Zwischen Beschleunigungs- und Griffkraftmaximum wurde eine zeitliche Latenz beobachtet, die nicht mit dem Alter korreliert war. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass sich die zeitliche Abstimmung der Bewegungs- und Kraftmuskeln im Vorschulalter nicht signifikant optimiert. Hinsichtlich der Qualität der Bewegungsausführung eines sechs- bzw. dreijährigen Kindes hingegen deutet sich vor allem bei Betrachtung der Sagittalebene eine Verbesserung der Koordination kraft- und bewegungsbezogener Muskeln an (vgl. Fallbeispiele), die ebenfalls von unserer Arbeitsgruppe durch die kinematische Analyse kindlichen Malens (13) sowie in der Literatur (63) beschrieben wird.

### 5.2.4 Zusammenfassung

Die beispielhafte phänomenologische Darstellung der Griffkraft- und Beschleunigungs-Zeit-Funktionen sowohl drei- als auch sechsjähriger Kinder konnte den in der Literatur für Kinder und Erwachsene beschriebenen zeitlichen Zusammenfall der Maxima bestätigen. Die Annahme eines antizipierten Griffkrafteinsatzes wurde durch die Feststellung „eingipfliger“ Griffkraftkurven bei sechsjährigen Kindern gestützt, die in der Literatur als Zeichen einer reifen Koordination von Griffkraft und Bewegung gewertet werden. Einen weniger gleichmäßigen Kraftanstieg und geringere Wiederholgenauigkeit der Kraftproduktion konnte für dreijährige Kinder vor allem bei koordinativ schwierigeren Repetitivbewegungen verzeichnet werden.

Statische Kraftmessungen dienen der Beurteilung, inwieweit der Griffkrafteinsatz von individuellen Voraussetzungen wie Maximalgriffkraft oder Geschlecht abhängig ist. Die Ergebnisse bestätigen Angaben in der Literatur, nach denen die Griffkraft im Kindes- und Jugendalter zunimmt. Auch bestätigte sich die Hypothese, Jungen könnten höhere Maximalgriffkräfte aufbringen als Mädchen. Jedoch zeigte sich, dass Mädchen im Rahmen komplexer motorischer Abläufe einen geringeren Anteil ihrer individuellen Maximalgriffkraft im Vergleich zu den Jungen aufwenden und somit ökonomischer arbeiten.

Die Messung der Griffkraft bei gleichzeitiger Maximaler Hebekraft konnte zeigen, dass die Griffkraft jeder Kraftentwicklung proximaler Muskeln des Armes standhalten kann, die „Griffkraftreserve“ beträgt 15-25% der individuellen Maximalgriffkraft.

Für dynamische Griffkräfte konnte wie zuvor für Erwachsene auch für Vorschulkinder bestätigt werden, dass die Griffkraft pro Beschleunigungskraft mit steigender Geschwindigkeit abnimmt (Abb. 27 b, d, Abb. 30, Tabelle 8). Im Ebenenvergleich ließ sich sagittal ein unökonomisch hoher Griffkrafteinsatz nachweisen, der in der Literatur in Zusammenhang mit einem unsicheren Griff gebracht wird. Trägheitskräfte an einem bewegten Objekt können demzufolge sagittal im Vorschulalter weniger sicher abgeschätzt werden.

Hinsichtlich des Richtungsvergleiches zeigen sich kürzere Latenzen in der Aufwärts- gegenüber der Abwärtsbewegung. Diskutiert wird das frühere Auftreten von Reibungskräften an der Objekt-Hautoberfläche bei (Aufwärts)Bewegungen, die der Gravitation entgegen gesetzt sind.

Da signifikante Altersunterschiede bei dynamischen Griffkräften im quantitativen Vergleich nicht nachgewiesen werden konnten, ergibt sich die Hypothese, dass die Koordination von Griffkraft und Bewegung im Vorschulalter bereits zu einem hohen Grad automatisiert ist.

### ***5.3 Beurteilung der funktionellen Verbundenheit von Griffkräften und Bewegungen im Vorschulalter hinsichtlich Koordination, Antizipation, Ökonomie und Automatisierung***

#### **5.3.1 Koordination**

Die Koordination von Bewegung und Kraft gelingt durch die Abstimmung der jeweils beteiligten Muskeln (Muskelsynergien) (50, 25). Welche Muskeln zusammenwirken, ist variabel (41), d.h. Muskelsynergien liegen nicht in einer festen Muskelkombination vor, sondern werden durch parametrisierende Befehle einer höheren motorischen Koordinationsebene zusammengesetzt (8). Es wird vermutet, dass die *interne Repräsentation* von Objekteigenschaften ein bindendes Element voneinander unabhängiger motorischer Programme des ZNS ist (52). Die Befehle für motorische Programme zur Kraftproduktion und Bewegungsausführung werden parallel entsendet, wie sich anhand der Ähnlichkeit isometrischer Krafraten- bzw. Geschwindigkeitsprofile willkürlicher Armbewegungen darstellen ließ (8). Auch die gleichzeitige Aktivierung der stabilisierenden Muskulatur der Schulter und der bewegungsausführenden Armmuskulatur für das Erreichen eines „Bewegungszieles“ spricht für die gleichzeitige Entsendung motorischer Befehle an verschiedene Muskelgruppen (80). Dass Muskelsynergien zudem nicht willkürlich beeinflussbar sind zeigte die Beobachtung, dass die Griffkraftanpassung im Erwachsenenalter unabhängig von der Art des Griffes bzw. der Bewegungsart konstant ist (23, 25, 57).

Als konstant erwies sich auch in der vorliegenden Studie die parallele Änderung von Kraft und Beschleunigung, wenn auch mit qualitativen Unterschieden in den verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeiten, -richtungen und -ebenen. Quantitativ ergab sich ein konstantes Verhältnis der absoluten Werte für Bewegung und Kraft (*ratio*), und das zeitlich nur geringfügig versetzte Auftreten der Kraft- und Beschleunigungsmaxima unterstreicht ebenfalls die im Vorschulalter vorhandene Existenz von Muskelsynergien für die Kraft- und Bewegungskoordination. Wie oben ausgeführt wird vermutet, dass es keine festgelegten Muskelsynergien zur Ausführung ein und derselben Bewegung gibt, sondern dass sich vor allem bei ungeübten Bewegungen ein Zusammenspiel immer wieder verschiedener Muskeln vollzieht, bis ein Bewegungsverlauf synaptisch festgelegt ist. Besonders in der Sagittalebene lässt sich anhand der Variabilität von Griffkraftdosis und Timing vermuten, dass verschiedene Muskelsynergien zum Einsatz kommen. Erst mit der im Vorschulalter zunehmend besseren *internen Repräsentation* und der damit einhergehenden Fähigkeit zur *Antizipation* von Ladungskräften erfolgt im Sinne der Regression während des Lernens eine optimierte Selektion gemeinsam wirkender Muskeln (vgl. Einleitung).

### 5.3.2 Antizipatorische Kontrolle

Vor allem bei wechselnden Beschleunigungs- bzw. Trägheitskräften bedarf es zur Sicherstellung eines stabilen Griffes der differenzierten *internen Repräsentation* der Objekteigenschaften vor Bewegungsbeginn (37). Die Griffsicherheit erfordert vor oder gleichzeitig mit dem Auftreten der Trägheitskräfte eine Zunahme der Griffkraft (58). 150ms vor dem Kraftanstieg ist elektromyografisch eine Aktivierung beteiligter Muskeln messbar. Auftretende Trägheitskräfte werden scheinbar bereits vor Bewegungsausführung in das motorische Programm eingebunden, erwartet bzw. antizipiert. Trägheitskräfte wirken sich an der Finger-Objekt-Berührungsfläche durch Änderung der Reibungskraft aus (87). Reibungskräfte werden als epikritische bzw. propriozeptive Informationen wahrgenommen. Voraussetzung für die Fähigkeit zur Antizipation ist also die uneingeschränkte epikritische und propriozeptive Perzeption und die Integration der sensiblen Informationen im somatosensorischen Kortex. Nur eine präzise innere Vorstellung über an dem gehaltenen Objekt auftretende Kräfte und Drehmomente ermöglicht es Erwachsenen, die Griffkraft auch bei komplexen Bewegungen differenziert anpassen zu können (25, 33, 61, 89). Durch Applikation nicht bekannter Gewichte auf einen in der Hand gehaltenen Kraftmesser wurde die Möglichkeit der Kraftantizipation in einer Erwachsenenstudie artefiziell verhindert. In diesem Fall zeigen auch Erwachsene eine überschießende Griffkraftantwort (30).

Sensible Informationen aktualisieren und erweitern stetig den Erfahrungsspeicher über Objekteigenschaften. Sind beispielsweise bewegungsassoziierte Objekteigenschaften intern repräsentiert, können sie auch bei neuen Bewegungen noch während der Bewegung selbst zur optimalen Griffkraftdosierung genutzt werden (57, 58, 87). Im Kindesalter ist der Erfahrungsspeicher zunächst klein, Trägheitskräfte können zwar ab dem 2. Lebensjahr im Zeitpunkt ihres Auftretens (27), aber nicht hinsichtlich der erforderlichen Griffkraftdosierung antizipiert werden, der Griffkrafteinsatz ist unökonomisch hoch (36). Sensorische Afferenzen während jeder neuen Bewegung bzw. dem wiederholten Auftreten von bewegungsassoziierten Trägheitskräften tragen dazu bei, eine antizipatorische Strategie zum Griffkrafteinsatz zu entwickeln. Die sensiblen Afferenzen werden sukzessive in den somatosensorischen Pool aufgenommen und mit motorischen Efferenzen verknüpft.

Die in der vorliegenden Studie untersuchten Aufwärtsbewegungen zeigten, dass die Griffkraftdosis bei langsamer Bewegung (**VEL**) ökonomisch, bei schneller Bewegung (**VES**) aber unökonomisch hoch ist (Abb. 31). Bei grundsätzlich bekanntem Bewegungsablauf aber hohen Geschwindigkeiten scheinen die Objekteigenschaften bzw. die auftretenden Reibungskräfte nicht

antizipiert werden zu können, so dass Vorschulkinder sicherheitshalber eine hohe Griffkraft einsetzen (Tabelle 7).

