

Aus dem Institut für Trainingswissenschaft und Sportinformatik
der Deutschen Sporthochschule Köln

Leiter: Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Joachim Mester

Biomedizinische Grundlagen zum Krafttraining im Kindes- und Jugendalter

Von der Deutschen Sporthochschule Köln
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaft (Dr. rer. nat.)

Genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dr. med. Michael Behringer

aus Erkrath

Köln 2011

Erster Referent: Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Joachim Mester
Institut für Trainingswissenschaft und Sportinformatik
Deutsche Sporthochschule Köln

Zweiter Referent: Univ.-Prof. Dr. med. Petra Platen
Institut für Sportmedizin und Sporternährung
Fakultät für Sportwissenschaft
Ruhr-Universität Bochum

Vorsitzender des Promotionsausschusses: Univ.-Prof. Dr. med. Wilhelm Bloch
Tag der mündlichen Prüfung: 05.04.2012

Erklärung gemäß § 5 Abs. 3: Diese Dissertation wurde an noch keiner anderen Stelle zum Zwecke der Promotion vorgelegt

Köln, den 11.04.2012

Dr. med. Michael Behringer

Eidesstattliche Versicherung:

Hierdurch versichere ich an Eides Statt: Ich habe diese Arbeit selbständig und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen angefertigt; sie hat noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegen. Wörtlich übernommene Textstellen, auch Einzelsätze oder Teile davon, sind als Zitate kenntlich gemacht worden.

Hierdurch erkläre ich, dass ich die „Leitlinien guter wissenschaftlicher Praxis“ der Deutschen Sporthochschule Köln in der aktuellen Fassung eingehalten habe.

Köln, den 11.04.2012

Dr. med. Michael Behringer

meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	4
2	Einleitung.....	5
3	Terminologie	6
4	Methodik	7
4.1	<i>Unsystematische Literaturrecherche</i>	7
4.2	<i>Systematische Literaturrecherche.....</i>	9
5	Reifeinteilung.....	12
6	Entwicklung der Muskelkraft	16
6.1	<i>Allometrie</i>	18
6.2	<i>Muskelwachstum.....</i>	23
6.3	<i>Muskelarchitektur und biomechanische Einflussfaktoren.....</i>	47
6.4	<i>Endokrine Steuerung.....</i>	55
6.5	<i>Neuromuskuläre Steuerung</i>	65
6.6	<i>Fazit.....</i>	71
7	Trainierbarkeit der Muskelkraft	73
7.1	<i>Muskelkraft.....</i>	73
7.2	<i>Geschlechtsunterschiede in der Krafttrainierbarkeit.....</i>	88
7.3	<i>Hypertrophie</i>	91
7.4	<i>Veränderungen der Muskelfasertypen</i>	95
7.5	<i>Neurologische und nervale Anpassungserscheinungen.....</i>	97
7.6	<i>Muskelmechanische Anpassungserscheinungen.....</i>	102
7.7	<i>Genetische Einflüsse.....</i>	103
7.8	<i>Hormonelle Einflüsse auf die Trainierbarkeit.....</i>	105
7.9	<i>Stabilität der Kraftzuwächse.....</i>	109

7.10	<i>Fazit</i>	112
8	Sportartbezogene Relevanz	114
8.1	<i>Sportartspezifische Leistungsfähigkeit</i>	114
8.2	<i>Motorische Leistungsfähigkeit</i>	116
8.3	<i>Fazit</i>	119
9	Belastbarkeit	120
9.1	<i>Der Passive Bewegungsapparat</i>	120
9.2	<i>Beeinträchtigung des Wachstums</i>	122
9.3	<i>Belastbarkeit der Muskulatur</i>	123
9.4	<i>Übertraining</i>	125
9.5	<i>Fazit</i>	129
10	Nutzen aus gesundheitlicher Sicht	130
10.1	<i>Krafttraining als Verletzungsprophylaxe</i>	130
10.2	<i>Einfluss auf den Knochen</i>	132
10.3	<i>Einfluss von Krafttraining auf die Körperzusammensetzung</i>	134
10.4	<i>Einfluss auf das kardiovaskuläre System</i>	139
10.5	<i>Einfluss auf die aerobe Kapazität</i>	143
10.6	<i>Einflüsse auf die Psyche</i>	145
10.7	<i>Fazit</i>	148
11	Beurteilung der Studienlage	148
11.1	<i>Bewertungskriterien</i>	148
11.2	<i>Internationaler Vergleich</i>	151
11.3	<i>Input Definition</i>	152
12	Forschungsbedarf	154
13	Zusammenfassung und Ausblick	162

14	Abbildungsverzeichnis	168
15	Tabellenverzeichnis	171
16	Literaturverzeichnis	172
17	Anhang.....	209
18	Zusammenfassung.....	215
18.1	<i>Deutsch.....</i>	<i>215</i>
18.2	<i>Englisch.....</i>	<i>216</i>
	Danksagung.....	217
	Lebenslauf	218

1 Vorwort

Die hier vorliegende Dissertation basiert auf der im Jahr 2010 veröffentlichten Expertise mit dem Titel „Krafttraining im Nachwuchsleistungssport“ (Behringer et al., 2010). Bei dieser Schrift handelt es sich um eine, Ende 2007 durch das Bundesinstitut für Sportwissenschaft in Auftrag gegebene Projektarbeit. Ziel dieser Arbeit war die systematische Aufarbeitung des nationalen und internationalen Forschungsstandes zum Krafttraining mit Kindern und Jugendlichen. Dabei standen neben der Abgrenzung von Reife- und trainingsbedingten Kraftzuwächsen insbesondere die zugrundeliegenden physiologischen Mechanismen muskulärer Adaptationen im Fokus. Weiterhin wurde der Frage nachgegangen, ob Teile der gewonnen Kraftzuwächse in sportartspezifische Leistungen oder Teilleistungen transferiert werden können – eine Frage, die insbesondere für den Nachwuchsleistungssport von zentraler Bedeutung ist. Letztlich wurden medizinische Gesichtspunkte eines Krafttrainings mit Heranwachsenden aufgegriffen, um mögliche Risiken positiven gesundheitlichen Anpassungserscheinungen entgegenzustellen. Auf Basis der Literaturanalyse wurden abschließend die aktuellen Forschungsdesiderate zu dem genannten Thema herauskristallisiert und schriftlich fixiert.

Von anderen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe erstellte Inhalte der Expertise wurden in der vorliegenden Dissertationsarbeit entfernt und teilweise durch neue Kapitel ersetzt. So sind die Einleitung und Kapitel 4 (Methodik) überarbeitet und erweitert, das Kapitel 6 (Entwicklung der Muskelkraft) und Kapitel 7.9 (Stabilität der Kraftzuwächse) komplett neu erstellt und die übrigen Kapitel zum Teil modifiziert worden.

2 Einleitung

Die Verbesserung der Muskelkraft als ein Teil der konditionellen Fähigkeiten ist im Nachwuchsleistungssport ebenso wichtig wie im Hochleistungssport der Erwachsenen. Steigende Ansprüche an die Leistung von immer jüngeren Aktiven werfen die Frage auf, ob Belastungsformen wie das Krafttraining in der Lage sind, die jungen Sportlerinnen und Sportler auf die Anforderungen im Erwachsenenleistungssport besser vorzubereiten. Dabei sind Leistungsaspekte ebenso zu hinterfragen, wie mögliche präventiv-verletzungsprophylaktische Einflüsse.

Neben der Vorbereitung junger Talente auf leistungssportliche Anforderungen ist die Bedeutung eines Krafttrainings im Kindes- und Jugendalter auch außerhalb des Leistungssportes zu prüfen. Betrachtet man die immer schlechter werdende Fitness unserer Kinder und Jugendlichen (Weineck, 2007), so könnte ein Krafttraining auch hier eine sinnvolle Einflussgröße darstellen, welche bisher weitgehend ungenutzt bleibt. Da aus dieser Grundgesamtheit auch die potentiellen Spitzensportlerinnen und -sportler von morgen rekrutiert werden sollen, ergibt sich aus zweifacher Sicht ein dringender Handlungsbedarf, der möglicherweise mit einem Umdenken in Bezug auf das Krafttraining einhergehen sollte (Mester, 2007).

Während im Erwachsenensport mittlerweile fast in allen Sportarten Krafftelemente in das Training implementiert werden (Guy und Micheli, 2001), stehen dieser Entwicklung im Nachwuchssport noch viele mit dem Krafttraining verknüpfte Missverständnisse und traditionelle Vorstellungen im Wege. Ein klassisches Beispiel hierfür ist die Annahme, dass Krafttraining sich negativ auf die Schnellkraft (Kraemer und Fleck, 2005) und die Flexibilität (Guy und Micheli, 2001) auswirken würde. Auch wird ein Krafttraining oft fälschlicherweise mit dem Bodybuilding oder Gewichtheben gleichgesetzt. Diese und andere Vorstellungen erklären die meist negative Haltung von Trainern¹ und Eltern gegenüber einem Krafttraining bei Kindern und Jugendlichen.

Für Kinder im präpubertären Alter nahm man sogar lange Zeit komplett Abstand von einem Krafttraining, da Schädigungen unausgereifter Strukturen befürchtet und keine Effekte aufgrund niedriger Hormonspiegel erwartet wurden. Erst im späten Schulalter (11. - 12. LJ) könnten nach diesen Meinungen leichte Zusatzgewichte (Sandsäcke, Medizinbälle) verwendet werden (Hebestreit et al., 2002). Auch wenn auf internationaler Ebene diesbezüglich seit einigen Jahren neue Forschungsergebnisse vorgelegt werden, trifft man im deutschsprachigen Raum noch immer auf sehr kritische Einstellungen. Die Position-Statements führender interna-

¹ Weibliche und männliche Schreibweise: Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde in der Regel die männliche Schreibweise verwendet. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass sowohl die weibliche als auch die männliche Schreibweise in den entsprechenden Kapiteln gemeint ist.

tionaler Institutionen scheinen offensichtlich nicht den Einfluss auf die sportwissenschaftliche Diskussion und die Sportpraxis in Deutschland genommen zu haben wie es wünschenswert wäre. Diese offiziellen Stellungnahmen bezeichnen ein Krafttraining im Kindes- und Jugendalter einheitlich als sicher und effektiv. Bislang fehlen jedoch vergleichbare Positionspapiere aus dem deutschsprachigen Raum. Der Großteil der in der Praxis angewandten Theorie stammt nach wie vor überwiegend aus den nationalen Lehrbüchern, welche in Bezug auf ihre Aktualität im internationalen Vergleich teilweise deutlich zurückliegen.

Diese Arbeit soll sich der Frage widmen, wie sich nationale und internationale Erkenntnislage darstellt und welche Konsequenzen daraus zu ziehen sind. Zu Beginn wird eine Bestandsaufnahme stehen, die zum einen die bisher durchgeführten Studien und zum anderen die daraus resultierenden Lehrmeinungen analysiert. Daraus leitet sich der Forschungsbedarf ab.

3 Terminologie

Unter dem Begriff *Krafttraining* werden in der vorliegenden Arbeit wiederholte Kontraktionen gegen äußere Widerstände verstanden, welche die Fähigkeit erhöhen sollen, „Kräften entgegenzuwirken oder sie zu überwinden“ (Menzi et al., 2007). Dabei werden dynamisch konzentrische und dynamisch exzentrische Kontraktionsformen ebenso mit einbezogen, wie statische Kontraktionen gegen unüberwindbare Widerstände. Auch Belastungsformen mit spezieller Berücksichtigung des Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus, welche im englischen Sprachraum unter dem Begriff „Plyometrics“ bekannt sind, werden in der vorliegenden Arbeit zum Krafttraining gezählt. Die wettkampforientierten Sportarten Gewichtheben (bestehend aus den Disziplinen Reißen und Stoßen), Kraftdreikampf (bestehend aus den Disziplinen Bankdrücken, Kniebeuge und Kreuzheben) und Bodybuilding werden in der vorliegenden Arbeit vom Begriff des Krafttrainings hingegen abgegrenzt.

Zur Generierung externer Widerstände wird im Krafttraining neben Freihanteln, Kraftgeräten und elastischen Bändern auch das eigene Körpergewicht eingesetzt. Ferner gehören computergestützte Kraftmaschinen (z.B. Isokineten) zum Repertoire der externen Widerstandsquellen. Seit einigen Jahren kommen darüber hinaus auch vibrierende Trainingsmittel zum Einsatz (z.B. Vibrationsplattformen), um den Trainingsreiz zu erhöhen.

Von dem oben genannten primären Ziel der erhöhten Muskelkraft sind sekundäre Ziele abzugrenzen, welche mit Hilfe der gewonnenen Kraftzuwächse erreicht werden sollen. Dazu gehören unter anderem eine verbesserte sportartspezifische Leis-

tungsfähigkeit sowie eine Prophylaxe und Rehabilitierung von Verletzungen des aktiven und passiven Bewegungsapparates.

4 Methodik

4.1 Unsystematische Literaturrecherche

Zu Beginn der Arbeit wurde, ausgehend von einschlägigen nationalen und internationalen Lehrbüchern und Übersichtsarbeiten, eine unsystematische Literaturrecherche² durchgeführt. Potentiell relevante Quellenangaben in diesen Publikationen wurden erfasst und in die weitere unsystematische Literaturrecherche aufgenommen. Da die Zahl relevanter Quellen durch dieses Vorgehen von nur wenigen Ausgangsquellen rasant ansteigt, wird dieser Teil der Literaturrecherche oft auch als "Schneeballprinzip" bezeichnet.