Hinsichtlich der zeitlichen Antizipation auftretender Trägheitskräfte, denen ein Griffkraftanstieg folgen muss, berichten vorhergehende Studien über eine ab dem 6. Lebensjahr altersabhängige Verkürzung der Latenz auf 60-80ms und einer signifikanten elektromyografische Aktivität 40 bis 50ms nach Beginn der Bewegungsplanung (18). Die Abnahme der Latenzzeiten wird mit der Vorstellung erklärt, dass während der motorischen Entwicklung die reflektorische Aktivität spinaler Neuronenkreise zugunsten supraspinaler Neuronenzentren abgelöst wird (18). Dies führt zwar zu insgesamt längeren Latenzen bei unerwarteter Krafteinwirkung, aber zu Latenzverkürzung bei erwarteten bzw. antizipierten Kräften (18). Treten Trägheitskräfte wiederholt auf, können sie antizipiert und mit kurzer Latenz von einem Griffkraftanstieg beantwortet werden, wie es auch in der vorliegenden Studie bereits für Dreijährige beobachtbar war (Abb. 11, 12, Tabelle 8). Die Latenz Dreijähriger war hier im Vergleich zu der von Sechsjährigen geringfügig aber nicht signifikant länger. Das Ergebnis bestätigt die in der Literatur beschriebene Fähigkeit zur Antizipation der Griffkraft im 3. Lebensjahr. Dass die antizipatorische Kontrolle der Griffkraft andererseits nicht angeboren ist, d.h. Höhe und Zeitpunkt auftretender Trägheitskräfte im frühen Kindesalter nicht vorhergesehen werden können, äußert sich neben der zunächst langen Latenz auch in der initial hohen Griffkraftdosis (18, 27) sowie phänomenologisch im unruhigen zeitlichen Verlauf der Kraftproduktion (Griffkrafttrate, vgl. Abb. 13, 14). Die multiplen Kraftspitzen werden in der Literatur auf die kontinuierliche Anpassung der Griffkraft an Informationen aus sensiblen Organellen der Hand zurückgeführt (*Feedback Kontrolle*), wie vor allem bei jüngeren Kindern beobachtet werden kann (27).

### 5.3.3 Ökonomie

Der Begriff der Griffkraftökonomie wird in der Literatur anhand des individuellen Sicherheitsfaktors *safety margin* definiert (87). Der *safety margin* ist die Differenz der eingesetzten Kraft abzüglich der tatsächlichen Trägheitskraft (87). Dabei gilt, dass je niedriger diese Differenz bzw. der „Kraftüberschuss“, desto ökonomischer der Griffkrafteinsatz. Ein hoher *safety margin* gewährleistet zwar einerseits eine ausreichende Griffstabilität, andererseits schränkt ein Zuviel an applizierter Griffkraft die Wahrnehmung mechanischer Reize an der Haut/Objekt-Kontaktfläche ein. Erhaltene sensible Afferenzen sind allerdings notwendig, um die Griffkraft flexibel an veränderte physikalische Eigenschaften des bewegten Objektes anzupassen (87). Ein niedriger *saf-*

*ty margin* wird dann berechnet, wenn die Höhe des notwendigen Griffkrafteinsatzes antizipiert werden kann, die Griffkraftdosierung erfolgt ökonomisch.

Ein unökonomisch hoher Griffkrafteinsatz bzw. ein hoher *safety margin* wurde bei unbekanntem Objekten oder bei ungeübten Bewegungen beobachtet (37, 53, 87).

In der vorliegenden Studie wurde der Anteil der eingesetzten Griffkraft an der Maximalgriffkraft ( $FG_{ant} = FG_{max_{dyn}}/FG_{max}$ ) zur Beurteilung der Griffstabilität im Vorschulalter herangezogen. Dabei galt, dass je geringer der Anteil ( $FG_{ant}$ ) an der Maximalgriffkraft (100%), desto stabiler und sicherer der Griff. Die geringe  $FG_{ant}$  bei langsamen Bewegungen (**VEL**, **SEL**) unterstreicht einen ökonomischen Griffkrafteinsatz und damit die Fähigkeit, die minimal notwendige Griffkraft abzuschätzen. Die Tendenz, dass sich die Fähigkeit zur Antizipation im Vorschulalter verbessert, zeichnet sich durch die etwas niedrigere  $FG_{ant}$  der Sechsjährigen im Vergleich zu jener Dreijähriger ab (Abb. 33), ist aber nicht signifikant. Der andere in der vorliegenden Studie verwendete Bewertungsparameter für die Griffkraftökonomie bezieht sich als *ratio* auf das Verhältnis von Griffkrafteinsatz und bewegungsassoziierter Beschleunigungs- bzw. Trägheitskraft. Eine Studie mit Kindern ab acht Monaten zeigte, dass bei konstanten Trägheitskräften die Griffkräfte bis zum 4. Lebensjahr signifikant abnahmen (27). Die *ratio* der vorliegenden Studie zeigt für keine der untersuchten Bewegungsmodi eine signifikante oder auch nur tendenzielle Verbesserung der Griffkraftökonomie mit dem Alter, auch nicht in jenen Bewegungsmodi, die mit der zitierten Studie vergleichbar sind.

Es konnte gezeigt werden, dass der Griffkrafteinsatz in der Sagittalebene weniger ökonomisch ist als in der Vertikalebene (4.3.1). Eine Studie mit erwachsenen Probanden bestätigte das höhere Griffkraftniveau in der mit der Sagittalebene vergleichbaren Horizontalebene (Bewegung medial-lateral) bei Repetitivbewegungen (24). Dieses Ergebnis wurde damit begründet, dass bei Bewegungen parallel zur Gravitation bei jedem Richtungswechsel ein Griffkraftanstieg notwendig ist, der in einem insgesamt höheren Kraftniveau resultierte. Wie bereits erläutert ist im Gegensatz dazu in der Vertikalebene nur am unteren Umkehrpunkt der Bewegung bei dem Bremsen und wieder Aufwärtsbeschleunigen des Objektes ein einschlägiger Kraftzuwachs erforderlich. Für Erwachsene wurden demnach ähnliche Phänomene beschrieben wie sie in der vorliegenden Studie an Vorschulkindern erarbeitet wurden. In jedem Fall bleibt für das Kindesalter zu diskutieren, ob Sagittalbewegungen grundsätzlich ungeübter sind. Wie Lokomotionsstudien zeigten, bringen sie sich nicht so stark in die Grob- und Feinmotorik ein, wie die Gravitation (74).

### 5.3.4 Automatisierung

Die Beurteilung, ob der Griffkrafteinsatz bei Bewegungen automatisiert erfolgt, unterliegt mehreren Gesichtspunkten (3.4.1.3.). Automatisierung orientiert sich phänomenologisch a) am Maß der Wiederholgenauigkeit der Griffkraftänderung bei gleichen Bewegungsaufgaben, b) am Maß der Gleichmäßigkeit des Kraftanstieges und -abfalles sowie c) an quantitativer Kraftdosierung und Krafttiming in Beziehung zur Bewegung.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie konnten zeigen, dass ältere Kinder phänomenologisch einen gleichmäßigeren Griffkrafteinsatz mit einer höheren Wiederholgenauigkeit aufweisen als jüngere, und dass die Griffkraft bei Bewegungen in der Vertikalebene (**VR**) gleichmäßiger und wiederholgenauer dosiert wird als in der Sagittalebene (**SR**) (vgl. Fallbeispiele). Die quantitative Analyse zeigt, dass *altersunabhängig* der Krafteinsatz bei hohen Bewegungsfrequenzen am ökonomischsten ist. Hinsichtlich der Latenz als Ausdruck für eine parallele, zentrale Efferenz für Bewegung und Griffkraft ergab sich für Einzelbewegungen hoher Geschwindigkeit (**VES**) ein langer zeitlicher Abstand zwischen Griffkraft- und Beschleunigungsmaximum. Im Gegensatz zu Wiederholungsbewegungen (**VRma**) müssen motorische Efferenzen an beteiligte Muskelgruppen bei jeder einzelnen Bewegung neu initiiert werden, sie sind weniger automatisiert abrufbar, als jene repetitiver Bewegungen. Das Phänomen, dass repetitive Bewegungen automatisierter erfolgen als Einzelbewegungen wurde bereits in einer vergleichbaren Erwachsenenstudie beobachtet (53) und bestätigt das Fehlen eines signifikanten Altersunterschiedes.

Bewegungen sind durch ein abgestimmtes Zusammenspiel von Muskeln (Synergie) möglich. Die Muskeln bzw. Muskelgruppen müssen über ihren Einsatz informiert bzw. aktiviert werden. Die Muskelaktivierung geschieht durch motorische Efferenzen. Sollen verschiedene Muskeln synergistisch wirken, ist ihre gleichzeitige Aktivierung notwendig. Die gleichzeitige Aktivierung erfolgt durch zeitliche Abstimmung der motorischen Efferenzen im Motorkortex, die untereinander durch Synapsen verschaltet sind. Synaptische Verschaltungen werden bei dem Erlernen einer motorischen Aufgabe *gebahnt* (vgl. 1.2.1, (54)). Je stärker die synaptische Bahnung, desto schneller die initialen Impulsleitungen im ZNS und desto geringer die Latenzen zwischen Bewegung und Kraft. Die zeitliche Abstimmung sowie die ökonomische Dosierung der Griffkraft kann überwiegend der Funktion des Kleinhirns zugeschrieben werden. Neue Bewegungen bedürfen längerer Latenzen, wie für Sagittalbewegungen und schnelle Einzelbewegungen gezeigt werden konnte. Doch gilt, dass je häufiger das motorische System mit Trägheitskräften konfrontiert wird, desto automatisierter wird die Griffkraftmodulation.

### 5.3.5 Zusammenfassung

Die Diskussion des Zusammenhanges von Griffkraft und Bewegung wurde anhand der Beurteilungskriterien „Koordination“, „Antizipation“, „Ökonomie“ und „Automatisation“ geführt.

Unter dem Aspekt *koordinativer Fähigkeiten* konnten die Ergebnisse der vorliegenden Studie die Hypothese der Existenz optimaler Muskelsynergien für die gleichzeitige Kraft- und Bewegungskontrolle durch das bereits im Vorschulalter konstante Verhältnis der absoluten Messwerte für „Bewegung“ und „Kraft“ bestätigen.

Für eine *antizipatorische Kontrolle* der Höhe und des Zeitpunktes des Griffkrafteinsatzes ist die interne Repräsentation von Objekteigenschaften eine entscheidende Voraussetzung. Im Vorschulalter ist die antizipatorische Kontrolle grundsätzlich möglich, aber in Abhängigkeit von der Bewegungsart unterschiedlich gut. Sensorische Afferenzen während ungeübter Bewegungen tragen dazu bei, das Repertoire interner Repräsentationen und mit ihr assoziierter motorischer Efferenzen zu erweitern und eine antizipatorische Strategie für den Griffkrafteinsatz zu entwickeln.

Von der antizipatorischen Kontrolle hängt auch wesentlich die Fähigkeit eines *ökonomischen Griffkrafteinsatzes* ab. Während die vorliegende Studie in Abhängigkeit von der Bewegungsart einen unterschiedlich ökonomischen Griffkrafteinsatz zeigte, konnte im Gegensatz zu anderen Studien keine weitere signifikante Ökonomisierung des Griffkrafteinsatzes zwischen dem 3. und dem 6. Lebensjahr nachgewiesen werden.

Schließlich münden in der Beurteilung des *Automatisationsgrades* des Griffkrafteinsatzes die zuvor beschriebenen Beurteilungskriterien ein. Hervorzuheben ist, dass repetitive Bewegungen im Vorschulalter wie auch bei Erwachsenen automatisierter erfolgen als Einzelbewegungen.

Quantitativ lässt sich weniger als qualitativ ein signifikant besser automatisierter Griffkrafteinsatz bei Erwachsenen gegenüber Vorschulkindern nachweisen.

## **5.4 Ausblick**

### **5.4.1 Weitere richtungweisende Untersuchungen**

Die Untersuchung des Griffkrafteinsatzes im Kindesalter trägt zum Verständnis motorischer Programme und ihrer Entwicklung bei. Sind die entscheidenden Komponenten der Griffkraftregulation bekannt, können Diagnostik und Therapie zielgerichtet gestaltet werden. Derzeit wird von verschiedenen Arbeitsgruppen die Hypothese verfolgt, dass im Zentralnervensystem für die gleichzeitige Planung von Griffkraft und Bewegung multiple sogenannte interne Modelle existieren (60, 81).

#### *Kombination mit neurophysiologischen Messmethoden*

In Kombination mit anderen neurophysiologischen Messmethoden (z.B. Elektromyografie EMG oder transkraniale magnetische Stimulation TMS) ließe sich durch zeitgleiche Messung der Kraft an der motorischen Endstrecke und der neuronalen Entladungen in Hirnstamm und Großhirn erschließen, welche Regelkreise der Griffkraftdosierung bei Bewegungen zugrunde liegen (16) und wie sie sich während der kindlichen Entwicklung verändern. Die Elektromyografie kann Aufschluss über die Muskeln geben, die bei der Kraftproduktion ungenügend oder übermäßig lange und stark aktiviert werden.

#### *Vergleich mit Säuglingen und motorisch auffälligen Kindern*

Das verwendete Messinstrumentarium erwies sich hier als einfach zu handhabendes Mittel, um die Koordination von Kraft und Bewegung zu quantifizieren. Durch Vergleich von Messdaten motorisch auffälliger Kinder mit den vorliegenden Daten des untersuchten gesunden Vorschulkollektivs kann auf weitere motorische Entwicklungsschritte im Kindesalter geschlossen werden. Es bietet sich weiterhin an, die Gruppe der untersuchten Kinder auf Säuglinge auszudehnen, da gezeigt werden konnte, dass entscheidende Entwicklungsschritte hinsichtlich Kraftdosierung und Krafttiming bereits vor dem 2. Lebensjahr stattfinden (27). Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Studien an Kindern kann erwogen werden, dass Aufgabenrepertoire um einfache Hebevorgänge zu erweitern (28, 30).

## 5.4.2 Einsatzmöglichkeiten in der Diagnostik

### *Maximalgriffkraft*

Die isometrische Kraftproduktion erfordert eine geringere Koordinationsleistung als die gleichzeitige Verrichtung isometrischer und isotonischer Muskularbeit bei Bewegungen. Bei motorisch schwerwiegend eingeschränkten Kindern, bei denen eine bewegungsassoziierte Kraftmessung nicht möglich ist, kann die Ermittlung der Maximalgriffkraft zur Beurteilung des Schweregrades der motorischen Störung dienen. Eine wesentlich niedrigere Maximalgriffkraft hoher Variabilität wurden beispielsweise bei Probanden mit Zerebralparese gefunden (84).

### *Isometrische Koordinationsaufgaben*

Statische Koordinationsaufgaben, wie beispielsweise der schnelle Wechsel zwischen Kontraktion und Relaxation der Griffkraft (6) oder das Griffkrafttracking (Anpassung der Höhe der Griffkraft an eine visuelle Vorgabe) (62), geben Aufschluss über die Geschwindigkeit und Gleichmäßigkeit der isometrischen Kraftzu- und Kraftabnahme. Sie können auch Hinweise darüber geben, inwieweit visuelle Informationen in die motorische Programmierung integriert sind und zur Genauigkeit der Griffkraftanpassung beitragen.

### *Phänomenologie des Griffkrafteinsatzes*

Der Griffkrafteinsatz von Kindern mit spastischer Hemiparese bei unilateraler Hirnläsion zeigte bei einzelnen Hebeaufgaben eine im Vergleich zu gesunden Kontrollgruppen nicht altersentsprechende Phänomenologie (29). Die vorgestellten Einzelfallbeispiele, die für die untersuchte Stichprobe gesunder Vorschulkinder repräsentativ sind, können als Referenz für motorisch auffällige Kinder dienen. Sie ermöglichen eine schnelle diagnostische Aussage über den Grad der motorischen Einschränkung.

### *Charakteristika verschiedener Krankheitsbilder*

In Erwachsenenstudien konnten durch Analyse weniger Parameter der statischen Griffkraftregulation charakteristische Defizite der Kraftmodulation verschiedenen klinischen Krankheitsbildern zugeordnet werden (44). Mit dem vorgestellten Mess-System, das die statische und dynamische Griffkraftmodulation berücksichtigt, konnte die Anzahl aussagekräftiger Parameter für die Griffkraftentwicklung im Kindesalter erhöht und das differentialdiagnostische Spektrum motorischer Defizite erweitert werden.

### 5.4.3 Therapeutische Aspekte

#### *Spastische Zerebralparese*

Bei Kindern mit spastischer Zerebralparese wurde unter anderem ein Defizit der Leitung und Verarbeitung sensibler Afferenzen beschrieben (19). Die Entwicklung der *internen Repräsentation* von Objekteigenschaften und der Antizipation auftretender Ladungskräfte bleibt unzureichend, wenn keine anderen kompensatorischen Mechanismen für einen adäquaten Griffkrafteinsatz gefördert werden (35). Visuelle Informationen über das Objekt können dabei behilflich sein, defizitäre oder mangelhafte *interne Repräsentation* zu kompensieren. Voraussetzung hierfür sind jedoch Restfunktionen somatosensibler Systeme. Visuelles Kraftfeedback kann aber auch helfen, motorische „Überregulation“ in Form zu hoher Griffkräfte abzubauen und somit einen ökonomischeren und geschickteren Umgang mit Gegenständen zu ermöglichen (9, 12, 19, 62).

Nicht nur das Ergreifen und Halten von Gegenständen erfordert einen adäquaten Griffkrafteinsatz, sondern insbesondere beim Transport von Gegenständen muss die Griffkraft der Bewegung angepasst werden. Es ist bekannt, dass Kinder mit zerebraler Parese durchaus Objekte im Handgriff transportieren können. Der erhöhte Griffkrafteinsatz führt jedoch in der Mehrzahl der Fälle zu einer frühzeitigen Ermüdung (17, 64). Für Kinder mit Koordinationsstörungen unterschiedlicher Genese wurde das Überwiegen der Agonisten im Vergleich zu antagonistischen Muskeln festgestellt, das neben schneller Ermüdung zu einem inadäquaten Griffkrafttiming z.B. bei bilateralen Armbewegungen führt (84).

Die Analyse der bewegungsabhängigen Griffkraftmodulation, wie sie in der vorliegenden Studie vorgestellt wurde, kann feststellen, bei welchen Bewegungsformen das Griffkrafttiming unzureichend ist und eine therapeutische Förderung der entsprechenden dynamischen Griffkraft einleiten.

## 6 Zusammenfassung

Eine adäquat dosierte Griffkraft ist für das sichere Transportieren in der Hand gehaltener Gegenstände bei Armbewegungen essentiell. Die Entwicklung des Griffkrafteinsatzes im Kindesalter wurde bisher nur für das Anheben von Objekten sowie bei plötzlicher Einwirkung externer Kräfte untersucht (27). Die vorliegende Studie konnte durch quantitative und qualitative Analyse der Griffkraft zeigen, dass Vorschulkinder auch bei Bewegungen verschiedener Geschwindigkeit und Richtung in der Lage sind, ihre Griffkraft an auftretende Ladungskräfte anzupassen.

1. Ein signifikanter Altersunterschied konnte nur für statische Griffkräfte, nicht aber für dynamische Griffkräfte nachgewiesen werden (vgl. 4.2.2.1). Tendenziell zeichnete sich phänomenologisch jedoch eine Verbesserung der Griffkraftmodulation ab. Der Griffkrafteinsatz sechsjähriger Kinder zeigte sich routinierter bzw. automatisierter als jener der dreijährigen (Abb. 10 bis 20), d.h. ladungskraftabhängiger Griffkraftanstieg und -abfall erfolgen gleichmäßig und bei repetitiven Bewegungen (**VR**, **SR**) wiederholgenau. Die im Bewegungsverlauf notwendige Griffkraftänderung wird von älteren Kindern frühzeitiger antizipiert und in das motorische Programm integriert als von jüngeren Kindern. Eine signifikante Verbesserung der Fähigkeit zur Antizipation findet im Vorschulalter jedoch nicht statt.
2. Im Ebenenvergleich (vertikal, sagittal) erschien die Griffkraftmodulation vertikaler Bewegungen (**VR**) phänomenologisch automatisierter als jene sagittaler Bewegungen (**SR**, Abb. 15, 16). Quantitativ bestätigte sich die Hypothese, dass die Griffkraft in der Vertikalebene ökonomischer dosiert wird als in der Sagittalebene (Abb. 23, Tabelle 5). Hinsichtlich des Griffkrafttimings wurde eine engere zeitliche Kopplung von Ladungs- und Griffkraft in der Vertikalbewegung nachgewiesen (Abb. 28, Tabelle 6). Dabei gilt, dass je langsamer die Bewegung, desto kürzer die Latenz zwischen Griffkraft- und Beschleunigungsmaximum.
3. Die höchsten Beschleunigungen werden bei Repetitivbewegungen erreicht (**SR**, **VR**) (Abb. 26, Tabelle 6). Da Bewegungen geringer Griffkraft bei hohen Beschleunigungen als automatisiert gelten, kann davon ausgegangen werden, dass Repetitivbewegungen (**SR**, **VR**) automatisierter ausgeführt werden als Einzelbewegungen (**SEL**, **VEL**). Vertikal werden in allen Altersgruppen die höchsten Beschleunigungen erzielt (**VR<sub>ma</sub>**, Tabelle 6). Der Bewegungsablauf ist in dieser Ebene automatisierter als sagittal (**SR<sub>ma</sub>**). Die Vermutung, dass Bewegungen in frei gewählter Geschwindigkeit mit einem geringeren Griffkrafteinsatz einhergehen, als Be-

wegungen vorgegebener „maximaler“ Geschwindigkeit, konnte nicht bestätigt werden. Die *ratio* lag in beiden Ebenen bei „mittleren“ Geschwindigkeiten (**SRmi**, **VRmi**) höher als bei „maximal schnellen“ (**SRma**, **VRma**, Abb. 27b, d).