Neben der Identifikation relevanter Literatur war es das Ziel der unsystematischen Literaturrecherche, die gängigen nationalen und internationalen Lehrmeinungen zu unterschiedlichen Teilbereichen des Krafttrainings im Kindes- und Jugendalter in einer ersten Annäherung abzubilden. Die Rahmen dieses Arbeitsschrittes erfassten Kernaussagen wurden dafür in verschiedene Themenbereiche eingeteilt und tabellarisch niedergelegt. Zu den genannten Themenbereichen gehörten:

Tab. 1: *Gliederung der unsystematischen Literaturrecherche*

Themenbereich	Erläuterungen/ Beispiele
Physiologische Muskelkraftentwicklung	
Strukturelle Veränderungen	Muskelquerschnittsfläche, Muskelfaserlänge, Fiederungswinkel
Endokrine Steuerung	Sexualhormone, Wachstumshormone, IGF-1
Funktionelle Veränderungen	Rekrutierung und Frequenzierung motorischer Einheiten, Kokontraktionen
Trainingsmethodik & Richtlinien	
Trainingsintensität	Empfohlene Trainingsintensität an-

² Die unsystematische Literaturrecherche geht im Gegensatz zur systematischen Literatursuche von bereits bekannten Quellen aus, von denen aus weiter gesucht wird. Zu diesen Quellen gehören im wesentlichen einschlägige themenbezogene Lehrbücher.

Themenbereich	Erläuterungen/ Beispiele gegeben in Prozent vom 1RM
Trainingshäufigkeit	Empfohlene Anzahl an Trainingseinheiten pro Woche
Trainingsmittel	Freihanteln, eigenes Körpergewicht, Krafttrainingsmaschinen, usw.
Trainingsgestaltung	Belastungsprogression, Zirkeltraining vs. Stationsbetrieb, usw.
Anpassung & Trainierbarkeit	
Strukturelle Anpassungen	Hypertrophie, Knochenwachstum, Muskelarchitektur, usw.
Neuronale Anpassungen	Nervenleitgeschwindigkeit, Rekrutierung, usw.
Hormonelle Anpassungen	Akute und chronische Veränderungen von Hormonkonzentrationen im Blut
Kontraktionsmechanismen	Muskelrelaxationszeit, Unterschiede in Kontraktionsprozessen
Kraft	Präpubertäre Trainierbarkeit, absolute vs. relative Kraftzuwächse, usw.
Stoffwechsel	Anaerobe Leistungsfähigkeit, lokale Ermüdungsresistenz
Belastbarkeit	Akute und chronische Auswirkungen auf den Organismus
Literaturlage	Kritische Bewertung der Primärliteratur durch andere Autoren
Physiologische Grundlagen	Allgemeine Aussagen über die Physiologie des unausgereiften Organismus

Neben der Analyse aktueller nationaler und internationaler Lehrbücher war die Auswertung aller themenrelevanter Interventionsstudien Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Zur Erfassung dieser Publikationen wurde im Anschluss an die oben genannten Arbeitsschritte eine systematische Literaturrecherche durchgeführt.

4.2 Systematische Literaturrecherche

Die systematische Literaturrecherche zur Erfassung potentiell relevanter Publikationen, wurde unter anderem mit Hilfe von internetbasierten Datenbanken durchgeführt. Hierbei wurden alle Publikationen berücksichtigt, die von der Gründung der jeweiligen Datenbank bis zum August 2009 dort gelistet waren. Zu den verwendeten Datenbanken gehörten:

1. **Pubmed/ Medline:** Die vom „National Center for Biotechnology Information“ (NCBI) an der „National Library of Medicine“ (NLM) entwickelte Datenbank ist aktuell die bedeutendste und umfangreichste Datenbank im Bereich Human- und Biomedizin. Medline stellt dabei den größten Anteil der PubMed-Datenbank. Etwa 5.400 Journals aus über 80 Staaten sind in Medline gelistet (U.S.National Library of Medicine,). PubMed bietet darüber hinaus:
 - a. einen vorzeitigen Zugriff auf Artikel, die sich in Bearbeitung befinden und noch nicht in Medline gelistet sind,
 - b. Zeitschriftenartikel aus den Jahren bevor die jeweilige Zeitschrift bei Medline gelistet wurde,
 - c. ältere Medline Artikel, welche noch nicht in das aktuelle Medline-Format transformiert wurden,
 - d. Artikel aus Zeitschriften, welche nicht im Fokus von Medline befinden und somit dort nicht gelistet sind,
 - e. Artikel aus einigen zusätzlichen Life-Science-Zeitschriften, die ihre Artikel direkt an PubMedCentral® schicken,
 - f. Autor-Manuskripte von Artikeln, die von NIH-finanzierten Wissenschaftlern veröffentlicht werden und

-
- g. eine Auswahl von Büchern, welche im NCBI Bookshelf (online Sammlung biomedizinischer Bücher) verfügbar sind (U.S.National Library of Medicine,).
1. **ERIC:** Die Datenbank "Education Resources Information Center" (ERIC) beinhaltet 1,3 Millionen Einträge von Zeitschriftenartikeln, Büchern, Kongressbeiträgen usw. Zusätzlich finden sich in dieser Datenbank bildungsbezogene Materialien von unterschiedlichen Quellen (z.B. Forschungszentren oder des U.S. Department of Education) (Education Resources Information Center (ERIC),).
 2. **SportsDiscus/ SIRC:** Diese Datenbank wird herausgegeben von dem „Sport Information Resource Centre“ (SIRC) und beinhaltet eine der umfangreichsten Sammlung sportbezogener Dokumente. Insgesamt finden sich dort über 1.6 Millionen Einträge, bestehend aus Zeitschriftenartikeln, Büchern und Buchkapiteln, sowie 22.000 Dissertationen und Abschlussarbeiten (EBSCO Publishing,).
 3. **SpoWiss:** Das Datenbanksystem des Institutes für angewandte Trainingswissenschaft (IAT) Leipzig mit überwiegend aus dem ostdeutschen und osteuropäischen Bereich stammenden Dokumenten umfasst 120.000 Nachweise sportwissenschaftlicher Literatur (Institut für Angewandte Trainingswissenschaft (IAT),). Seit dem Jahr 1995 werden keine neuen Datensätze mehr erfasst.
 4. **SpoNet:** Die vom heutigen Fachbereich Information Kommunikation Sport des IAT entwickelte Datenbank SPONET wurde im Jahr 1999 gegründet. In diesem Datenbanksystem sind etwa 19.000 sportwissenschaftliche Internetseiten dokumentiert (Institut für Angewandte Trainingswissenschaft (IAT),).
 5. **BISp-Recherchesystem - SPOLIT:** Das vom Bundesinstitut für Sportwissenschaft angebotene Recherchesystem berücksichtigt neben den Datenbanken SPOFOR (Beschreibung sportwissenschaftlicher Forschungsprojekte) und SPOMEDIA (Audio-visuelle Medien im Leistungssport) die Datenbank SPOLIT, welche in der vorliegenden Arbeit verwendet wurde. Bei dieser bibliographischen Datenbank sportwissenschaftlicher Literatur finden sich über 171.000 Einträge, bestehend aus Zeitschriftenartikeln und Sammelwerksbeiträgen (Vifa:Sport,).

Angesichts der eindeutigen Dominanz englischsprachiger Quellen wurde auf eine Recherche in anderen Sprachen (Französisch, Spanisch, Italienisch) verzichtet.

Für die Suche in den oben genannten Datenbanken wurden folgende Wörter in unterschiedlichen Kombinationen als Suchbegriffe verwendet:

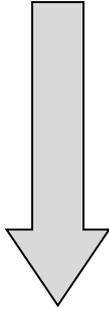
1. **National:** „Kinder“, „Jugend“, „Kraft“, „Training“, „Nachwuchs“, „Sport“, „Talent“, „Leistung“, „Entwicklung“, usw.
2. **International:** „children“, „youth“, „adolescents“, „strength“, „resistance“, „weight“, „training“, „exercise“, „sport“, „power“, „athletes“, usw.

Darüber hinaus wurden Quellenangaben aus den gesichteten Publikationen und den einschlägigen Lehrbüchern in die Recherche mit einbezogen.

Folgende Voraussetzungen galten für die Aufnahme der Studien in die Analyse der vorliegenden Arbeit: (1) Das Studiendesign musste ein Krafttraining beinhalten, (2) das Alter der Probanden musste ≤ 18 Jahre betragen und (3) die Untersuchungen mussten an gesunden Probanden durchgeführt worden sein.

Insgesamt 69 Studien erfüllten diese Kriterien und wurden hinsichtlich ihres Studiendesigns und der angegebenen Studienergebnisse analysiert. Die hier gefundenen Daten wurden anschließend mit den auf Lehrbuchebeine vertretenen Meinungen verglichen und ausgewertet. Besonderes Augenmerk lag dabei auf dem Vergleich der nationalen und internationalen Literaturlage.

Tab. 2: Stufen der Literaturrecherche.

	Stufe	Probandengut	Trainingsreiz
	A	Kinder	Krafttraining
	B	Kinder	Training
	C	Erwachsene	Krafttraining
	D	Erwachsene	Training

In Teilbereichen, in denen unter Anwendung der beiden zuvor genannten Einschlusskriterien eine unzureichende/ lückenhafte Datenlage vorherrschte (Stufe A, siehe Tab. 2), wurde auf Informationen aus anderen Belastungsformen (Stufe B)

zurückgegriffen, in denen der jeweilige Zusammenhang, bezogen auf den Nachwuchssport, bereits untersucht wurde. Ziel dieses Vorgehens war es, die Relevanz einzelner Parameter für ein Krafttraining im Nachwuchstraining abschätzen zu können. Waren unter dieser Prämisse ebenfalls keine Informationen verfügbar, wurde die Literaturrecherche auf Studienergebnisse aus dem Erwachsenentraining (Stufe C und D) erweitert. Auch wenn durch diesen Schritt aus wissenschaftlicher Sicht kein Rückschluss auf die bio-physiologischen Anpassungsprozesse von Kindern und Jugendlichen gezogen werden darf, so können bei Veränderungen im Erwachsenenalter zumindest Reaktionen im unausgereiften Organismus vermutet werden.

5 Reifeeinteilung

Unter dem Nachwuchstraining werden Trainingsinterventionen in denjenigen Altersstufen verstanden, die die langfristigen sportartspezifischen Vorbereitungen auf das Hochleistungstraining darstellen (Röthig, 2003). Da der Einstieg in das Grundlagentraining, als erste Stufe des sportartspezifischen Nachwuchstrainings (Röthig, 2003), aus eigenem Antrieb, auf Anregung der Eltern, des Übungsleiters/Trainers oder Sportlehrers erfolgt und der Übergang zum Hochleistungstraining in einigen Sportarten erst im achtzehnten Lebensjahr geschieht (Deutscher Olympischer Sportbund Bereich Leistungssport, 08), umfasst der Nachwuchsleistungssport viele verschiedene Entwicklungsstufen. Dies gilt insbesondere für die Sportarten, in denen sehr früh mit einem leistungsorientierten Training begonnen wird (z. B. Turnen, Schwimmen). Weil aber gerade das kindlich/jugendliche Wachstum mit einer Vielzahl an Veränderungen im menschlichen Organismus einhergeht, treffen Trainingsreize besonders in dieser Lebensphase auf sehr unterschiedliche Anpassungsvoraussetzungen. Um einen Quervergleich von Ergebnissen unterschiedlicher Studien zu ermöglichen, ist es daher unbedingt notwendig, die Zielgruppe „Nachwuchs“ weiter zu untergliedern.

Eine Möglichkeit ist die Aufteilung nach dem chronologischen Alter, wie sie in Schulen, aber auch häufig in Vereinen angewandt wird. Diese Einteilung ist zwar sehr leicht durchzuführen und daher in der Praxis sehr beliebt, berücksichtigt aber nicht die individuellen Unterschiede in der Reifeentwicklung. So zeigen retardierte und akzelerierte Kinder bei gleichem chronologischem Alter völlig unterschiedliche Entwicklungsphasen, was sich absolut gesehen in unterschiedlichen Kraftzuwächsen äußern wird. Hinweise auf ethnische Unterschiede in der Reifeentwicklung (Wu et al., 2002) unterstreichen die Wichtigkeit einer genaueren Differenzierung.

Um den während der Entwicklung stattfindenden Veränderungen Rechnung zu tragen, ist aus wissenschaftlicher Sicht also eine genauere Einteilung notwendig.

Je feiner das dabei gewählte Raster, desto eher ist es möglich zwischen Effekten der Reifung und trainingsabhängigen Anpassungsprozessen zu unterscheiden und diese miteinander zu vergleichen. Auch wenn es in der Trainingspraxis meist nicht möglich ist, eine derartige Einteilung vorzunehmen, so sollte dieser Arbeitsschritt zumindest Teil einer jeden Interventionsstudie sein. Die Gliederung in präpubertäre, pubertäre und postpubertäre Kinder beziehungsweise Jugendliche ist in diesem Zusammenhang einer Einteilung nach dem chronologischen Alter sicherlich überlegen. Aber auch diese dreistufige Gliederung ist nicht sensitiv genug, um die individuellen Unterschiede bezüglich der Reifeentwicklung wiederzugeben (Malina et al., 2004).

Wählt man hingegen die Ausprägung von sekundären Geschlechtsmerkmalen, die Veränderungen des Hormonhaushaltes oder die Skelettreife als Parameter zur Erfassung des Reifestatus, so bieten diese die Möglichkeit einer deutlich feineren Gliederung. Unter diesen ist die Skelettreife vermutlich als bester Indikator zu bewerten, da hier mit dem pränatalen kartilaginären Skelett und dem verknöcherten reifen Skelett im jungen Erwachsenenalter definierte Start- und Endpunkte vorliegen, welche das komplette Wachstum mit einschließen (Baxter-Jones und Sherar, 2007). Die uneinheitliche intraindividuelle Umwandlungsgeschwindigkeit vom Knorpelgerüst zum adulten Knochen sollte dabei berücksichtigt werden. Neben praktischen Gesichtspunkten wird aufgrund dieser Variabilität traditionellerweise die linke Hand geröntgt, da diese eine angemessen repräsentative Beurteilung des Gesamtskeletts erlaubt (Malina et al., 2004). Für die anschließende Auswertung der Röntgenbilder werden die abgebildeten Knochenstrukturen nach Greulich und Pyle (Greulich und Pyle, 1959) mit Referenzaufnahmen verglichen und dann einem bestimmten Skeletalter zugeordnet. Von dieser sogenannten Atlasmethode unterscheidet man das knochenspezifische Punkte System „bone specific scoring“ von Tanner und Whitehouse (Tanner et al., 1983), bei dem jedem Entwicklungsstadium der Epiphysenkerne jeweils ein Punktwert zugeordnet wird. Als negativ zu bewerten ist bei der Methode der Skelettreifeerfassung die Strahlenbelastung der Kinder. Auch wenn diese aufgrund der geringen Masse der Hand als ungefährlich einzustufen ist, sollte es doch das Bestreben sein, die Röntgenbestrahlung so gering wie möglich zu halten. Eine Arbeit von Pludowski et al. konnte in diesem Zusammenhang zeigen, dass auch die weniger invasive Methode mithilfe der Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA) vergleichbare Werte liefert ($r = 0,998$; $p < 0,0001$) (Pludowski et al., 2004).

Die Untersuchung der sekundären Geschlechtsmerkmale nach Tanner (Tanner, 1962) bietet ebenfalls die Möglichkeit einer vergleichsweise präzisen Gliederung der Maturität. Je nach Entwicklungsstand der weiblichen Brust, der Schambehaarung und der Genitalien werden die Kinder und Jugendlichen in fünf verschiedene Stadien eingeteilt. „Tanner Stadium eins“ entspricht hier der präpubertären Phase,

während „Tanner fünf“, bezogen auf die erwähnten Merkmale, dem erwachsenen Erscheinungsbild entspricht. Der Nachteil dieser Methode liegt vor allem in der potentiellen Verletzung der Intimsphäre der Athleten. Wie einige aktuelle Studien jedoch zeigen konnten, weichen die von den Kindern selbst erhobenen Tannerstadien nur wenig von denen der ärztlichen Untersuchung ab (Chan et al., 2008; Leone und Comtois, 2007; Wacharasindhu et al., 2002), so dass die anamnestiche Erhebung der Reifekriterien eine mögliche Alternative darstellt. Einschränkend muss allerdings erwähnt werden, dass Kinder und Jugendliche dazu tendieren, frühe Veränderungen der sexuellen Geschlechtsmerkmale über zu bewerten während sie spätere eher unterbewerten (Schlossberger et al., 1992).

Ein anderes Problem findet sich in der Genauigkeit der Dokumentation von Reifegraden wieder. Beispielsweise sprechen einige Autoren nur allgemein von „Tanner-Stadien“, ohne weitere Spezifikationen der untersuchten Indikatoren anzuführen. Weil aber diese Stadien geschlechts- und indikatorspezifisch sind, bleibt daher eine unpräzise Formulierung ohne praktischen Nutzen (Malina, 2006). Beachtet man darüber hinaus, dass es sich beim „Tanner-Staging“ um ein rein visuelles Untersuchungsverfahren ohne die Anwendung von Mess- oder Palpationstechniken handelt, wird deutlich, dass durch diese Subjektivität weitere Ungenauigkeiten zu erwarten sind (Herman-Giddens et al., 2001). Nicht zuletzt das grobe Raster eines fünfstufigen Modells lässt die Unterlegenheit zum zuvor Beschriebenen fast stufenlosen Verfahren erkennen.

Die oben angesprochene Analyse der Hormonspiegel kann ebenfalls für die Erfassung des Reifestatus herangezogen werden. Hierfür eignen sich diejenigen Hormone, welche sich hinsichtlich ihres Sekretionsmusters im Zuge der Entwicklung verändern. Dazu zählen besonders gonadotrope Hormone (LH und FSH³) und die Sexualhormone Testosteron und Östrogen. Aufgrund des pulsatilen Ausstoßes dieser Hormone und den damit verbundenen Schwankungen der Serumkonzentrationen, gestaltet sich die Bestimmung schwierig. Weiterhin gilt zu beachten, dass nicht die Hormonkonzentration alleine, sondern auch Variationen auf Rezeptorebene die biologische Antwort und damit deren Bedeutung für die Reifeentwicklung beeinflussen (Malina und Beunen, 2008).

Wie aus Abb. 1 hervorgeht, wurde in vielen Untersuchungen (55 %) gänzlich auf eine Reifeeinteilung verzichtet, so dass ein Vergleich von Studienergebnissen nur sehr eingeschränkt möglich ist (Falk und Tenenbaum, 1996). Andere Studien beschränkten sich auf weniger präzise Einteilungstechniken, wie das deskriptive Verfahren von Tanner, oder die Menstruationsanamnese bei Mädchen. Demgegenüber kamen in nur drei beziehungsweise einem Prozent aller Fälle mit der Mes-

³ LH= Luteinisierendes Hormon; FSH= Follikel-stimulierendes Hormon.

sung von Hormonspiegeln und der Bestimmung der Skelettreife sensitive Einteilungsverfahren zur Anwendung.

Hieraus resultiert, dass ein Großteil der bislang erhobenen Daten aus Krafttrainingsstudien mit Kindern und Jugendlichen nur schwer interpretierbar sind. Durch die sich ständig ändernde Physiologie im Rahmen des Entwicklungsprozesses bedarf es einer genauen Beschreibung des jeweiligen Entwicklungsstatus zum Zeitpunkt der Untersuchung. So ist in der überwiegenden Zahl der durchgeführten Untersuchungen unklar, auf welche körperlichen Voraussetzungen die einzelnen Trainingsstimuli gewirkt haben.

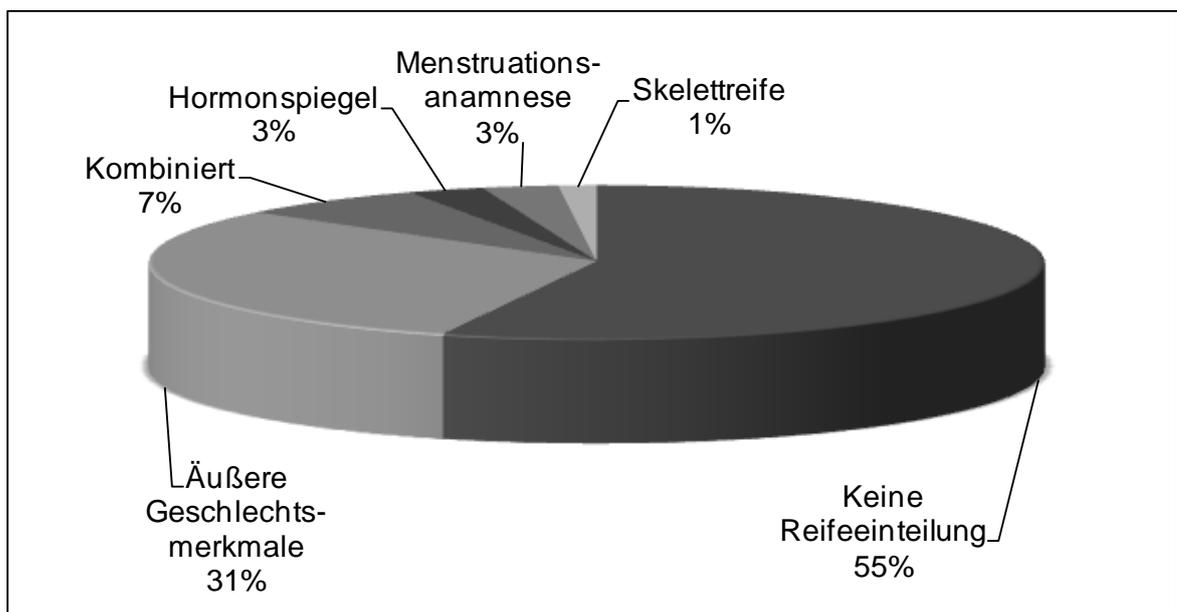


Abb. 1: Prozentuale Verteilung der angewandten Verfahren zur Reifeinteilung in den Krafttrainingsstudien.

6 Entwicklung der Muskelkraft

Interpretationen krafttrainingsassoziiierter Adaptationsprozesse im Kindes- und Jugendalter setzen die Kenntnis physiologischer Veränderungen im Rahmen der ontogenetischen Entwicklung voraus. Zu erklären ist diese Bedingung durch den synergistischen Charakter krafttrainingsunabhängiger, reifebedingter Entwicklungsprozesse mit trainingsbedingten Veränderungen. Diese Überschneidung reife- und krafttrainingsabhängiger Effekte stellt gleichsam die Erklärung für die Unabdingbarkeit einer Kontrollgruppe in Interventionsstudien in diesem Forschungsbereich dar, worauf an anderer Stelle in der vorliegenden Arbeit näher eingegangen werden soll (siehe Kapitel 11).

Analysiert man die Studien zur Entwicklung der Muskelkraft im Kindes- und Jugendalter, so findet sich oftmals für verschiedene Muskelgruppen ein ganz ähnliches Muster (*Hettinger, 1958; Round et al., 1999*). Die in frühen Studien meist mittels isometrischen Krafttests erhobenen Werte zeigen dabei in der Lebensspanne vor der Pubertät für beide Geschlechter einen nahezu linearen Anstieg (siehe *Abb. 2*). Während sich dieser Verlauf für die Mädchen offenbar auch intrapubertär fortsetzt, zeigen die Jungen in dieser Phase der Entwicklung einen deutlichen Schub in ihrer Kraftleistungsfähigkeit (*Parker et al., 1990*).

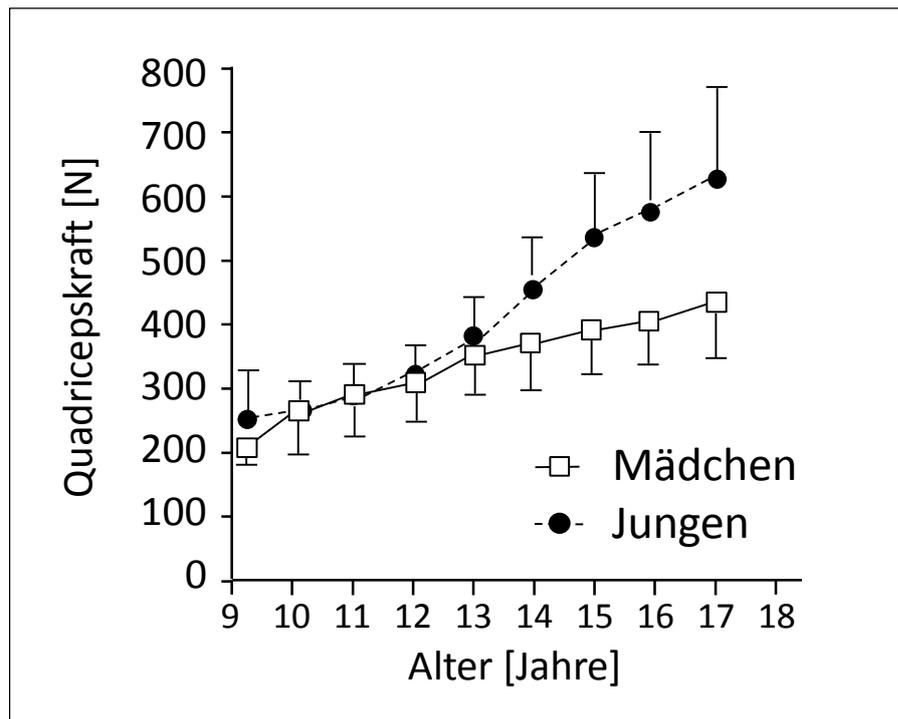


Abb. 2: Geschlechtsspezifische Veränderungen der isometrischen Kraft des *M. quadriceps femoris* mit zunehmendem Alter. Ergebnisse einer longitudinalen Studie mit 50 Mädchen und 50 Jungen. Abbildung nach (Round et al., 1999).

Zu hinterfragen ist sicherlich, ob das mit Hilfe isometrischer Kraftmessungen generierte Bild den Verlauf der physiologischen Muskelkraftentwicklung adäquat und in seiner vollen Breitewiedergibt. Während einige Autoren zum Ausdruck bringen, dass mit Hilfe isometrischer und dynamischer Kraftmessungen dieselben relativen Kraftverhältnisse zwischen verschiedenen Individuen dargestellt werden (Froberg und Lammert, 1996), fordern andere die besondere Berücksichtigung dynamischer Anteile (De Ste Croix, 2007). Letztere begründen ihre Forderung mit der deutlicheren Nähe dynamischer Bewegungen zu den typischen muskulären Anforderungen im Alltag. Untersuchungen, welche diesen Anforderungen in Form isokinetischer Kraftmessungen genügen, fanden jedoch in der Regel vergleichbare Verläufe der Muskelkraftentwicklung (De Ste Croix, 2007; Holm et al., 2005; Kanehisa et al., 1995; Sunnegardh et al., 1988). In vereinzelt Untersuchungen konnte der typische geschlechtsdifferente Verlauf jedoch nicht bestätigt werden. So zeigte sich in einer longitudinal angelegten Untersuchung von De Ste Croix kein signifikanter Unterschied der isokinetisch gemessenen Beinkraftwerte (Beinstrecker bzw. Beinbeuger) zwischen Jungen und Mädchen (De Ste Croix et al., 2002). Vor dem Hintergrund des vierjährigen Betrachtungszeitraums und einem mittleren Probandenalter von zehn Jahren ($\pm 0,3$) zu Beginn der Studie, ließe sich spekulieren, dass vornehmlich präpubertäre Individuen getestet wurden, deren Kraftwerte sich er-

wartungsgemäß nicht unterscheiden (Wood et al., 2006). Der Reifegrad wurde in der genannten Studie jedoch mit berücksichtigt und hatte nach Angaben der Autoren keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse, sodass der Grund für die Abweichung von anderen Erhebungen letztlich unklar bleibt.