Die Studie konnte den derzeitigen Erkenntnisstand um die Feststellung erweitern, dass die Griffkraftmodulation auch bei Vorschulkindern nicht nur bei einzelnen Hebevorgängen im Präzisionsgriff sondern auch bei Repetitivbewegungen verschiedener Ebenen und Geschwindigkeiten erfolgt. Die Griffkraft wird in der Vertikalen ökonomischer dosiert und besser antizipiert als in der Sagittalen. Motorische Programme sind für die Vertikalebene frühzeitiger automatisiert abrufbar als für die Sagittalebene, möglicherweise weil die Gravitationskraft bereits vor der Geburt in die motorische Planung integriert wird (39). Der in der Sagittalebene dominierende Einfluss der Trägheitskräfte wird auch im Erwachsenenalter mit einem höheren Griffkraftniveau beantwortet (25). Mit Frequenzsteigerung werden Griffkraftdosierung und Griffkrafttiming vertikal zunehmend automatisiert. Es bestätigt sich für Vorschulkinder die bei Erwachsenen gemachte Beobachtung (54), dass bei repetitiven im Gegensatz zu einzelnen Bewegungen eine schnellere Aktualisierung der motorischen Programme erfolgt als bei jenen, die neu initiiert werden. Repetitivbewegungen, auf deren Ablauf sich Vorschulkinder nicht konzentrieren müssen, und bei denen die Kognition weitgehend ausgeschaltet werden kann, werden ökonomischer und gleichmäßiger durchgeführt.

Die Fähigkeit zur Griffkraftregulation ist bis zu dem 3. Lebensjahr weitgehend angelegt. Bis zu diesem Zeitpunkt werden bewegungsabhängige Objekteigenschaften als *interne Repräsentation* im somatomotorischen Kortex gespeichert und ermöglichen einen ökonomischen und zeitgerechten Griffkrafteinsatz. Obwohl die Griffkraftanpassung grundsätzlich sehr frühzeitig möglich ist, zeigen sich ebenen- und geschwindigkeitsabhängige Unterschiede. Altersunterschiede deuten sich überraschenderweise nur in der phänomenologischen Darstellung der Griffkraft an.

Die vorliegende Arbeit an 116 gesunden Vorschulkindern stellt eine empirische und experimentelle Basis für weitere klinische Untersuchungen im Bereich der Griffkraftregulation bei Kindern dar. Sie mag einen Baustein für die Diagnostik und quantitative Therapiekontrolle handmotorisch eingeschränkter Kinder liefern.

## 7 Literatur

1. Ager CL, Olivett BL, Johnson CL. Grasp and Pinch Strength in children 5 to 12 years old. *Am J Occup Ther* 38: 107-112, 1984.
2. Ahlheim K-H. Physik. Vol. 2. Mannheim: *Dudenverlag*: 490, 1989.
3. Anderson M. The Role of the Cerebellum in Motor Control and Motor Learning. *Motor Control Disorders* 4: 623-635, 1993.
4. Arbib MA, Iberall T, Lyons D. Coordinated Control Programs for Movements of the Hand. *Exp Brain Res suppl.* 10: 111-129, 1985.
5. Armand J, Olivier E, Edgley SA, Lemon RN. The Structure and Function of the Developing Corticospinal Tract: Some Key Issues. In: *Hand and Brain*. Wing A, Haggard P, Flanagan JR (Eds.). New York: *Accademic Press*: 125-146, 1996.
6. Avarello M, Bolsinger P, Mai N. Fast repetitive force changes in hemiparetic and cerebellar patients. *Eur Arch Psychiatry Neurol Sci* 237: 135-138, 1988.
7. Bell-Krotoski J. Light touch-deep pressure testing using Semmes-Weinstein monofilaments. St. Louis: *C.V. Mosby Co.* 3: 589, 1990.
8. Bizzi E, Abend W. Posture Control and Trajectory Formation in Single- and Multi-Joint Arm Movements. *Motor Control Mechanisms in Health and Disease*: 31-45, 1983.
9. Blank R. Die normale und pathologische Entwicklung elementarer und koordinativer Griffkraft funktionen im Kleinkindalter. Habilitationsschrift, München, 2000.
10. Blank R, Flett S, Heizer W. Three dimensional movement analysis of hand function in preschool children, 8<sup>th</sup> *European Congress of Clinical Neurophysiology*, München: 367, 1996.
11. Blank R, Heidebrecht J, von Voß H. *Move* Computersoftware, Version 0.907 (unveröffentlicht), Ludwig-Maximilians-Universität München, 1997.
12. Blank R, Heizer W, von Voß H. Externally guided control of static grip forces by visual feedback-age and task effects in 3-6-year old children and in adults. *Neurosci Lett* 271: 41-44, 1999a.
13. Blank R, Miller V, von Voß H, von Kries R. Effects of age on distally and proximally generated drawing movements: a kinematic analysis of school children and adults. *Dev Med Child Neurol* 41: 592-596, 1999b.
14. Dawson JL. An anthropological perspective on the evolution and lateralization of the brain. *Ann N Y Acad Sci* 299: 424-447, 1977.
15. De Smet L, Tirez B, Stappaerts K. Effect of forearm rotation on grip strength. *Acta Orthopédica Belgica* 64: 360-362, 1998.
16. Ehrsson H, Fagergren A, Jonsson T, Westling G, Johansson RS, Forssberg H. Cortical activity in precision versus power grip tasks: an fMRI study. *Journal of Neurophysiology* 83: 528-536, 2000.
17. Eliasson AC. Manipulation Forces in Grasping of Children with Cerebral Palsy. *Movement Disorders in Children* 36: 144-150, 1992.

18. Eliasson AC, Forssberg H, Ikuta K, Apel I, Westling G, Johansson R. Development of Human Precision Grip V: anticipatory and triggered grip actions during sudden loading. *Exp Brain Res* 106: 425-433, 1995.
19. Eliasson AC, Gordon AM, Forssberg H. Basic co-ordination of manipulative forces of children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol* 33: 661-670, 1991.
20. Eliasson AC, Häger C, Krumlinde L, Melen K. Discussion Section III. *Movement Disorders in Children* 36: 151-158, 1992.
21. Eyre JA, Miller S, Ramesh V. Constancy of central conduction delays during development in man: investigation of motor and somatosensory pathways. *Journal of Physiology* 434: 441-452, 1991.
22. Fess EE. Guidelines for evaluating assessment instruments. Review. *J Hand Ther* 8: 144-148, 1995.
23. Flanagan JR, Tresilian JR. Grip-load force coupling: a general control strategy for transporting objects. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 20: 944-957, 1994.
24. Flanagan JR, Tresilian J, Wing AM. Coupling of grip force and load force during arm movements with grasped objects. *Neurosci Lett* 152: 53-56, 1993.
25. Flanagan JR, Wing AM. Modulation of grip force with load force during point-to-point arm movements. *Exp Brain Res* 95: 131-143, 1993.
26. Flanagan JR, Wing AM. The stability of precision grip forces during cyclic arm movements with a hand-held load. *Exp Brain Res* 105: 455-464, 1995.
27. Forssberg H, Eliasson AC, Kinoshita H, Johansson RS, Westling G. Development of human precision grip. I: Basic coordination of force. *Exp Brain Res* 85: 451-457, 1991.
28. Forssberg H, Eliasson AC, Kinoshita H, Westling G, Johansson RS. Development of human precision grip. IV. Tactile adaptation of isometric finger forces to the frictional condition. *Exp Brain Res* 104: 323-330, 1995.
29. Forssberg H, Eliasson AC, Redon-Zouitenn C, Mercuri E, Dubowitz L. Impaired grip-lift synergy in children with unilateral brain lesions. *Brain* 122: 1157-1168, 1999.
30. Forssberg H, Kinoshita H, Eliasson AC, Johansson RS, Westling G, Gordon AM. Development of human precision grip. II. Anticipatory control of isometric forces targeted for object's weight. *Exp Brain Res* 90: 393-398, 1992.
31. Fridén J, Lieber RL. Muscle architecture basis for neuromuscular control of the forearm and hand. In: *Hand and Brain*. Wing A, Haggard P, Flanagan JR (Eds.). New York: *Accademic Press*: 69-79, 1996.
32. Gibson AR, Horn KM, Pong M, Kan PLV. Construction of a reach to grasp. *Novartis Foundation Symposium* 218: 233-245, 1998.