Zwar zeigen oben genannte Studien zur Muskelkraftentwicklung oft eine enge Korrelation zwischen Kraft und chronologischem Lebensalter, jedoch ist dieser Zusammenhang eher das Resultat der reifebedingten Veränderungen, als das des zunehmenden Alters an sich (De Ste Croix, 2007). Die Entwicklung der Muskelkraft lässt sich im Wesentlichen als Funktion struktureller und funktioneller reifebedingter Wandlungen beschreiben, die sowohl die Muskulatur selbst, als auch das steuernde Nervensystem betreffen. Darüber hinaus sind insbesondere hormonelle Einflüsse zu berücksichtigen, die eng mit den strukturellen Veränderungen der Muskulatur verzahnt sind.

Bevor jedoch auf die genannten Faktoren näher eingegangen wird, sollen zunächst wachstumsallometrische Besonderheiten aufgezeigt werden, die es bei der Beschreibung der Muskelkraftentwicklung und der Interpretation krafttrainingsinduzierter Effekte zu berücksichtigen gilt.

6.1 Allometrie

In den ersten beiden Lebensdekaden erfährt der menschliche Organismus einen raschen Entwicklungsprozess, der nicht zuletzt maßgeblich durch eine ausgeprägte Veränderung der Körperproportionen geprägt ist (siehe *Abb. 3* und *Abb. 4*). Alleine im Zeitraum zwischen dem achten und sechzehnten Lebensjahr, nimmt die Körpergröße bei Jungen im Mittel um 40% und bei Mädchen um etwa 30% zu, während die Körpermasse bei Jungen um 160% und bei Mädchen um 125% ansteigt (Baxter-Jones und Sherar, 2007). Da sich mit zunehmender Körpergröße und -masse auch Verbesserungen in vielen Leistungskenngrößen einstellen, müssen diese Veränderungen der Körperdimensionen bei der Interpretation von Krafttrainingseffekten berücksichtigt werden. Letztlich muss es das Ziel sein, eine größenunabhängige Variable zu erzeugen (De Ste Croix, 2007), um zuvor genannten Interpretationen zu ermöglichen.

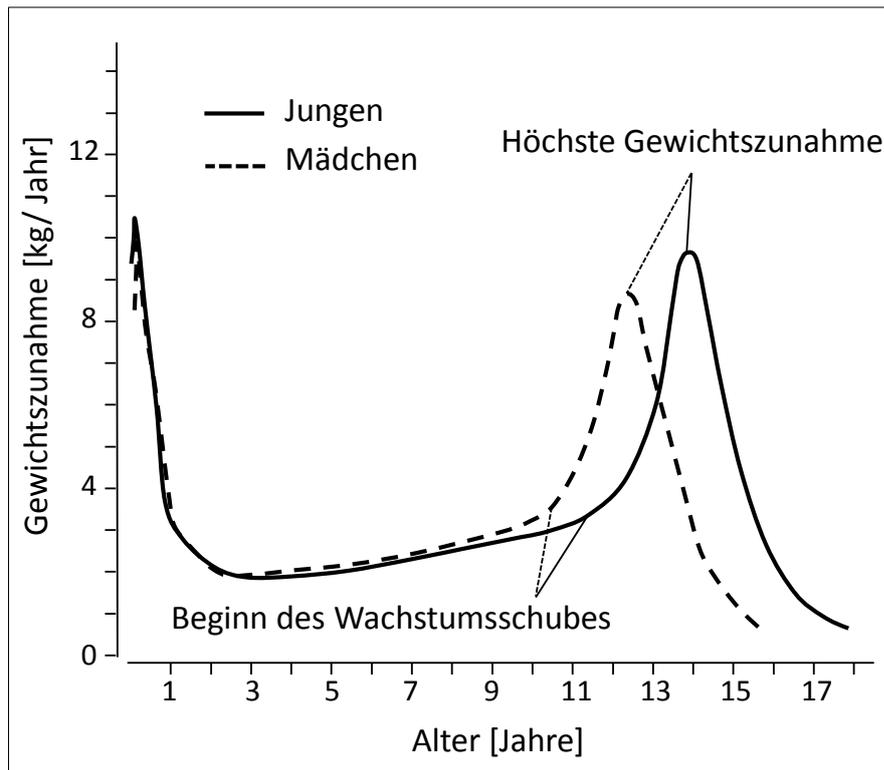


Abb. 3: Typische Körpergewichtszunahme von Jungen und Mädchen in den ersten beiden Lebensdekaden. Abbildung modifiziert nach (Tanner et al., 1966).

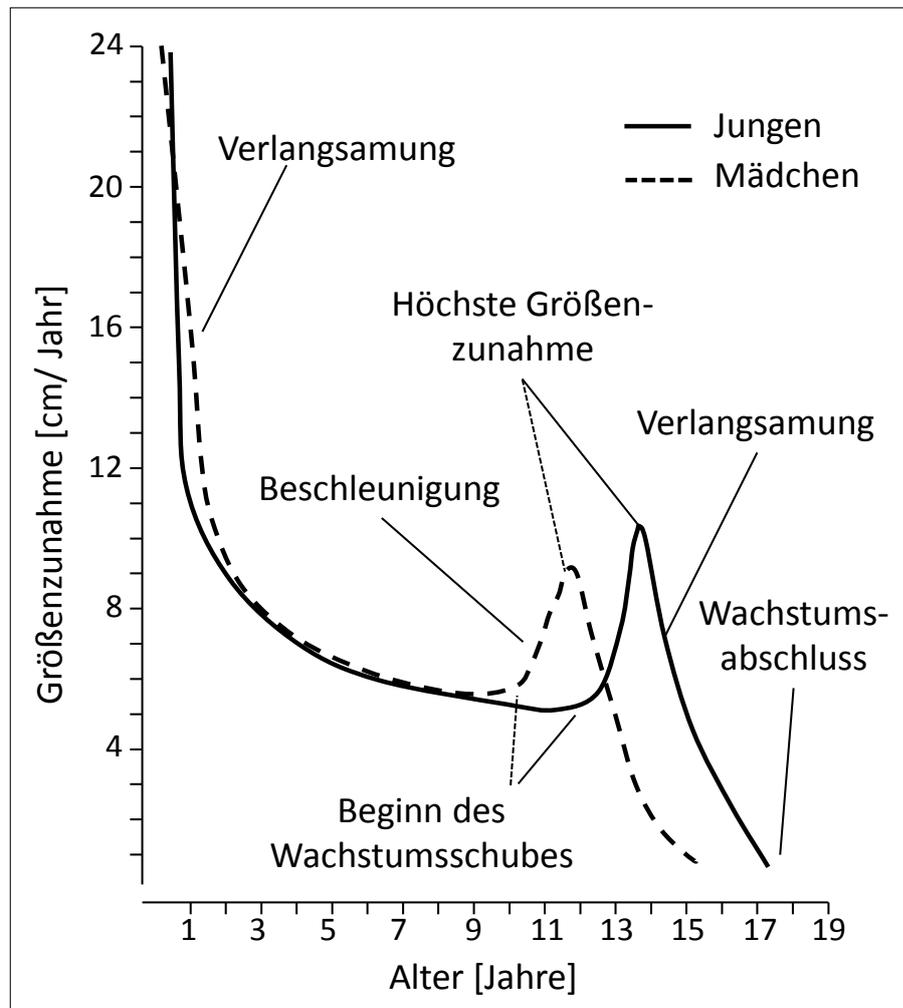


Abb. 4: Typische Wachstumsgeschwindigkeit (Körpergröße) von Jungen und Mädchen in den ersten beiden Lebensdekaden. Abbildung modifiziert nach (Tanner et al., 1966).

Die in der Trainingswissenschaft erhobenen physiologischen Variablen werden dafür klassischer Weise auf das Körpergewicht bezogen. So sind Angaben der maximalen Sauerstoffaufnahme als $VO_2\text{max}$ pro kg Körpergewicht ebenso üblich wie die Greifkraft pro kg Körpergewicht (Rowland, 2005). Bei diesem Vorgehen wird jedoch vernachlässigt, dass die meisten physiologischen Parameter in keinem linear proportionalen Verhältnis zur Körpermasse stehen. Eine Massennormierung dieser Parameter mittels einfacher Division durch das Körpergewicht vermag daher den Einfluss des Körpergewichtes zu minimieren, nicht jedoch gänzlich zu eliminieren. So führt beispielsweise die Normierung der $VO_2\text{max}$ auf das Körpergewicht nach oben genanntem Vorgehen dazu, dass die Werte für leichte Kinder im Mittel höher liegen als für schwere Kinder (Rowland, 2005). Um eine von Körperdimensionen unabhängige Variable zu erzeugen, bedarf es demnach der Findung von geeigneteren Normierungsfaktoren.

Auch der Vergleich isokinetisch gemessener Kräfte des Beinstreckers zwischen prä-, intra- und postpubertären Individuen zeigt, dass mit zunehmendem Alter bei beiden Geschlechtern ein Anstieg der Muskelkraft zu verzeichnen ist, der selbst bei Normierung auf das Körpergewicht bestehen bleibt (Ramos et al., 1998). Letzteres ist insofern hervorzuheben, da mit der Reifeentwicklung in der Regel eine Zunahme des Körperfettanteils und damit ein Rückgang des Muskelanteils zu beobachten ist (Ballabriga, 2000). Folglich stellt sich die Frage, welche Mechanismen für die höheren postpubertären massennormierten Kraftwerte verantwortlich sind. Da sich der Kraftanstieg insbesondere bei Jungen nicht alleine durch Veränderungen der Körpermasse erklären lässt, gehen einige Autoren davon aus, dass es sich um direkte, an der Muskulatur entfaltende Effekte von Testosteron handeln könnte (Parker et al., 1990).

Mit den Beziehungen zwischen Körperdimensionen und deren Verhältnis zu verschiedenen biologischen Variablen beschäftigt sich die Allometrie. Die ontogenetische (wachstumsbedingte) Allometrie beschreibt dabei das mathematische Verhältnis unterschiedlicher Körperbereiche unter Berücksichtigung ihrer asynchronen Wachstumsgeschwindigkeit. Sie dient der näherungsweise Bestimmung einer physiologischen Kenngröße durch eine bereits bekannte Variable. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Wachstumsgeschwindigkeiten als zentrales Merkmal, grenzt die Allometrie dabei von der Isometrie ab.

Erstmalig beschrieben wurde das relative Wachstum von Frédéric Cuvier (1773 - 1823), der erkannte, dass die relative Gehirngröße eng verwandter Säugetiere mit zunehmender Körpergröße abnimmt (Gayon, 2000). Es sollte jedoch über 50 Jahre dauern, bis der niederländische Naturforscher Eugène Dubois 1897 eine Formel für derartige Zusammenhänge entwickelte (Dubois, 1897):

$$e = c * s^r$$

In dieser Formel beschreibt er das Gewicht des Gehirns "e" (für Encephalon) als das Produkt aus dem Koeffizient der Cephalisierung "c" und dem Körpergewicht "s" (für soma), mit dem zugehörigen Exponenten "r". Letzterer konnte dabei aus Vergleichen zwischen unterschiedlichen Spezies abgeleitet werden und beschreibt die Richtung und das Ausmaß des Zusammenhangs zwischen Veränderungen von Gehirn- und Körpergewicht. Die "Cephalisierung" hingegen spiegelt dabei nach Frédéric Cuvier die Position einer gegebenen Spezies auf der „Leiter“ des evolutionären Fortschrittes wieder. Diese Variable zeigt die tatsächliche Höhe des Zusammenhanges zwischen den gesuchten Parametern an.

Die heute gebräuchliche Formel für allometrische Analysen unterscheidet sich nur unwesentlich von der 1897 veröffentlichten Gleichung. Auch wenn diese oftmals dem Wissenschaftler Huxley (Huxley, 1924) zugeschrieben wird, gehen aktuelle Literaturanalysen davon aus, dass Huxley durch oben genannte Forscher maßgeblich beeinflusst wurde (Gayon, 2000). Huxleys Formel lautet:

$$y = a * X^b$$

"Y" steht in diesem Fall für eine beliebige Variable, die in ein Verhältnis zu "X" (meist die Körpermasse, daher auch oft als "M" bezeichnet) gesetzt wird und der Buchstabe "a" für den Proportionalitätskoeffizienten. Der Normierungsfaktor "b" im Exponent von "X" ist das Äquivalent zu dem zuvor genannten "r" aus der Formel von Dubois. Im Kontext des physiologischen Muskelwachstums stellt sich jedoch die Frage, wie Normalisierungsfaktoren generiert werden können, die das Größe-zu-Kraftverhältnis richtig abbilden. Rowland beantwortet diese Frage im Kapitel "Muscle Strength" seines Buches "Children's Exercise Physiology" unter anderem mit den Erkenntnissen von Jaric, der den jeweiligen Exponenten aus der dimensionsanalytischen Theorie ableitete (Rowland, 2005). Jaric kommt dabei zu dem Ergebnis, dass sich die Muskelkraft proportional zum Quadrat der Körperhöhe (H²) bzw. zum Körpergewicht als M^{0,67} (bzw. M^{2/3}) verhält (Jaric, 2002). Empirische Daten weisen jedoch darauf hin, dass die Werte für die genannten Normierungsfaktoren zum Teil etwas höher liegen, als die theoretischen Werte von Jaric (Rowland, 2005).

Während mit den von Jaric, bzw. mit den empirisch nach oben korrigierten Normierungsfaktoren bereits eine weitgehend von Körpergröße oder Körpergewicht unabhängige Variable erzeugt werden kann, bleibt dennoch zu hinterfragen, ob es sich bei den beiden genannten Parametern um geeignete Normierungsvariablen handelt. Letztlich wird über beide Werte die vorhandene Muskelmasse abgeschätzt, ohne dabei die individuelle Körperzusammensetzung berücksichtigen zu können. Normiert wird auf ein Konglomerat aus aktiver, kontraktile Masse und passiver, nicht an der Kontraktion beteiligten Geweben. Interindividuelle Unterschiede im Körperfettanteil, wie sie typischerweise durch die geschlechtsspezifische Entwicklung in der Pubertät zwischen Jungen und Mädchen zu beobachten sind, werden damit beispielsweise ignoriert und verzerren das Ergebnis einer vergleichenden Interpretation.