33. Goodwin AW, Jenmalm P, Johansson RS. Control of grip force when tilting objects: effect of curvature of grasped surfaces and applied tangential torque. *Journal of Neurosciences* 18: 10724-10734, 1998.
34. Gordon A. Development of Anticipatory Control Mechanisms for Manipulation. *Movement Disorders in Children* 36: 130-136, 1992.
35. Gordon AM, Duff S. Fingertip forces during object manipulation in children with hemiplegic cerebral palsy. I: anticipatory scaling. *Dev Med Child Neurol* 41: 166-175, 1999.
36. Gordon AM, Forssberg H, Johansson RS, Eliasson AC, Westling G. Development of human precision grip. III. Integration of visual size cues during the programming of isometric forces. *Exp Brain Res* 90: 399-403, 1992.
37. Gordon AM, Westling G, Cole KJ, Johansson RS. Memory representations underlying motor commands used during manipulation of common and novel objects. *J Neurophysiol* 69: 1789-1796, 1993.
38. Gordon J, Ghez C. Roles of proprioceptive input in control of reaching movements. *Movement Disorders in Children* 36: 124-129, 1992.
39. Hager-Ross C, Cole KJ, Johansson RS. Grip-force responses to unanticipated object loading: load direction reveals body- and gravity-referenced intrinsic task variables. *Exp Brain Res* 110: 142-150, 1996.
40. Hager-Ross C, Johansson RS. Nondigital afferent input in reactive control of fingertip forces during precision grip. *Exp Brain Res* 110: 131-141, 1996.
41. Hepp-Reymond MC, Huesler E, Maier MA. Precision grip in humans: temporal and spatial synergies. In: *Hand and Brain*. Wing A, Haggard P, Flanagan JR (Eds.). New York: *Accademic Press*: 37-67, 1996.
42. Hermsdörfer J. Analyse feinmotorischer Kraftkontrolle. *Entwicklungsgruppe Klinische Neuropsychologie*: 15-20, 1996.
43. Hermsdörfer J. Betriebsanleitung für Gerät *GHT-K*, Version 1.1 (3/96). *Entwicklungsgruppe Klinische Neuropsychologie*, 1996.
44. Hermsdörfer J, Mai N. Disturbed grip-force control following cerebral lesions. *J Hand Ther* 9: 33-40, 1996.
45. Hermsdörfer J, Mai N, Marquardt C. Evaluation of precision grip using pneumatically controlled loads. *J Neurosci Methods* 45: 117-126, 1992.
46. Hermsdörfer J, Mai N, Rudroff G, Münßinger M. Untersuchung zerebraler Handfunktionsstörungen - Untersuchungsbogen. *Entwicklungsgruppe Klinische Neuropsychologie - Materialien für die Rehabilitation*, Dortmund: *borgmann-publishing*, 1994.
47. Hoare D, Larkin D. Kinaesthetic abilities of clumsy children. *Dev Med Child Neurol* 33: 671-678, 1991.

48. Horak F. Motor control models underlying neurologic rehabilitation of posture in children. *Movement Disorders in children* 36: 21-30, 1992.
49. Illert M, Kuhtz-Buschbeck JP. Motorische Systeme. In: *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Schmidt RF, Schaible H-G (Eds.). Berlin, Heidelberg, New York: *Springer*: 4: 111-150, 2001.
50. Jeannerod M. Intersegmental coordination during reaching for natural objects. In: *Attention and Performance IX*. Long J, Baddeley AD (Eds.): 153-169, 1981.
51. Jenny AB, Inukai J. Principles of motor organisation of the monkey cervical spinal cord. *J Neurosci* 3: 567-575, 1983.
52. Johansson RS, Cole KJ. Grasp stability during manipulative actions. *Can J Physiol Pharmacol* 72: 511-24, 1994.
53. Johansson RS, Häger C, Bäckström L. Somatosensory control of precision grip during unpredictable pulling loads III. Impairments during digital anesthesia. *Exp Brain Res* 89: 204-213, 1992.
54. Johansson RS, Häger C, Riso R. Somatosensory control of precision grip II. Changes in load force rate. *Exp Brain Res* 89: 192-203, 1992.
55. Johansson RS, Westling G. Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. *Exp Brain Res* 56: 550-564, 1984.
56. Johansson R, Westling G. Influences of cutaneous sensory input on the motor co-ordination during precision manipulation. In: *Somatosensory Mechanisms*. Euler C, Franzen D, Lindblom U (Eds.). London: *Macmillan*: 249-260, 1984.
57. Johansson RS, Westling G. Signals in tactile afferents from the fingers eliciting adaptive motor responses during precision grip. *Exp Brain Res* 66: 141-154, 1987.
58. Johansson RS, Westling G. Coordinated isometric muscle commands adequately and erroneously programmed for the weight during lifting task with precision grip. *Exp Brain Res* 71: 59-71, 1988.
59. Johansson RS, Westling G. Programmed and triggered actions to rapid load changes during precision grip. *Exp Brain Res* 71: 72-86, 1988.
60. Kawato M, Wolpert D. Internal models for motor control. *Novartis Foundation Symposium* 218: 291-304, 1998.
61. Kinoshita H, Backstrom L, Flanagan JR, Johansson RS. Tangential torque effects on the control of grip forces when holding objects with a precision grip. *Journal of Neurophysiology* 78: 1619-1630, 1997.
62. Kriz G, Hermsdörfer J, Marquardt C, Mai N. Feedback-based training of grip force control in patients with brain damage. *Arch Phys Med Rehabil* 76: 653-659, 1995.
63. Kuhtz-Buschbeck JP, Stolze H, Johnk K, Boczek-Funcke A, Illert M. Development of prehension movements in children: a kinematic study. *Exp Brain Res* 122: 424-432, 1998.

64. Kuhtz-Buschbeck JP, Sundholm LK, Eliasson AC, Forssberg H. Quantitative assessment of mirror movements in children and adolescents with hemiplegic cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol* 42: 728-736, 2000.
65. Lanz T, Wachsmuth W. Praktische Anatomie. Ein Lehr- und Hilfsbuch der Anatomischen Grundlagen Ärztlichen Handelns. 1. Band, 3. Teil: Arm. München: *Springer*, 2: 215, 1959.
66. Lawrence DG, Kuypers HGJM. The functional organisation of the motor system in the monkey I; Effects of bilateral pyramidal lesions. *Brain* 91: 1-14, 1968.
67. Lemon RN, Johansson RS, Westling G. Corticospinal control during reach, grasp, and precision lift in man. *J Neurosci* 15: 6145-6156, 1995.
68. Mathiowetz V, Kashman N, Volland G, Weber K, Dowe M, Rogers S. Grip and pinch strength: normative data for adults. *Arch Phys Med Rehabil* 66: 69-74, 1985.
69. Mathiowetz V, Wiemer DM, Federman SM. Grip and pinch strength: norms for 6- to 19-year-olds. *Am J Occup Ther* 40: 705-711, 1986.
70. Müller K, Hömberg V. Development of speed of repetitive movements in children is determined by structural changes in corticospinal efferents. *Neuroscience Letters* 144: 57-60, 1992.
71. Napier JR. The prehensile movements of the Human Hand. *The Journal of Bone and Joint Surgery*: 902-913, 1956.
72. Neuhäuser, G. Störung der Psychomotorik In: *Kinder- und Jugendpsychiatrie in Klinik und Praxis: Grundprobleme, Pathogenese, Diagnostik, Therapie*. Remschmidt H, Schmidt M (Eds.). Stuttgart: *Thieme*, 1988.
73. Oerter R. Entwicklungspsychologie. München: *Urban- und Schwarzenberg*, 1982.
74. Pozzo T, Papaxanthis C, Stapley P, Berthoz A. The sensorimotor and cognitive integration of gravity. *Brain-Res-Brain-Res-Rev.* 28: 92-101, 1998.
75. Precht HFR. Die Entwicklung und Eigenart frühkindlicher Bewegungsweisen, *Klin. Wochenschr.* 34, 1956.
76. Pschyrembel W. Klinisches Wörterbuch. Berlin: *de Gruyter* 258, 1998.
77. Santello M, Flanders M, Soechting JF. Postural hand synergies for tool use. *Journal of Neuroscience* 18: 10105-10115, 1998.
78. Schreyer DJ, Jones EG. Growth and target finding by axons of the corticospinal tract in prenatal and postnatal rats. *Neuroscience* 7: 1837-1853, 1982.
79. Simon C. Lehrbuch für Kinderheilkunde und Jugendmedizin. Stuttgart: *Schattauer*, 1995.
80. Smeets JBJ, Erkelens CJ, Denier van der Gon JJ. Adjustments of fast goal-directed arm movements in response to an unexpected inertial load. *Exp Brain Res* 81: 303-312, 1990.
81. Stroeve S. Neuromuscular control model of the arm including feedback and feedforward components. *Acta Psychologica* 100: 117-131, 1998.
82. Thach T. Neural Basis of Motor Control. *Motor Control Disorders* 4: 615-621, 1993.

83. Touwen BCL. The neurological examination of the child with minor nervous dysfunction. Stuttgart, New York: *Thieme*, 1982.
84. Valvano J, Newell KM. Practice of a precision isometric grip-force task by children with spastic cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol* 40: 464-473, 1998.
85. Vries JIP de, Visser GHA, Precht HFR. The emergence of fetal behaviour, I: Qualitative aspects. *Early Human Development* 7: 301, 1982.
86. Werremeyer MM, Cole KJ. Wrist action affects precision grip force. *Journal of Neurophysiology* 78: 271-280, 1997.
87. Westling G, Johansson RS. Factors Influencing the Force Control During Precision Grip. *Exp Brain Res* 53: 277-284, 1984.
88. Westling G, Johansson RS. Responses in glabrous skin mechanoreceptors during precision grip in humans. *Exp Brain Res* 66: 128-140, 1987.
89. Wing AM, Flanagan JR, Richardson J. Anticipatory postural adjustments in stance and grip. *Exp Brain Res* 116: 122-130, 1997.