De Ste Croix kommt in diesem Zusammenhang zu dem Schluss:

“Although simple body dimensions appear to be important in the development of strength with age only 40 - 70 % of the variance in strength scores of 5 to 17 y-old

children could be accounted for by age, sex, stature and body mass leaving a large portion of the variance unexplained.” (De Ste Croix, 2007).

Auch Wood et al., welche die Kraft der Ellbogenflexoren und -extensoren von Kindern untersucht haben und diese auf die Körper- oder Muskelgröße der Kinder normierten, folgerten aus ihren Ergebnissen:

“Use of only linear dimensions rather than muscle CSA to account for differences in size may have clouded our understanding of strength development in children.” (Wood et al., 2004).

Folglich stellt sich die Frage, ob sich muskelgrößenbezogene Variablen, wie die Muskelmasse, -querschnittsfläche oder das Muskelvolumen besser als Normierungsfaktoren eignen als die bislang angeführten physiologischen Kenngrößen. In diesem Zusammenhang soll im Folgenden zunächst das physiologische Muskelwachstum als strukturelle Einflussgröße der Muskelkraftentwicklung dargestellt und im Anschluss daran die Eignung als Normierungsfaktor geprüft werden.

6.2 Muskelwachstum

6.2.1 Messung der Muskelmasse

Voraussetzung für eine valide Aussage über das physiologische Muskelwachstum im Kindes- und Jugendalter ist der Einsatz möglichst präziser Messmethoden zur Erfassung reifeassoziierten Strukturänderungen sowohl auf mikro- als auch auf makroskopischer Ebene. Erst ein genaues Bild der physiologischen Muskelmassezunahme im Zuge der Entwicklung wird es uns ermöglichen pathologische oder aber krafttrainingsinduzierte Abweichungen zu erkennen. So sind negative Befunde in Bezug auf krafttrainingsbedingte Strukturveränderungen der Muskulatur vermutlich Weise nicht selten auf die Verwendung inadäquater Messmethoden zurückzuführen (siehe Kapitel 7.3). Jedoch sind einige Verfahren, welche in der Myologie bei erwachsenen Probanden zum Einsatz kommen, vor dem Hintergrund ethischer Aspekte bei Kindern und Jugendlichen kritisch zu bewerten. So sind schmerzhaft Verfahren ebenso ungeeignet, wie Messungen mit potentiellen negativen Langzeiteffekten. Dazu gehören u.a. die Muskelbiopsie oder bildgebende Verfahren mit hoher Strahlenbelastung (Nativ-Röntgen, CT). Ein Überblick über die gängigen Verfahren zur Messung bzw. Abschätzung der Muskelmasse von Kindern und Jugendlichen findet sich u.a. bei Malina (Malina et al., 2004).

Als Goldstandard für die Erfassung der Körperzusammensetzung gelten die Magnetresonanztomographie (MRT) und die Dual-Energy X-ray Absorptiometry

(DEXA). Beide Verfahren ermöglichen neben einer genauen Messung der Gesamtmuskelmasse des Körpers eine spezifische Analyse einzelner Körperpartien. Während sich die MRT Untersuchung dabei das Signal elektromagnetisch angeregter Moleküle zu Nutze macht, basiert die DEXA-Messung auf der Verwendung von zwei energetisch leicht unterschiedlichen Röntgenquellen, wodurch Rückschlüsse auf die jeweilige Gewebedichte und damit auf die Gewebeart ermöglicht werden. Die Strahlenbelastung für den unreifen Organismus ist bei den genannten DEXA-Untersuchungen als sehr gering einzustufen (Binkovitz und Henwood, 2007; Blake et al., 2006; Thomas et al., 2005) und entspricht in etwa der natürlichen Strahlenbelastung von fünf Tagen unter Alltagsbedingungen (Webber, 1995). Um die Strahlendosis insbesondere für den Rumpf noch weiter zu senken, werden die Messungen in der Regel ausschließlich im Bereich der Extremitäten durchgeführt. Über die so gemessene appendiculäre⁴ mageren Körpermasse (ALST = Appendicular Lean Soft Tissue; siehe Abb. 5) lässt sich rechnerisch die Höhe der Gesamtmuskelmasse (Skelettale Muskelmasse = SMM) abschätzen.

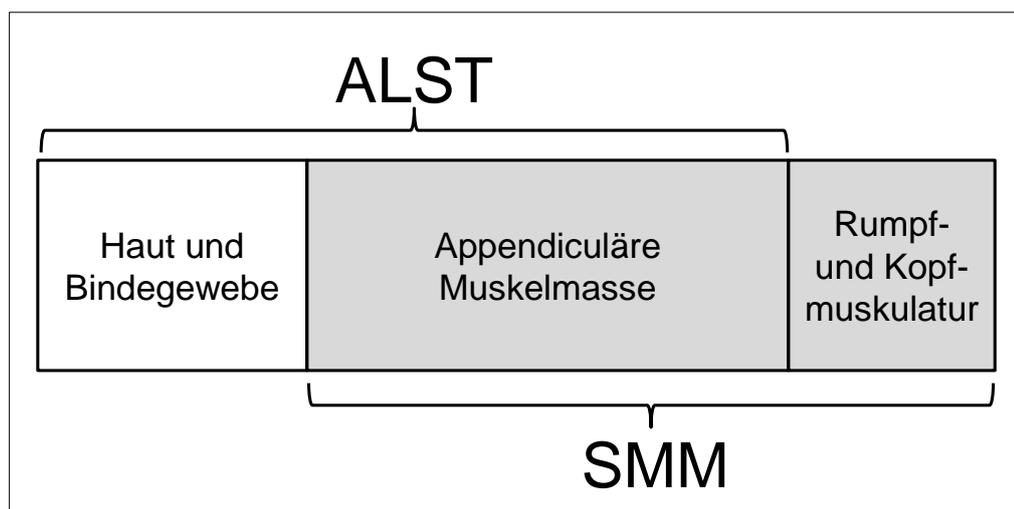


Abb. 5: Verhältnis zwischen appendiculärer magerer Körpermasse (ALST = Appendicular Lean Soft Tissue) und der gesamten Skelettmuskelmasse (SMM = Skelettale Muskelmasse). ALST ist die Summe der mageren Körpermasse beider Arme und Beine. Abbildung nach (Kim et al., 2002).

Wie Kim et al. 2006 jedoch zeigen konnten, lässt sich die für Erwachsene erstellte Formel dabei nicht auf Kinder und Jugendliche übertragen (Kim et al., 2006):

$$SMM \text{ (kg)} = 1,19 \times ALST \text{ (kg)} - 1,65$$

⁴ Appendiculäre ist ein aus dem englischen Sprachraum entliehener Begriff, für den es in der deutschsprachigen Literatur keine exakte Entsprechung gibt.

Zwar fand die Arbeitsgruppe eine hochsignifikante Korrelation zwischen den berechneten und den via MRT gemessenen Werten ($r = 0,99$; $p < 0,001$), jedoch überschätzte die oben genannte Formel die tatsächliche SMM von Kindern und Jugendlichen um $0,2 \pm 0,9$ kg. Subgruppenanalysen konnten zeigen, dass dieser Fehler besonders prä- und intrapupertäre Kinder betraf (Tanner I – IV), wohingegen die SMM postpubertärer Jugendlicher mit oben genannter Formel adäquat abgeschätzt werden konnte. Die daraufhin von Kim et al. für prä- und intrapubertäre Kinder vorgeschlagene Formel lautet (Kim et al., 2006):

$$SMM \text{ (kg)} = 1,115 \times ALST \text{ (kg)} - 1,135$$

Mit dieser Formel konnten 98,2 % der Varianz von der im MRT gemessenen SMM aufgeklärt werden. Unter Berücksichtigung des Körpergewichtes und der Körpergröße konnte der Anteil der aufgeklärten Varianz noch um weitere 0,4 % gesteigert werden. Der Grund für die Bestrebungen, sich in dieser Form rechnerisch der tatsächlichen Skelettmuskelmasse zu nähern, statt auf das präzisere Messverfahren der Magnetresonanztomographie zurückzugreifen, liegt in den noch immer sehr hohen Kosten der MRT-Diagnostik und der unterschiedlichen Verfügbarkeit der beiden Methoden (Kim et al., 2002). Ein Vorteil der Magnetresonanztomographie im Vergleich zu der dualen Röntgenabsorptiometrie besteht neben einer höheren Präzision für die Erfassung der Gesamtmuskelmasse, in der Möglichkeit Muskelquerschnittsflächen einzelner Muskeln genau abbilden und messen zu können. Da beide Verfahren eine vergleichbar valide und hoch reproduzierbare Bestimmung der Muskelmasse ermöglichen, deren Variationskoeffizient für wiederholte Messungen bei $< 2\%$ liegt, kann die Erfassung der Gesamtmuskelmasse via DEXA-Messung für viele Fragestellungen als geeignete und kostengünstigere Alternative zum MRT angesehen werden (Malina et al., 2004).

Ergänzt werden diese beiden Methoden durch die sogenannte quantitative Magnetresonanztomographie (QMR). Dieses neue Verfahren, welches seit wenigen Jahren in Tiermodellen zur Anwendung kommt, ist verglichen mit der herkömmlichen MRT-Diagnostik wesentlich schneller in der Durchführung. So dauert ein Ganzkörperscan zur Erfassung der Körperzusammensetzung etwas weniger als drei Minuten (Lee und Gallagher, 2008). Die bislang einzige Studie, welche die Validität des genannten Verfahrens bei Messungen am Menschen mit dem klassischen 4C-Modell⁵ verglichen hat, kam zu dem Ergebnis, dass die gemessenen Werte für die magere Körpermasse (LBM) zu hoch lagen (Napolitano et al., 2008).

⁵ Berechnet nach der Formel von Fuller et al. (Fuller et al., 1992): Fat mass = $2.747 \times BV - 0.71 \times TBW + 1.46 \times BMC - 2.05 \times BM$, wobei BV das Körpervolumen (l), BM die Körpermasse (kg) TBW das Gesamtkörperwasser (kg), BMC der Mineralgehalt der Knochen (kg) (Napolitano et al., 2008).

Simulierte Veränderungen der Körperzusammensetzung, mit Hilfe von wasser- und ölgefüllten Kanistern, wurden durch die QMR hingegen sehr präzise erfasst. Untersuchungen an Kindern und Jugendlichen liegen jedoch bislang nicht vor.

Weitere präzise Einblicke in das physiologische Muskelwachstum können auch mit Hilfe von Kadaverstudien gewonnen werden (Clarys et al., 1984; Doupe et al., 1997; Martin et al., 1990). Während dabei in frühen Dissektionsstudien die einzelnen Gewebeanteile freipräpariert und anschließend gewogen bzw. chemisch analysiert wurden (Clarys et al., 1984; FORBES et al., 1953; MITCHELL et al., 1945; Moore et al., 1968; Widdowson et al., 1951), kommen in aktuellen Kadaverstudien computergestützte Bildanalyse-Programme zur Anwendung. So verglichen Mitsiopoulos et al. MRT-Schnittbilder mit Photographien der entsprechenden Gewebequerschnitte unter Verwendung der gleichen Bildanalyse Software (Mitsiopoulos et al., 1998). Um zu gewährleisten, dass MRT-Schnittbild und Gewebefotographie die gleichen Ebenen darstellten, wurden die untersuchten Extremitäten mit speziellen Markern versehen (Erdnussölkapseln). Diese im MRT sichtbaren Marker dienten dann im Anschluss auch bei der Zerteilung der Gliedmaßen mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitsbandsäge als Orientierungspunkte. Die genannte Arbeitsgruppe konnte so zeigen, dass die Ergebnisse der Kadaveranalyse hochsignifikant mit den MRT-Ergebnissen korreliert ($r = 0,99$; $p < 0,001$). Hervorzuheben ist, dass die genannte Methode neben der Untersuchung der Gesamtmuskelmasse und der Messung von Muskelquerschnittsflächen auch eine histologisch-mikroskopische Vermessung einzelner Muskelfasern ermöglicht.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die vorhandene Muskelmasse über die Kreatininexkretion im Urin abzuschätzen. Dieser indirekten Methode liegt die Annahme zu Grunde, dass die Menge des ausgeschiedenen Kreatinins (Crea) pro kg Skelettmuskelmasse (SMM) annähernd konstant ist. Im direkten Vergleich zu DEXA-Untersuchungen (Dual-Energy X-ray Absorptiometry) konnte in einer aktuellen Studie gezeigt werden, dass die Kreatininexkretion ein valider Biomarker für die Abschätzung der kindlichen und jugendlichen Muskelmasse darstellt (Poortmans et al., 2005). Während die Angaben für Erwachsene zwischen 16,2 g Crea / kg SMM / d und 22,9g Crea / kg SMM / d liegen, werden für Kinder bei fleischfreier Ernährung Werte zwischen 18,6 g Crea / kg SMM / d und 20 g Crea / kg SMM / d angegeben (Graystone, 1968; Picou et al., 1976; Wang et al., 1996). Poortmans et al. schlagen zur genaueren Abschätzung der Muskelmasse folgende Formel vor (Poortmans et al., 2005):

$$SMM \text{ (kg)} = (10,62 \times \text{Crea} / 24h) + 6,63$$

Diese mittels linearer Regressionsanalyse abgeleitete Gleichung erklärt für männliche und weibliche Jugendliche knapp zwei Drittel der Varianz ($r^2 = 0,73$; $p < 0,001$). Signifikante Unterschiede zwischen den so berechneten und den via DEXA-Messung erfassten Werten konnten im Rahmen der genannten Untersuchung nicht gefunden werden.

Eine weit verbreitete Methode zur Erfassung der Körperzusammensetzung und damit indirekt auch der Muskelmasse, stellt die Bioelektrische-Impedanz-Analyse (BIA) dar. Bei dieser Methode wird schwacher Wechselstrom (bei Einzelfrequenzmessungen meist mit 50 kHz) über Oberflächenelektroden in den Körper eingeleitet und an anderer Stelle durch weitere Elektroden gemessen. Der so erfassbare Spannungsabfall (Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangssignal) gibt Auskunft über den elektrischen Widerstand des Gewebes und ermöglicht die Abschätzung der Muskelmasse im untersuchten Körperbereich (Jaffrin und Morel, 2008; Kyle et al., 2004). Das Verfahren basiert demnach auf der unterschiedlichen Leitfähigkeit der verschiedenen Gewebetypen. Die Muskulatur stellt dabei aufgrund seines hohen Wassergehaltes (ca. 73%) ein besser leitendes Medium dar als das Fettgewebe (Heyward, 1998).

Wie den meisten anderen Methoden zur Erfassung der Körperzusammensetzung, liegen der Bioelektrischen-Impedanz-Analyse verschiedene Annahmen über das untersuchte Gewebe zugrunde. So wird beispielsweise ein konstantes Verhältnis zwischen den einzelnen Kompartimenten des Körpers angenommen (Bunc, 2001). Das Level der Hydratation und die Dichte der fettfreien Masse sind jedoch nicht konstant und variieren als Funktion des Alters, der Rasse, des Geschlechtes und der physischen Kondition (Haroun et al., 2010; Lohman, 1986). Diese Variabilität schränkt die generelle Anwendbarkeit der Technik ein und erschwert die korrekte Interpretation der BIA-Ergebnisse. Die Validität der Vorhersage steht damit in einem direkten Verhältnis zu der verwendeten Vorhersageformel (Deurenberg et al., 1994). Nur wenn diese die oben genannten Einflussfaktoren berücksichtigt, ist eine brauchbare Näherung an den tatsächlichen Skelettmuskelanteil zu erwarten (Haroun et al., 2010; Sen et al., 2010).

Innerhalb der letzten 20 Jahre wurde eine Vielzahl solcher Formeln entwickelt, die es ermöglichen sollen, ausgehend von der gemessenen Impedanz auf die fettfreie Masse von Erwachsenen (Baumgartner et al., 1991; Deurenberg et al., 1990; Deurenberg et al., 1991; Dey et al., 2003; Haapala et al., 2002; Heitmann, 1990; Jakicic et al., 1998; Kyle et al., 2001; Roubenoff et al., 1997; Stolarczyk et al., 1994) oder Kindern zu schließen (Conlisk et al., 1992; Cordain et al., 1988; Davies, 1985; Deurenberg et al., 1990; Deurenberg et al., 1989; Deurenberg et al., 1991; Houtkooper et al., 1989). Obwohl Studien mit erwachsenen Probanden eine

hohe Korrelation zwischen BIA und DEXA-Messungen zeigen konnten (Demura et al., 2004; Malavolti et al., 2003), fand die Mehrheit pädiatrischer Studien für derartige Messungen nur geringe Übereinstimmungen der Ergebnisse mit dem genannten Goldstandard (Eisenmann et al., 2004; Ellis, 1996; Goran et al., 1996; Gutin et al., 1996). Als Ursachen für diese Differenz sehen Lim et al. die, in den meisten Fällen eine zu klein gewählte Stichprobengröße, die uneinheitliche ethnischen Herkunft der Probandengruppen und die Verwendung von Einzelfrequenzanalysen an (Lim et al., 2009). In einer Studie an 166 Kindern und Jugendlichen (männlich n = 86; weiblich n = 80) fanden Lim et al. für die fettfreie Körpermasse eine Korrelation zwischen den mittels BIA und DEXA-Messung gemessenen Werten von $r = 0,995$ ($r^2 = 0,99$; $p < 0,01$; $SEE = 1,15\text{kg}$) (siehe *Abb. 6*). Die zugrundeliegende Funktion lautet:

$$\text{DEXA FFM} = 1,006 (\text{BIA FFM}) - 0,554$$

Obwohl das Verhältnis zwischen beiden Methoden durch das Alter und den Reifestatus beeinflusst wurde, konnte die Berücksichtigung dieser Faktoren den Determinationskoeffizienten r^2 nur um 0,001 erhöhen.

Da die BIA Messung neben dem extrazellulären (ECW) und intrazellulären Wasser (ICW) auch durch das Körpervolumen, die Rumpf- und Extremitätenlänge beeinflusst wird, sind Messungen mit Elektroden an allen vier Extremitäten Voraussetzung für eine adäquate Abschätzung der Muskelmasse. So ist zu beachten, dass etwa 50% der gesamten Körpermasse dem Rumpf zuzurechnen sind, dieser bei der 2-Elektrodenmethode jedoch nur 10% der kompletten Impedanz beeinflusst (Lim et al., 2009).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei Anwendung einer populations-spezifischen Vorhersageformel, die Bioelektrische-Impedanz-Analyse dazu geeignet ist, die fettfreie Körpermasse von Kindern und Jugendlichen abzuschätzen (Heyward, 1998). Zu bevorzugen ist dabei die octopolare multifrequente Impedanzmessung, welche neben den oberen Extremitäten auch den Rumpf in die Messung einbezieht (Kriemler et al., 2009; Lim et al., 2009).

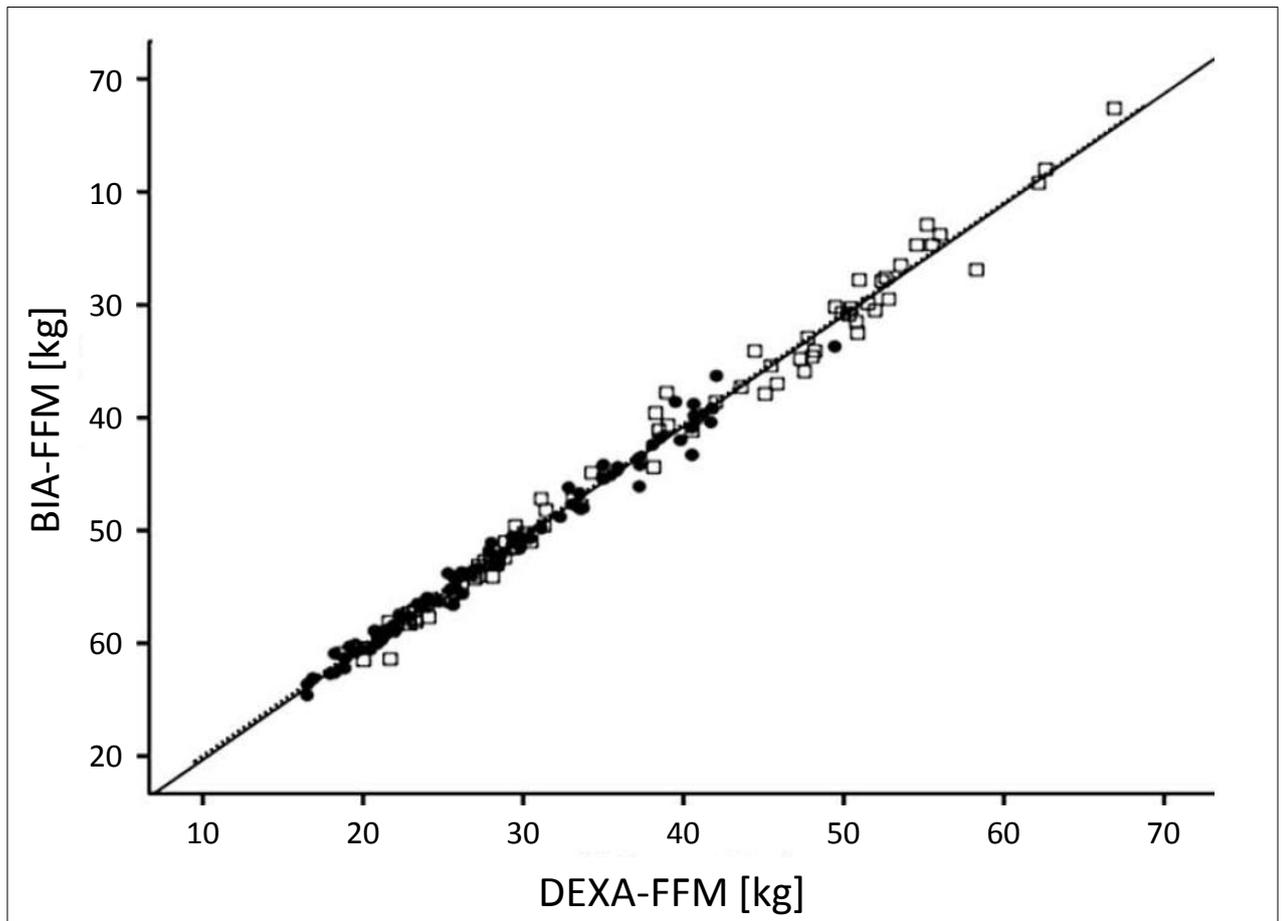


Abb. 6: Lineare Regressionsanalyse des Zusammenhanges zwischen fettfreier Körpermasse (FFM) gemessen mit Bioelektrischer Impedanz-Analyse (BIA) und Dualer Röntgenabsorbtometrie (Dual Energy X-Ray Absorbtometrie = DEXA). $DXA\ FFM = 1,01 (BIA\ FFM) + 0,55$; $R^2 = 0,99$; Standardfehler (SEE) = 1.16 kg. Abbildung aus (Lim et al., 2009).

Neben den genannten, z.T. sehr aufwendigen und kostspieligen Untersuchungen, besteht die Möglichkeit, die Muskelmasse über einfache anthropometrische Messungen abzuschätzen (Poortmans et al., 2005). Denkbar sind in diesem Zusammenhang insbesondere das Körpergewicht, die Körpergröße, der BMI oder die Umfangsmessungen. Eine Übersicht über die jeweiligen Korrelationskoeffizienten der genannten Prädiktoren mit der via MRT erfassten Gesamtmuskelmasse findet

sich in *Tab. 3*. Diese, aus der Studie von Lee et al. entnommenen Koeffizienten, machen jedoch deutlich, dass die Gesamtmuskelmasse nur unzureichend über einzelne Prädiktoren vorhergesagt werden können (Lee et al., 2000). Lee et al. schlagen daher zwei verschiedene Modelle vor (Skinfold-Circumference Model vs. Body-Weight & Height Model), die über eine Kombination der einzelnen Parameter präzisere Vorhersagen erlauben.

Tab. 3: Korrelationskoeffizienten von SMM-Prädiktoren mit der via Magnetresonanztomographie (MRT) gemessenen Gesamtmuskelmasse basierend auf einem Datensatz von 244 nichtadipösen Probanden. Partielle Korrelationen nach Normierung auf das Alter der Probanden sind ebenfalls angegeben. CAG (= corrected arm girth), CTG (= corrected thigh girth) und CCG (= corrected calf girth) stehen für hautfalten-korrigierte Umfangsmessungen des Oberarms, des Oberschenkels und der Wade (Daten aus (Lee et al., 2000)).

Variable	R	p	SEE (kg)	Partielle Korrelation
Alter	-0,21	0,0012	7,30	-
Körpergewicht	0,80	< 0,0001	4,49	0,83
Körpergröße	0,79	< 0,0001	4,54	0,79
BMI	0,48	< 0,0001	6,54	0,54
CAG	0,88	< 0,0001	3,57	0,88
CTG	0,78	< 0,0001	4,69	0,77
CCG	0,82	< 0,0001	4,31	0,81
Körpergröße x CAG	0,90	< 0,0001	3,19	0,91
Körpergröße x CTG	0,83	< 0,0001	4,18	0,82
Körpergröße x CCG	0,87	< 0,0001	3,74	0,86

Die in mehreren Schritten über multiple Regression hergeleitete Formel für die Vorhersage der Gesamtmuskelmasse aus Hautfaldendicke und Umfangsmessungen lautet (Skinfold-Circumference Model):

$$SMM (kg) = Ht \times (0.00744 \times CAG^2 + 0.00088 \times CTG^2 + 0.00441 \times CCG^2) + 2.4 \times \text{Geschlecht} \times 0.048 \times \text{Alter} + \text{Rasse} + 7.8,$$

Dabei gilt: Geschlecht: Männer = 1; Frauen = 0; Rasse: Asiaten = -2,0; Afroamerikaner = 1,1; Weiße und Lateinamerikaner = 0. Mit Hilfe dieser Formel konnten 91% der Varianz aufgeklärt werden ($r^2 = 0,91$; $p < 0,0001$; SEE = 2,2kg). Ein signifikanter Unterschied zwischen den mittels oben genannter Formel geschätzten Werten und der im MRT gemessenen Gesamtmuskelmasse konnte nicht gefunden werden. Wurden die Umfangsmessungen in der Formel nicht Berücksichtigt und stattdessen das Körpergewicht mit aufgenommen (Body-Weight & Height Model), konnten nur 85% der Varianz aufgeklärt werden ($r^2 = 0,85$; $p < 0,0001$; SEE = 2,8kg):

$$SMM (kg) = 0.244 \times BW + 7.80 \times Ht \times 0.098 \times \text{Alter} + 6.6 \times \text{Geschlecht} + \text{Rasse} \times 3.3$$

Dabei gilt: Geschlecht: Männer = 1; Frauen = 0; Rasse: Asiaten = -1,2; Afroamerikaner = 1,4; Weiße und Lateinamerikaner = 0. Beide anthropometrischen Vorhersagemodelle können demnach als geeignete und gleichzeitig einfache Methoden zur Erfassung der Gesamtkörpermasse eingestuft werden. Es ist jedoch anzumerken, dass es sich bei den untersuchten Probanden nicht um Kinder und Jugendliche gehandelt hat und damit die Vorhersagekraft der genannten Formeln für diese Population unklar ist. Poortmans et al. haben aus diesem Grund nur wenige Jahre später (2005) auf der Basis der oben genannten Formel von Lee et al. (Skinfold-Circumference Model) neue Koeffizienten für Kinder und Jugendliche gesucht. Mit Hilfe der multiplen linearen Regression wurden folgende Koeffizienten ermittelt:

$$SMM (kg) = \text{Körpergröße} \times [(0.0064 \times CAG^2) + (0.0032 \times CTG^2) + (0.0015 \times CCG^2)] + (2.56 \times \text{sex}) + (0.136 \times \text{age}) .$$

Dabei gilt: Geschlecht: Jungen = 1; Mädchen = 0; Körpergröße gemessen in Metern. Mit Hilfe dieser Formel konnten 96% der Varianz aufgeklärt werden ($r^2 = 0,966$; $p < 0,001$). Statistisch signifikante Unterschiede zwischen den in der Form geschätzten Werten und den mittels DEXA-Untersuchung gemessenen Werten konnten nicht gefunden werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass mit der Magnetresonanztomographie und der Dualen-Röntgen-Absorptiometrie sehr präzise Messmethoden zur Abbildung des physiologischen Muskelwachstums im Kindes- und Jugendalter verfügbar sind. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass sich durchaus auch kostengünstigere Methoden dazu eignen den muskulären Anteil der Körperzusam-

mensetzung abzuschätzen. Insbesondere der als gering einzustufende apparative Aufwand im Vergleich zu den beiden zuvor genannten Methoden, machen letztere Verfahren vorrangig interessant für Untersuchungen mit großen Probandenzahlen.