## 8 Anhang

<i>Tabelle 8.1: Isometrische Griffkraft bei Maximaler Hebekraft in N</i> .....	132
<i>Tabelle 8.2: Maximale Hebekraft in kg</i> .....	134
<i>Tabelle 8.3: Signifikanzprüfung der Altersunterschiede</i> .....	136
<i>Tabelle 8.4: Signifikanzprüfung der Geschlechtsunterschiede</i> .....	136
<i>Tabelle 8.5: Griffkrafteinsatz bei statischen Aufgaben: Jungen und Mädchen</i> .....	137
<i>Tabelle 8.6: Kenndaten der untersuchten Stichprobe „Vorschulkinder“</i> .....	138
<i>Klinisch-neurologische Untersuchung und Anamnese</i> .....	139
<i>Untersuchungsplan GHT</i> .....	144

**Tabelle 8.1**a) *Isometrische Griffkraft bei Maximaler Hebekraft in N*

<b>Alter in Jahren</b>	<i>Mittelwert</i> ( $\bar{x}$ )	<i>Standard- abweichung (sd)</i>	<i>Maximum</i>	<i>Minimum</i>
3	19,17	5,98	30,59	2,98
4	25,10	7,44	39,22	9,13
5	24,51	8,02	36,67	6,63
6	32,20	8,73	58,80	20,05

b) *Isometrische Griffkraft bei Maximaler Hebekraft in N*

Halbjahresabstände in Jahren, Mädchen und Jungen

**Legende:**

( $\bar{x}$ ) = *Mittelwert*  
(sd); Stabw = *Standardabweichung*

**3 - 3 6/12 Jahre**

Mädchen

N=11 Mittelwert ( $\bar{x}$ ) Stabw (sd) Minimum Maximum  
19,8035 5,3805 12,81 30,59

Jungen

N=6 Mittelwert ( $\bar{x}$ ) Stabw (sd) Minimum Maximum  
22,7237 6,4948 14,78 30,57

**3 7/12 - 3 11/12 Jahre**

Mädchen

N=13 Mittelwert ( $\bar{x}$ ) Stabw (sd) Minimum Maximum  
20,9128 10,2198 2,98 41,50

Jungen

N=9 Mittelwert ( $\bar{x}$ ) Stabw (sd) Minimum Maximum  
20,3994 5,7529 12,87 28,65

**4 - 4 6/12 Jahre**

Mädchen

N=7 Mittelwert ( $\bar{x}$ ) Stabw (sd) Minimum Maximum  
26,9370 5,5012 20,15 34,59

Jungen

N=11 Mittelwert ( $\bar{x}$ ) Stabw (sd) Minimum Maximum  
27,0287 8,6719 12,87 39,22

**4 7/12 - 4 11/12 Jahre**

Mädchen

N=11	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	20,1143	7,3377	9,13	32,02

Jungen

N=6	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	29,2978	5,9149	21,72	36,59

**5 - 5 6/12 Jahre**

Mädchen

N=7	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	22,3399	8,8458	11,07	37,19

Jungen

N=8	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	26,5300	5,7687	21,12	35,22

**5 7/12 - 5 11/12 Jahre**

Mädchen

N=12	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	23,1973	8,6027	6,63	33,90

Jungen

N=10	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	28,2505	7,0095	18,67	36,67

**6 - 6 6/12 Jahre**

Mädchen

N=9	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	29,2817	6,3294	21,47	39,34

Jungen

N=6	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	32,3565	6,6074	23,10	40,20

**6 7/12 - 6 11/12 Jahre**

Mädchen

N=6	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	37,1448	11,8121	26,57	58,80

Jungen

N=9	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw ( <i>sd</i> )	Minimum	Maximum
	33,9467	8,7582	20,05	50,58

**Tabelle 8.2**

a) Maximale Hebekraft in kg

Alter in Jahren	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Standardabweichung (sd)	Maximum	Minimum
3	1,59	0,67	3,25	0,55
4	2,12	0,90	4,00	0,50
5	2,09	0,70	3,60	0,55
6	2,56	0,70	4,35	1,50

b) Maximale Hebekraft in kg

Halbjahresabstände in Jahren, Mädchen und Jungen

**Legende:**

( $\bar{x}$ ) = Mittelwert  
 (sd); Stabw = Standardabweichung

**3 - 3 6/12 Jahre**

Mädchen

N=11 Mittelwert ( $\bar{x}$ ) Stabw (sd) Minimum Maximum  
 1,5364 ,5409 ,80 2,40

Jungen

N=6 Mittelwert ( $\bar{x}$ ) Stabw (sd) Minimum Maximum  
 1,6000 ,4889 ,90 2,35

**3 7/12 - 3 11/12 Jahre**

Mädchen

N=14 Mittelwert ( $\bar{x}$ ) Stabw (sd) Minimum Maximum  
 1,6571 ,8829 ,55 3,25

Jungen

N=8 Mittelwert ( $\bar{x}$ ) Stabw (sd) Minimum Maximum  
 1,7375 ,4373 1,10 2,45

**4 - 4 6/12 Jahre**

Mädchen

N=7 Mittelwert ( $\bar{x}$ ) Stabw (sd) Minimum Maximum  
 1,9000 ,8846 ,70 3,40

Jungen

N= Mittelwert ( $\bar{x}$ ) Stabw (sd) Minimum Maximum  
 2,2400 ,8916 ,80 3,55

**4 7/12 - 4 11/12 Jahre**

Mädchen

N=9	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	1,8389	1,0726	,50	3,40

Jungen

N=6	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	2,9417	1,0351	1,85	4,35

**5 - 5 6/12 Jahre**

Mädchen

N=7	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	1,6643	,6756	,55	2,60

Jungen

N=7	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	2,4214	,5491	1,80	3,30

**5 7/12 - 5 11/12 Jahre**

Mädchen

N=12	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	2,0292	,6538	,95	3,10

Jungen

N=10	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	2,0250	,7896	,75	3,60

**6 - 6 6/12 Jahre**

Mädchen

N=9	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	2,3611	,4512	1,50	3,25

Jungen

N=6	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	2,1083	,6895	1,35	3,15

**6 7/12 - 6 11/12 Jahre**

Mädchen

N=6	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	2,9333	,9527	1,85	4,35

Jungen

N=9	Mittelwert ( $\bar{x}$ )	Stabw (sd)	Minimum	Maximum
	3,1889	1,2412	1,60	5,45

**Tabelle 8.3**Signifikanzprüfung der Altersunterschiede (*t*-Test für unabhängige Stichproben)Griffkrafteinsatz bei **dynamischen** Aufgaben

Altersunterschiede 3-, 4-, 5- und 6-jähriger Kinder	N	Z/df	P <sub>ratio</sub> <	P <sub>FGant</sub> <	P <sub>latenz</sub> <
<i>Bewegungsmodus</i>	3-, 4-, 5-, 6-jährige Kinder				
<b>Vertikal</b>					
<i>Vertikal einzel „schnell“</i>	28-21-28-24	3	0,164	0,108	0,217
<i>Vertikal repetitiv „maximaler“ <math>\bar{v}</math></i>	31-31-28-24	3	0,104	0,316	0,181
<i>Vertikal repetitiv „mittlerer“ <math>\bar{v}</math></i>	30-32-27-24	3	0,934	0,858	<b>0,068</b>
<i>Vertikal einzel „langsam“ aufwärts</i>	29-32-25-24	3	0,568	<b>0,069</b>	0,743
<i>Vertikal einzel „langsam“ abwärts</i>	28-31-26-23	3	0,451	0,108	0,356
<b>Sagittal</b>					
<i>Sagittal repetitiv „maximaler“ <math>\bar{v}</math></i>	21-23-21-22	3	0,336	0,933	0,595
<i>Sagittal repetitiv „mittlerer“ <math>\bar{v}</math></i>	28-29-24-21	3	<b>0,064</b>	0,753	0,387
<i>Sagittal einzel „langsam“ vorwärts</i>	26-29-28-23	3	0,283	0,251	0,266
<i>Sagittal einzel „langsam“ rückwärts</i>	27-31-27-24	3	0,146	0,816	0,087

**Legende:**

M = Median; N = Anzahl der Probanden

 $\bar{v}$  = Geschwindigkeit entsprechend der Anweisung „maximal schnell“ bzw. „mittel schnell“**Tabelle 8.4**Signifikanzprüfung der Geschlechtsunterschiede (*t*-Test für unabhängige Stichproben)a) Griffkrafteinsatz bei **dynamischen** Aufgaben

Geschlechtsunterschiede	N	df	P <sub>ratio</sub> <	P <sub>FGant</sub> <	P <sub>latenz</sub> <
<i>Bewegungsmodus</i>					
<b>Vertikal</b>					
<i>Vertikal einzel „schnell“</i>	w=60; m=51	109	0.8	0.91	<b>0.01</b>
<i>Vertikal repetitiv „maximaler“ <math>\bar{v}</math></i>	w=63; m=52	113	0.16	0.72	<b>0.03</b>
<i>Vertikal repetitiv „mittlerer“ <math>\bar{v}</math></i>	w=62; m=52	111	0.36	0.44	0.4
<i>Vertikal einzel „langsam“ aufwärts</i>	w=60; m=50	108	0.15	0.5	0.5
<i>Vertikal einzel „langsam“ abwärts</i>	w=59; m=49	106	0.5	0.08	0.2
<b>Sagittal</b>					
<i>Sagittal repetitiv „maximaler“ <math>\bar{v}</math></i>	w=47; m=44	85* 97°	0.24	0.25	0.2
<i>Sagittal repetitiv „mittlerer“ <math>\bar{v}</math></i>	w=57; m=48	100* 107°	<b>0.03</b>	<b>0.025</b>	0.05
<i>Sagittal einzel „langsam“ vorwärts</i>	w=58; m=48	104	0.1	<b>0.01</b>	0.65
<i>Sagittal einzel „langsam“ rückwärts</i>	w=60; m=49	107	0.16	0.1	0.64

**Legende:**

M = Median; N = Anzahl der Probanden

 $\bar{v}$  = Geschwindigkeit entsprechend der Anweisung „maximal schnell“ bzw. „mittel schnell“° =  $FG_{ant}$ ; \* = *ratio*

b) Griffkrafteinsatz bei **statischen** Aufgaben

<b>Geschlechtsunterschiede</b>	<b>df</b>	<b>P<sub>Kraft</sub> &lt;</b>
<b><i>Griffkraft</i></b>		
<i>Maximalgriffkraft in N</i>	117	<b>0,014</b>
<i>Griffkraft bei Maximaler Hebekraft in N</i>	116	<b>0,028</b>
<i>Maximale Hebekraft in kg</i>	113	0,106

**Tabelle 8.5**

*Griffkrafteinsatz bei statischen Aufgaben: Jungen und Mädchen*

	<b>Geschlecht</b>	<b>N</b>	<b>Mittelwert (<math>\bar{x}</math>)</b>	<b>Standardabweichung (sd)</b>
<i>Maximalgriffkraft in N</i>	Mädchen	63	29,83	7,64
	Jungen	56	33,13	6,61
<i>Griffkraft bei Maximaler Hebekraft in N</i>	Mädchen	62	23,34	9,24
	Jungen	56	26,81	7,41
<i>Maximale Hebekraft in kg</i>	Mädchen	61	1,92	0,86
	Jungen	54	2,17	0,79