6.2.2 Anatomische Muskelquerschnittsfläche

Das Muskelwachstum wird in der Literatur meist als Änderung der muskulären Querschnittsfläche beschrieben. Dazu werden in den Untersuchungen in der Regel definierte Muskeln, Muskelgruppen oder seltener auch einzelne Muskelfasern vermessen. Im Folgenden soll dargestellt werden welche Informationen über die wachstumsbedingte Querschnittsflächenänderung im Kindes- und Jugendalter verfügbar sind.

Das postnatale Muskelwachstum lässt sich beschreiben als ein komplexes Zusammenspiel zwischen mechanischen, genetischen und hormonellen Komponenten einerseits und von Nahrungs- und Umwelt-Einflüssen andererseits. Die genaue Steuerung dieser Interaktion ist jedoch bislang noch nicht komplett geklärt. Es wird davon ausgegangen, dass die Anzahl der Muskelfasern zum Zeitpunkt der Geburt weitgehend festgelegt ist und damit die im Rahmen der Entwicklung zu beobachtende Zunahme der Muskelmasse weniger die Folge einer muskulären Hyperplasie, sondern vielmehr auf hypertrophische Prozesse zurückzuführen ist (De Ste Croix, 2007; Rowland, 2005). So erfahren die bei Geburt im Durchmesser etwa 20µm messenden Muskelfasern im Rahmen der Kindheit und Pubertät laut MacIntosh eine etwa zwanzigfache Vergrößerung (MacIntosh et al., 2006) (siehe *Abb. 7*). Ob es sich bei dieser Beobachtung um die Muskelfasern von Jungen oder Mädchen handelte, wird nicht näher erläutert.

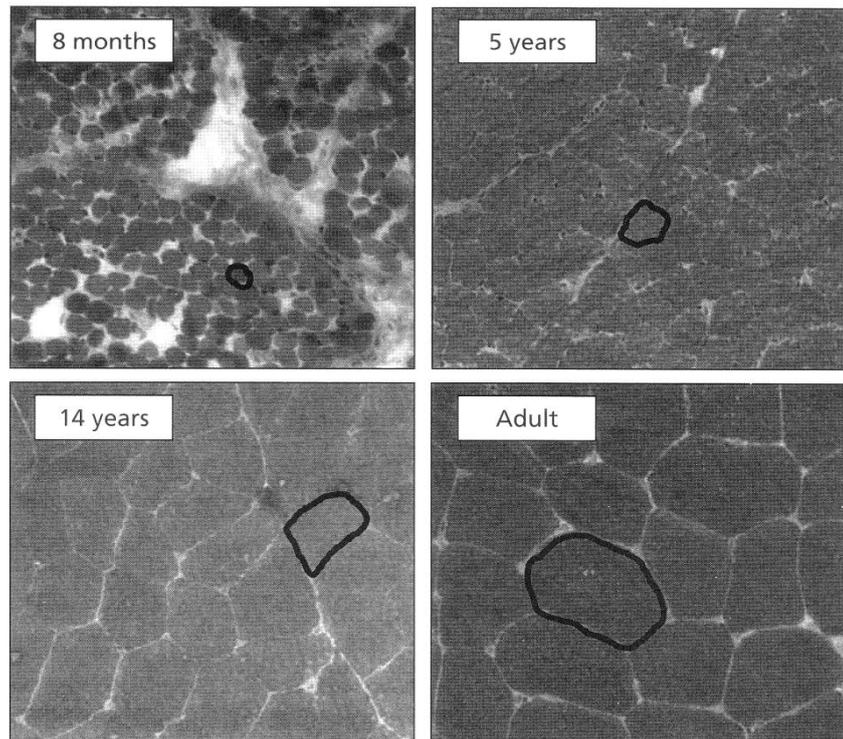


Abb. 7: Muskelfaserwachstum – Transversale Schnitte durch Biopsate des *M. quadriceps femoris* eines acht Monate alten Säuglings, eines fünf Jahre alten Kindes, eines 14 Jahre alten Jungen und eines 23 Jahre alten Mannes. Eine einzelne Faser wurde in jedem Bild markiert um die Zunahme der Fasergröße durch Wachstum und Reifung hervorzuheben. Abbildung aus (Jones und Round, 2008).

Bereits frühe elektronenmikroskopische Untersuchungen aus den 1970er Jahren konnten zeigen, dass die Myofibrillen zunächst deutlich an Größe zunehmen (ca. 15fache Vergrößerung), bevor sie sich teilen (Goldspink, 1970). Dieses als myofibrilläres „Splitting“ bezeichnete Phänomen trägt somit zum Dickenwachstum der einzelnen Muskelfaser und damit letztlich auch zum Wachstum des gesamten Muskels bei. Auslöser dafür sind nach Ansicht von Pearson eine durch mechanischen Stress ausgelöste ungleiche Druckverteilung an der Z-Bande (Pearson, 1990). Der Vorteil einer derartigen zahlenmäßigen Zunahme gegenüber einer reinen Dickenzunahme von Myofibrillen liegt vermutlich in einer effizienteren biochemischen Versorgung myofibrillärer Strukturen. So gehen MacIntosh et al. davon aus, dass diesbezüglich ein optimales Oberflächen-Volumenverhältnis für Myofibrillen existiert und der Organismus bestrebt ist, diese Verhältnis im Rahmen des Muskelwachstums nicht zu überschreiten (MacIntosh et al., 2006).

Mit dem Ziel, die physiologische Variationsbreite der Muskelfasergröße zu untersuchen und damit pathologische Veränderungen bei muskelassoziierten Erkrankungen besser zu erkennen, wurden vereinzelt auch post mortem Studien durchgeführt. Aherne et al. studierten mit dieser Zielsetzung 21 Individuen im Alter von 0-18 Jahren (Aherne et al., 1971). Muskelgewebeproben wurden dafür jeweils aus dem M. deltoideus, M. biceps brachii, M. rectus femoris und dem M. gastrocnemius entnommen und vermessen. Mit zunehmender Körpergröße fand sich in allen untersuchten Muskelgruppen eine Zunahme des Faserquerschnitts.

Die aus dem beschriebenen Dickenwachstum der einzelnen Muskelfasern resultierende Zunahme der muskulären Gesamtquerschnittsfläche lässt sich mit Hilfe moderner bildgebender Verfahren präzise abbilden. Wie weiter oben dargestellt gilt die Magnetresonanztomographie in diesem Bereich als Goldstandard. Bislang sind derartige Untersuchungen zur systematischen Erfassung wachstums- und reifeassoziierten Veränderungen in der Muskelmasse jedoch die Ausnahme. Deighan et al. konnten mit der beschriebenen Methode das Muskelwachstum bislang an drei verschiedenen Altersgruppen skizzieren (Deighan et al., 2006). Hierbei zeigte sich für die beiden untersuchten Muskelgruppen (Ellbogenbeuger und –strecker) ein vergleichbares Bild: Der bereits präpubertär nachweisbare geschlechtsspezifische Unterschied der Muskelquerschnittsfläche nahm mit jeder weiteren Altersstufe zu (siehe *Abb. 8*).

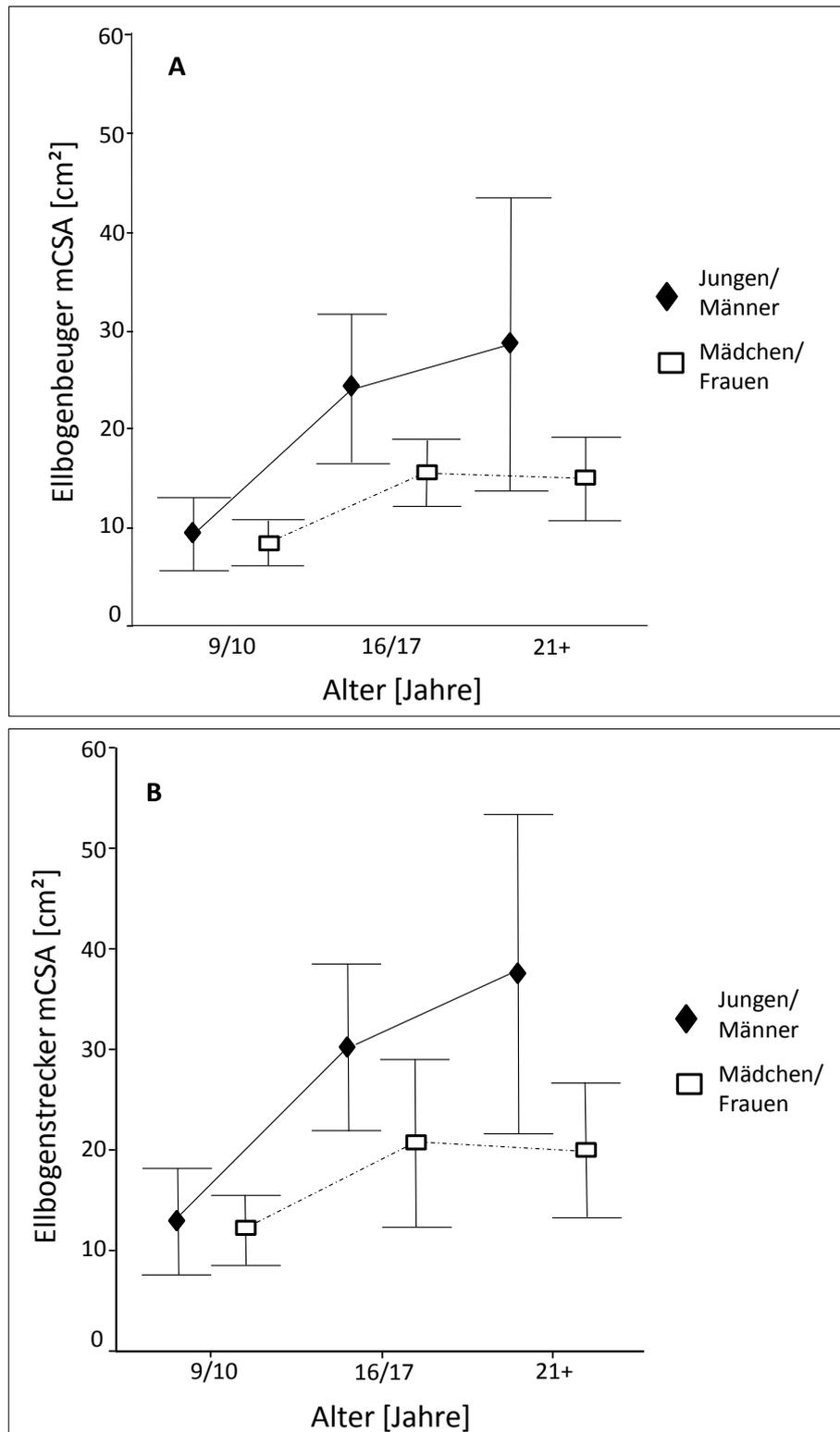


Abb. 8: Auf MRT-Messungen basierende Muskelquerschnittsflächenberechnung der Ellbogenbeuger (A) und –strecker (B) von insgesamt 95 aktiven Kindern und Jugendlichen (bestehend aus 18 männlichen und 19 weiblichen präpubertären Kindern, 15 männliche und 14 weibliche Jugendliche sowie 15 Männer und 14 Frauen im Alter von >21 Jahren). Abbildung aus (Deighan et al., 2006).

Auch Rowland weist darauf hin, dass gerade im Zuge der Pubertät in Bezug auf die Muskelfaserdicke deutliche Geschlechtsunterschiede nachzuweisen sind. So liegt die mittlere muskuläre Querschnittsfläche des M. vastus lateralis bei 16jährigen Jungen im Mittel um 26% höher als das der gleichaltrigen Mädchen (Rowland, 2005). Eine kontinuierliche Abbildung des Muskelwachstums anhand von Muskelquerschnittsveränderungen über alle Altersklassen der ersten beiden Lebensdekaden steht jedoch noch aus.

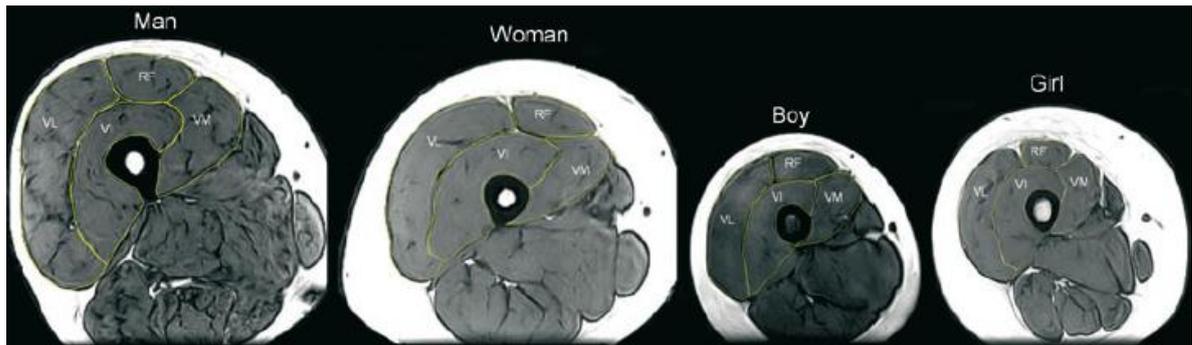


Abb. 9: Beispiele für axiale MRT-Aufnahmen der Oberschenkelmuskulatur auf Höhe der mittleren Femurlänge im Vergleich zwischen Kindern und Erwachsenen (ohne genaue Altersangabe). Die einzelnen Komponenten des M. quadriceps femoris (RF = Rectus femoris, VL = Vastus lateralis, VM = Vastus medialis, VI = Vastus intermedius) sind farblich hervorgehoben. Abbildung aus (O'Brien et al., 2010).