**Legende:**

N = Anzahl der Probanden

**Tabelle 8.6:** *Kenndaten der untersuchten Stichprobe „Vorschulkinder“*

<b>Alter in Jahren</b>	<b>Kenndaten</b> Längeneinheiten in cm Gewichtseinheit in kg	<b>Mittelwert</b> ( $\bar{x}$ )	<b>Standardabweichung</b> (sd)	<b>N</b>
<b>3</b>	<i>Körpergröße</i>	<b>103</b>	0,05	32
	<i>Körpergewicht</i>	<b>15,9</b>	2,6	32
	<i>Fingerlänge</i>	<b>4,7</b>	0,4	32
	<i>Handlänge</i>	<b>6,4</b>	0,6	32
	<i>Handbreite</i>	<b>5,7</b>	0,5	32
	<i>Unterarmlänge</i>	<b>14,7</b>	1,2	32
<b>4</b>	<i>Körpergröße</i>	<b>107</b>	0,06	32
	<i>Körpergewicht</i>	<b>16,8</b>	2,2	32
	<i>Fingerlänge</i>	<b>4,9</b>	0,4	32
	<i>Handlänge</i>	<b>6,7</b>	0,5	32
	<i>Handbreite</i>	<b>5,9</b>	0,4	32
	<i>Unterarmlänge</i>	<b>16,0</b>	1,2	32
<b>5</b>	<i>Körpergröße</i>	<b>114</b>	0,07	28
	<i>Körpergewicht</i>	<b>19,8</b>	1,2	28
	<i>Fingerlänge</i>	<b>5,4</b>	0,4	28
	<i>Handlänge</i>	<b>7,1</b>	0,5	28
	<i>Handbreite</i>	<b>6,0</b>	0,4	28
	<i>Unterarmlänge</i>	<b>17,2</b>	1,0	28
<b>6</b>	<i>Körpergröße</i>	<b>125</b>	0,05	24
	<i>Körpergewicht</i>	<b>23,9</b>	3,8	24
	<i>Fingerlänge</i>	<b>5,7</b>	0,4	24
	<i>Handlänge</i>	<b>7,6</b>	0,4	24
	<i>Handbreite</i>	<b>6,5</b>	0,4	24
	<i>Unterarmlänge</i>	<b>17,7</b>	0,9	24

**Legende:** N = Anzahl der Probanden

**Klinisch-Neurologischer Untersuchungsbogen**  
*Zur Erfassung motorischer und klinischer Auffälligkeiten*  
 Arbeitsgruppe Neurophysiologie, Kinderzentrum München

CODE: Untersucher:  
 NAME: Datum der Untersuchung:  
 GEB.: Adresse, Telefon:

### 1. Beurteilung von Verhaltenszustand und Kooperation<sup>1</sup>

#### *Verhaltenszustand*

- 0: wach, weint nicht, entspannt
- 1: wach, weint nicht, verspannt und rigide
- 2: wach, aufgeregt
- 3: wach, weint (ggf. Untersuchung abbrechen)
- 4: schreit
- 5: andere (Müdigkeit?)

#### *Kooperation*

- 0: interessiert, kommt Aufforderungen nach, braucht keine Stimulation, Gesichtsausdruck wach
- 1: desinteressiert, kommt Aufforderungen nach, braucht keine besondere Ermunterung, aber nicht aufmerksam
- 2: zögernd, braucht Ermunterung, scheint ängstlich, Gesicht verspannt
- 3: zögernd, braucht Ermunterung, scheint verdrossen, zurückgezogen
- 4: schreckt bei Annäherung zurück, kommt Aufforderungen nicht nach, scheint erschreckt
- 5: kommt Aufforderungen nicht nach, erscheint teilnahmslos
- 6: wehrt sich, schubst Untersuchenden von sich, versucht zu entkommen
- 7: andere

### 2. Klinische Untersuchung

Größe: Fingerlänge: Handlänge:  
 Gewicht: Handbreite: Unterarmlänge:

<sup>1</sup> Aus: Touwen BCL, Prechtel, HFR. The neurological examination of the child with minor nervous dysfunction. *Clin Dev Med* 38: 18-19. London: Heinemann, 1970



### 3.3 Reflexe

*Bewertung:* Unauffällig: Reflexzone nicht verbreitert, keine Seitenungleichheit.

Auffällig: verbreiterte Reflexzone, Hyperreflexie.

Muskeleigenreflexe: *Trizeps-Sehnen-Reflex:*

*Bizeps-Sehnen-Reflex:*

*Trizeps-Surae-Reflex:*

*Bizeps-Surae Reflex:*

*Patellar-Sehnen-Reflex:*

Muskelfremdreflex: *Bauchhautreflex* in drei Ebenen:

### 3.4 Prüfung der Regelkreise

Kortikospinaler Regelkreis: *Adduktoren-Reflex:*

*Babinski-Reflex:*

*Rossolimo-Reflex:*

Extrapyramidales System: *Migazzini-Reflex:*

*Zahnradphänomen:*

*Ruhetremor:*

Zerebelläres System: *Romberg-Versuch:*

*Finger-Nasenversuch:*

*Rebound Phänomen:*

*Wackelknie:*

*Passivität der Hand:*

*Strichgang:*

*Einbeinstand:*

### 3.5 Feinmotorik<sup>3</sup>

*Diadochokinese:*

*Fingerschnippen:*

*Fingeropposition:*

*Bemerkungen: Mirror Movements?*

<sup>3</sup> Modifiziert nach *Denver-Entwicklungsskalen* (79) sowie aus Townen, BCL. *The examination of the child with minor nervous dysfunction*. Stuttgart, New York: Thieme, 1982 (83)

### **3.6 Grobmotorik<sup>4</sup>**

Ball schießen:

Ball werfen:

Auf-einem-Bein-Hüpfen:

Zehen-, Fersengang:

„Schubkarre“:

Handkraft:

Schulterkreisen:

Armkreisen:

Handgelenkskreisen:

### **3.7 Handlateralität, Handgriffe<sup>5</sup>**

Knöpfen:

Ausziehen:

Anziehen:

Dose aufschrauben:

Turm bauen mit 8 Klötzen:

Zähneputzen:

Kreise malen:

Kreis ausschneiden:

---

<sup>4</sup> ebenda

<sup>5</sup> Modifiziert nach *Entwicklungsgruppe Klinische Neuropsychologie*-Materialien für die Rehabilitation (46)

## Anamnesebogen

*Zur Erfassung motorischer und klinischer Auffälligkeiten*  
Arbeitsgruppe Neurophysiologie, Kinderzentrum München

### Eigenanamnese

Kindergartengruppe:

Staatsangehörigkeit:

Geschwister (Anzahl und Alter):

Eltern (Alter und Beruf):

*Bewertung:* keine Auffälligkeit: „Nein“; Auffälligkeit: „Ja“; *Bemerkung:* Spezifikation

Krankenhausaufenthalte:

Schwere Erkrankungen:

Komplikationen:

Vergiftungen:

Medikamenteneinnahme:

Therapie (z.B. Physiotherapie):

Sehbehinderung (Brille?):

### Motorische Entwicklung<sup>6</sup>

Aufsetzen:

Laufen:

Treppensteigen:

„Mama/Papa“:

2-Wort-Sätze:

Winken, Händeklatschen:

Pinzettengriff:

### Dinge des täglichen Lebens

Anziehen:

Ausziehen:

Essen mit Besteck:

Dreirad-Fahren:

Schleife-Binden:

Nadel-Einfädeln:

### Sonstiges

Schwangerschaft und Geburt:

Stillzeit:

Hauptbezugspersonen jetzt/zuvor:

Heimaufenthalte:

Vegetativum (Schlaf, Ernährung, Ausscheidung):

Psychische/psychiatrische Auffälligkeiten:

### Familienanamnese

Neurologische Auffälligkeiten:

Stoffwechselerkrankungen:

<sup>6</sup> Angaben in Monaten, Bewertung nach der *Denver-Entwicklungsskala* (79)

**Greifen-Heben-Transportieren- Untersuchungsplan<sup>7</sup>**  
Arbeitsgruppe Neurophysiologie, Kinderzentrum München

<b>Vers.-nummer</b>	<b>Aufgabe</b>	<b>Anweisung</b>	<b>Bemerkung zum Kind</b>
1	Maximale Griffkraft	Drücke die Apfelsine aus!	
2	Maximale Griffkraft gegen Widerstand	Drücke die Wippe nach oben, ohne mit den Fingern zu rutschen!	
3	Einzelne Vertikalbewegung maximaler Geschwindigkeit	Feuerwehr so schnell wie möglich nach oben!	
4	Repetitive Vertikalbewegungen mit steigender Geschwindigkeit	Fahrstuhl erst langsam, dann so schnell wie möglich fahren lassen!	
5	Repetitive Vertikalbewegungen in <i>angenehmer</i> Geschwindigkeit	Fahre den Fahrstuhl hoch und hinunter, so schnell wie Du magst.	
6	Repetitive Vertikalbewegungen in „langsamer“ Geschwindigkeit	Fahre den Fahrstuhl langsam hoch, lasse die Leute aussteigen, fahre dann langsam wieder hinunter, lasse die Leute einsteigen.	
6	Repetitive Sagittalbewegungen mit steigender Geschwindigkeit	Säge erst langsam, dann immer schneller vorwärts und rückwärts!	
7	Repetitive Sagittalbewegung in <i>angenehmer</i> Geschwindigkeit	Säge vorwärts und rückwärts, so schnell wie Du magst.	
8	Repetitive Sagittalbewegungen in „langsamer“ Geschwindigkeit	Säge langsam vorwärts, mache eine Pause; säge dann langsam wieder rückwärts.	

<sup>7</sup> Modifiziert nach *Entwicklungsgruppe Klinische Neuropsychologie* 1996 (34) sowie nach Forssberg und Westling 1984 bzw. 1991 (87, 27)

## 9 Danksagung

Mein Dank gilt in erster Linie meinem Betreuer Herrn Oberarzt Dr. Rainer Blank für die Erarbeitung der Fragestellung, die unermüdliche Begleitung während der Durchführung der Untersuchungen sowie für die zahlreichen Hilfestellungen und die kritische Durchsicht der Promotionsarbeit. Die Durchführung der Untersuchungen ist nur durch die intensive Unterstützung von Herrn Univ. Prof. Dr. Dr. h.c. Hubertus von Voß möglich gewesen, dem ich ferner unbedingt für die Überlassung des Promotionsthemas, die Betreuung bei der Erstellung der Dissertation und für die wertvollen Hinweise bei der Überarbeitung danken möchte.

Dem kollegialen Team der Abteilung Neurophysiologie des Instituts für Soziale Pädiatrie und Jugendmedizin des Kinderzentrums München danke ich, in erster Linie meiner Mitdotorandin Frau Nicola Strigl-Pill für die wertvolle Partnerschaft und Freundschaft, Herrn Dipl. Psychologen Wolfgang Heizer für die bereichernde statistische Beratung und den Dipl. Ingenieuren, Herrn Tobias Barner und Herrn Jan Heidebrecht, für die unermüdliche Beratung im Bereich der Informationstechnologie.

Ohne die mutigen Kinder und die Unterstützung deren Eltern und BetreuerInnen wäre die Erhebung der Daten nicht möglich gewesen, ein herzlicher Dank geht daher an Gregor, Julius, Raphaela und Markus sowie an all die anderen Kinder aus dem *St. Joseph* Kindergarten (München-Schwabing), dem Städtischen Kindergarten Großhadern (Heiglhofstraße) und dem *Montessori*-Kindergarten (Heiglhofstraße).

Für die gründliche Korrektur des Skriptes möchte ich Frau Johanna Weindl und Frau Sonja Schillo danken. Für die spontane Hilfsbereitschaft hinsichtlich der grafischen Darstellungen danke ich Frau Dipl. Grafik-Designerin Anja Sellmann und ihrer Tochter Merle (Quickborn in Schleswig-Holstein).

Der umfassendste Dank geht an meine Familie. Meiner Schwester Frauke danke ich vor allem für die kritischen Anregungen, meinen Eltern für den immerwährenden Rückhalt. Für die emotionale Unterstützung möchte ich auch meinen FreundInnen danken, insbesondere Henning Christen, Julie Mahn und Antje Rhauderwiek.

## 10 Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

### Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Bauplan von Neuronen.....	10
Abb. 1a:	Intrinsische Muskeln der Hand.....	14
Abb. 1b:	Handgriff und Präzisionsgriff.....	15
Abb. 1c:	Sensomotorische Repräsentationsfelder der menschlichen Hirnrinde.....	18
Abb. 2:	Dimensionalität der Handgeschicklichkeit.....	19
Abb. 3a:	Parallele Änderung von Ladungskraft- und Griffkrafttrajektorien bei vier wiederholten Hebevorgängen mit verschiedenen Objektoberflächen.....	21
Abb. 3b:	Änderung von Griffkraft- und Ladungskrafttrajektorien bei schnellen repetitiven horizontalen Armbewegungen zweier Probanden A und B.....	22
Abb. 4:	Messobjekt zur bewegungskorrelierten Griffkraftanalyse.....	32
Abb. 5a:	Haltung des Probanden bei dynamischen Kraftmessungen, vertikal.....	35
Abb. 5b:	Haltung des Probanden bei dynamischen Kraftmessungen, sagittal.....	35
Abb. 6a, e:	Vertikale und sagittale Repetitivbewegungen „maximaler“ Geschwindigkeit.....	37
Abb. 6b, f:	Vertikale und sagittale Repetitivbewegungen „mittlerer“ Geschwindigkeit.....	37
Abb. 6c, g:	Vertikale und sagittale Einzelbewegungen „langsamer“ Geschwindigkeit.....	37
Abb. 6d:	Vertikale Einzelbewegung aufwärts maximal „schneller“ Geschwindigkeit.....	37
Abb. 7:	Beschleunigungs-Zeit-Funktion von Aufwärtsbewegungen; Originaldaten.....	40
Abb. 8:	Drei Kraftkurven bei „schnellen“ einzelnen Aufwärtsbewegungen.....	42
Abb. 9:	Zeitliche Übereinstimmung von Beschleunigung und Griffkraft; „schnelle“ einzelne Vertikalbewegungen.....	45
Abb. 10a, b:	Einzelne Vertikalbewegungen aufwärts „schnell“.....	50
Abb. 11, 12:	Einzelne Vertikalbewegungen aufwärts, „maximale“ Geschwindigkeit.....	51
Abb. 13, 14:	Einzelne „schnelle“ Vertikalbewegung: Änderung der Griffkraft/Zeit.....	52
Abb. 15, 16:	Vertikale und sagittale Repetitivbewegung „mittlerer“ Geschwindigkeit: zeitliche Kohärenz.....	54
Abb. 17, 18:	Vertikale und sagittale Repetitivbewegung „mittlerer“ Geschwindigkeit: Wiederholgenauigkeit.....	55
Abb. 19, 20:	Vertikale und sagittale Repetitivbewegung „mittlerer“ Geschwindigkeit: Kraftertendiagramm.....	57
Abb. 21:	Sagittale Repetitivbewegung mit Geschwindigkeitssteigerung, 6-jähriges Kind.....	59
Abb. 22:	Altersabhängigkeit der Maximalgriffkraft in N.....	61
Abb. 23:	Maximalgriffkraft (rot) und Griffkraft bei Maximaler Hebekraft (grün).....	65

Abb. 24a:	Dynamische Griffkräfte – Griffkraftmaxima bei Bewegungen in der Vertikalebene .....	67
Abb. 24b:	Dynamische Griffkräfte – Griffkraftmaxima bei Bewegungen in der Sagittalebene .....	67
Abb. 25 a, b:	Mediane Maximalbeschleunigungen, vertikal (a) und sagittal (b).....	71
Abb. 26:	Maximale Beschleunigungen bei repetitiven bzw. einzelnen Vertikalbewegungen.....	75
Abb. 27a, b:	Griffkraftdosierung in der Vertikalebene.....	80
Abb. 27c, d:	Griffkraftdosierung in der Sagittalebene.....	81
Abb. 28 a, b:	Latenzen in der Vertikal- (a) und Sagittalebene (b).....	84
Abb. 29:	Veränderung der Latenzdauer bei Frequenzzunahme.....	88
Abb. 30:	Veränderung der ratio (Griffkraft/Beschleunigung) bei Frequenzzunahme.....	88
Abb. 31:	Griffkraftdosierung bei „langsamen“ und „schnellen“ einzelnen Aufwärtsbewegungen.....	91
Abb. 32a:	Griffkraftdosierung bei einzelnen „schnellen“ und repetitiv „schnellen“ Vertikalbewegungen.....	93
Abb. 32b:	Latenz bei einzelnen „schnellen“ und repetitiv „schnellen“ Vertikalbewegungen.....	93
Abb. 33a, b:	Griffkraftdosis bei „langsamen“ Vertikal (a)- und Sagittalbewegungen (b).....	95

### **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Bewertungsfaktoren der klinisch-neurologischen Untersuchung .....	31
Tabelle 2:	Aufgaben im Überblick .....	38
Tabelle 3:	Übersicht Probandengruppe.....	48
Tabelle 4:	Isometrische Maximalgriffkraft in N .....	62
Tabelle 5a, b:	Dynamische Maximalgriffkräfte in N .....	68
Tabelle 6a, b:	Maximalbeschleunigungen in $m/s^2$ .....	72
Tabelle 7:	Griffkraftdosierung.....	78
Tabelle 8:	Latenzdauer in ms.....	83
Tabelle 8.1:	Isometrische Griffkraft bei Maximaler Hebekraft in N .....	132
Tabelle 8.2:	Maximale Hebekraft in kg .....	134
Tabelle 8.3:	Signifikanzprüfung der Altersunterschiede .....	136
Tabelle 8.4:	Signifikanzprüfung der Geschlechtsunterschiede .....	136
Tabelle 8.5:	Griffkrafteinsatz bei statischen Aufgaben: Jungen und Mädchen.....	137
Tabelle 8.6:	Kenndaten der untersuchten Stichprobe „Vorschulkinder“ .....	138

## 11 Lebenslauf der Verfasserin

Die Verfasserin wurde am 24. November 1972 in Hamburg geboren. In ihrem 3. Lebensjahr zog die Familie aus beruflichen Gründen des in einer Reederei tätigen Vaters nach Sao Paulo/Brasilien. Hier begann sie 1979 die Schulausbildung an der deutsch-brasilianischen *Humboldt-Schule*, nach der Rückkehr 1981 nach Deutschland besuchte sie die *Grundschule am Mühlenberg* und schloss die Schulausbildung am *Dietrich-Bonhoeffer Gymnasium* in Quickborn/Schleswig-Holstein 1992 mit dem Abitur (Note 1,4) ab.

Noch in dem gleichen Jahr begann die Verfasserin mit dem Medizinstudium an der Universität Hamburg, wechselte 1994 nach dem Physikum (Note 1,6) an die *Ludwig-Maximilians-Universität München* und absolvierte nach dem universitären Studium das Praktische Jahr 1998/1999 auf der infektiologischen Station des *Hôpital Cochin* in Paris/Frankreich, in der Allgemeinchirurgie an der *McMaster University* Hamilton/Kanada und in der Kinderchirurgie sowie Kinder- und Jugendheilkunde Schwerpunkt Neuropädiatrie an der *Charité*, Berlin. Die Staatsexamina wurden 1995, 1998 und 1999 in München abgelegt (Gesamtnote 2,3).

Nach 18 Monaten der Arbeit als Ärztin im Praktikum in der Kinderklinik der *Medizinischen Hochschule Hannover* erlangte die Verfasserin im Jahr 2001 die Vollapprobation und begann 2002 die Facharztausbildung für Kinder- und Jugendpsychiatrie in der Schweiz.

Bereits während des Studiums arbeitete sie in Vorbereitung auf ihre Promotion in dem Forschungslabor *Neurophysiologie und -psychologie* unter der Leitung von Herrn Oberarzt Dr. med. habil. R. Blank und erzielte erste wissenschaftliche Erfolge.

Die medizinische Tätigkeit in Klinik und Forschung wurde ergänzt durch ein ausgeprägtes entwicklungs- und friedenspolitisches Interesse. Von 1996-1999 koordinierte die Verfasserin ein Flüchtlingsprojekt in Uganda, arbeitete 1998 in einem Projekt der Entwicklungszusammenarbeit im Sudan und übernahm 1999 den Vorsitz der Projektkommission der internationalen Medizinstudierendenorganisation. Das Diplom für Tropenmedizin (*Bernard-Nocht-Institut Hamburg*, 2001) stellt eine Brücke zwischen Medizin und Entwicklungspolitik her.

In der Friedensbewegung ist die Verfasserin im Rahmen der Arbeitsgruppe Süd-Nord der *IPPNW (International Physicians for the Prevention of Nuclear War)* aktiv. Nebenberuflich studiert sie an der *FernUniversität Hagen* in dem friedenswissenschaftlichen Postgraduiertenprogramm „Konflikt und Frieden“ (Abschluss 2002).

In ihrer Vision möchte sich die Verfasserin transkulturell für eine gewaltfreie, unbehinderte Entwicklung von Menschen und speziell Kindern einsetzen.