Während in früheren Arbeiten davon ausgegangen wurde, dass die maximale Kraft unabhängig vom Trainingsstatus und Geschlecht direkt von der anatomischen Querschnittsfläche des jeweiligen Muskels abhängt (Ikai und Fukunaga, 1968; Schantz et al., 1983), kommen aktuellere Untersuchungen zu einem anderen Ergebnis (Castro et al., 1995). Dieses Fazit ziehen Jones et al. aus ihrer aktuellen Übersichtsarbeit zu dem Einfluss der muskulären Querschnittsfläche auf die Muskelkraft (Jones et al., 2008). Als neuere Studie nennen sie unter anderem die Arbeit von Castro et al., welche zeigen konnte, dass die Kraft trainierter Individuen auch nach Normierung auf die anatomische Querschnittsfläche der Muskulatur signifikant höher lag als bei untrainierten (Castro et al., 1995). Die Kraft pro ACSA (F/ACSA) von trainierten männlichen Probanden lag dabei bei $2,79 \text{ N/cm}^2 (\pm 0,37)$ und die der weiblichen trainierten Probanden bei $2,65 \text{ N/cm}^2 (\pm 0,27)$, wohingegen die Kraft untrainierter mit $2,13 \text{ N/cm}^2 (\pm 0,49)$ bzw. $2,09 \text{ N/cm}^2 (\pm 0,23)$ bei beiden Geschlechtern deutlich niedriger lag. Eine mögliche Erklärung für diesen trainingsbedingten Unterschied, so die Autoren, könnte in einer Anpassung der neuromuskulären Ansteuerung liegen. Ob es sich bei den trainingsabhängigen Adaptationen um die gleichen Mechanismen handelt, die auch für altersabhängige Differenzen in der F/ACSA verantwortlich sind ist jedoch unklar. Auf die neuromusku-

läre Reifung sowie auf weitere qualitative Unterschiede der Muskulatur bzw. ihrer Ansteuerung soll weiter unten näher eingegangen werden (siehe Kapitel 6.3 und Kapitel 6.5).

Interessanter Weise geht die Phase der größten Querschnittsflächen-Zunahme der maximalen Kraftentwicklung um wenige Monate voran. Diese temporale Dissoziation spricht in den Augen von Blimkie und Sale (Blimkie und Sale, 1998) für den Einfluss weiterer kraftdeterminierender Variablen in dieser kurzen Periode des Wachstumsschubes. Die genannten Autoren verweisen jedoch im Weiteren darauf, dass zwar die Mehrheit der Jungen (72%) nach der PHV ihre maximalen Kraftzuwächse verzeichnen, der übrige Anteil diesen Entwicklungsschritt jedoch vor der PHV durchlebt.

Abschließend kann gesagt werden, dass die Muskelfaserdicke mit zunehmendem Alter steigt und ein enger Zusammenhang zur Muskelkraft besteht. Andererseits lassen die Ergebnisse der genannten Studien bereits vermuten, dass die muskuläre Querschnittsfläche nicht alleine die Kraft erklären kann sondern weitere Faktoren hierbei eine Rolle spielen müssen.

6.2.3 Muskelfaserlänge

Wenngleich bei der Beschreibung des kindlichen Muskelwachstums der Fokus der Untersuchungen mehrheitlich auf die Querschnittsfläche gerichtet ist, dürfen Veränderungen der Muskelfaserlänge nicht aus dem Blickfeld geraten. Auch diese Komponente der Größenzunahme hat einen Einfluss auf die Muskelkraft (siehe

Abb. 10 und *Abb. 11*) und soll aus diesem Grund im Folgenden näher beschrieben werden.

Mit zunehmender Muskelfaserlänge steigt die Zahl in Reihe geschalteter Sarcomere, wodurch neben größeren Bewegungsradien schnellere Kontraktionsgeschwindigkeiten realisiert werden können (MacIntosh et al., 2006). So konnte an isolierten Muskelfasern des Frosches, bei dem die Faserlänge und die in Serie geschalteten Sarcomere einfach gemessen werden kann, gezeigt werden, dass die maximale Kontraktionsgeschwindigkeit direkt proportional zur Faserlänge ist (Edman et al., 1985). Eine umfassende Untersuchung dieses Zusammenhanges für menschliche Muskelfasern steht jedoch noch aus.

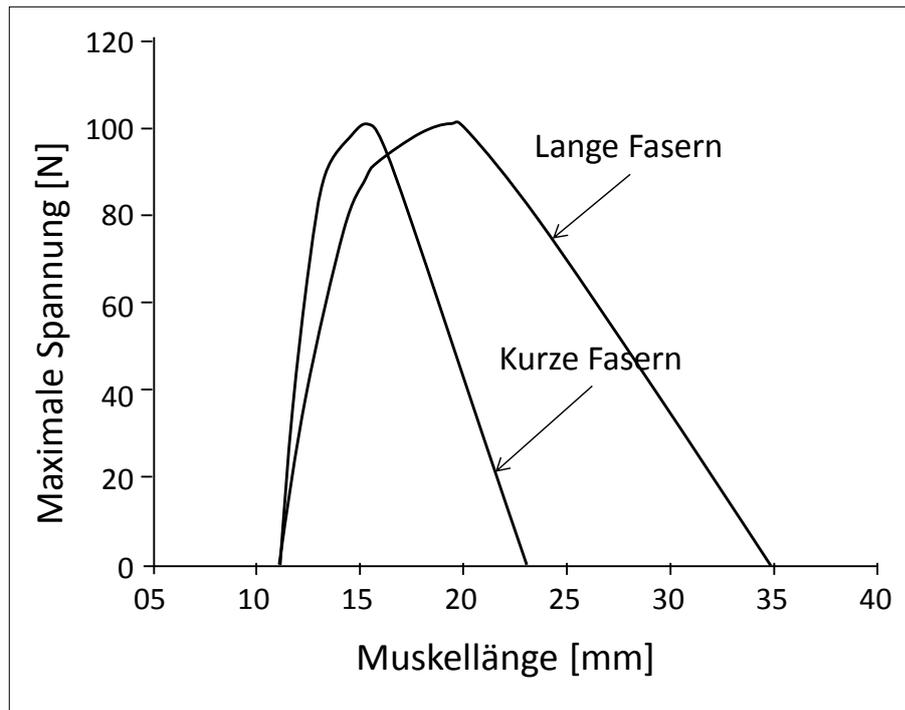


Abb. 10: Schematische Darstellung von zwei Muskeln mit zwei verschiedenen Faserlängen bei identischer PCSA. Vergleich der isometrischen Längen-Spannungs Eigenschaften. Abbildung aus (Lieber und Friden, 2000).

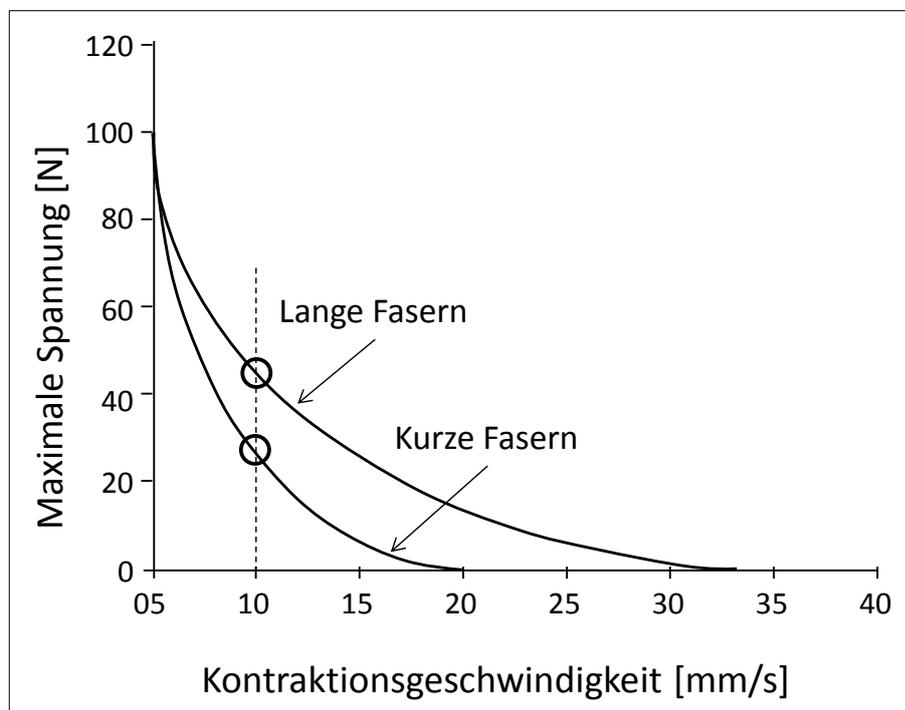


Abb. 11: Schematische Darstellung von zwei Muskeln mit zwei verschiedenen Faserlängen bei identischer PCSA. Vergleich der isotonischen Kraft-Geschwindigkeits- Eigenschaften. Abbildung aus (Lieber und Friden, 2000).

Da die komplette Isolation einzelner Muskelfasern (vom Ursprung bis zum Ansatz) zur Messung ihrer Länge technisch sehr schwierig ist (Ounjian et al., 1991), kommt häufig die Abschätzung der Länge über die Messung der Muskelfaserbündel zum Einsatz (Lieber und Friden, 2000). O'Brien et al. konnten zeigen, dass die Länge der Muskelfaserbündel bei Erwachsenen größer ist als bei Kindern, wodurch die maximale Verkürzungsgeschwindigkeit bei ersteren höher liegt (O'Brien et al., 2010). Die Arbeitsgruppe weist in ihrer Publikation jedoch darauf hin, dass durch ein konstant bleibendes Verhältnis zwischen Muskelfaserbündel- und der Muskel- oder Sehnenlänge in beiden Altersklassen eine vergleichbare relative Verkürzungsgeschwindigkeit erreicht wird.

Frühe Untersuchungen konnten zeigen, dass sich bei wachsenden Muskelfasern neue Sarcomere an den jeweiligen Enden der Fasern anlagern (Williams und Goldspink, 1971). Diese von Williams und Goldspink durchgeführte Untersuchung zeigte darüber hinaus, dass neben der mechanischen Belastung durch Kontraktionen, der Dehnungsreiz eine entscheidende Rolle bei der Auslösung der genannten Längenadaptation spielt. Die von ihnen untersuchten Mäusemuskelfasern wiesen nach Immobilisation in verkürzter (flekierter) Position eine geringere Sarcomerzahl auf als die in Dehnung (Extension) immobilisierten Fasern. Zu vergleichbaren Ergebnissen gelangten ein Jahr später auch Tabary et al., die bereits nach dreiwöchiger Immobilisation in verkürzter Position ebenfalls im Tiermodell (Katzen) eine 40 %ige Verminderung der Sarcomerzahl beobachten konnten, während die in Dehnung gehaltenen Fasern ein Muskellängenwachstum im Sinne einer Anlagerung neuer endständiger Sarcomere aufwiesen (Tabary et al., 1972). Neben einem Muskelwachstum durch steigende Anzahl, in Reihe geschalteter Sarcomere, wird darüber hinaus von einer Längenzunahme der einzelnen Sarcomere im Rahmen des longitudinalen Wachstums ausgegangen (Malina et al., 2004). Begleitet werden diese axialen Veränderungen von einer Zunahme der Zellkernzahl pro Muskelfaser (Allen et al., 1999). Diese Zunahme an Zellkernen pro Muskelfaser wird dem Vermögen des Zellkernes zugeschrieben, nur ein begrenztes Volumen an Cytoplasma versorgen zu können (Jones und Round, 2008).

Trotz der schlechten Datenlage in Bezug auf die Mechanismen der physiologischen Muskellängenzunahme bei Kindern und Jugendlichen kann festgehalten werden, dass Dehnungsreize für die Längenadaptation eine entscheidende Rolle spielen. Es ist naheliegend, dass dieser Stimulus im Rahmen der Körpergrößenzunahme durch das Knochenwachstum in die Muskulatur eingeleitet wird (Parker et al., 1990; Round et al., 1999). Ein besseres Verständnis dieser Zusammenhänge ist die Voraussetzung für die Abgrenzung dieser reifeabhängigen Veränderung von einer trainingsbedingten Längenadaptation und sollte daher Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

6.2.4 Veränderung der Gesamtmuskelmasse

Neben der Erfassung der muskulären Querschnittsfläche, zur Beschreibung des physiologischen Muskelwachstums, besteht die Möglichkeit Veränderungen der Gesamtmuskelmasse für diesen Zweck heranzuziehen. Der Blick richtet sich bei diesem Vorgehen demnach nicht auf einzelne Muskeln oder Muskelfasern, wie bei den zuvor beschriebenen Verfahren, sondern auf den gesamten Körper. Da auch diese Kenngröße in Studien mit Krafttrainingsinterventionen als Maß der trainingsbedingten, strukturellen Anpassungen aufgeführt wird, soll hier der physiologische, entwicklungsbedingte Verlauf dargestellt werden.

Von Kadaverstudien ist bekannt, dass die Muskelmasse bei Geburt in etwa 25% des gesamten Körpergewichts ausmacht, während es bei Erwachsenen in etwa 40% sind (Malina et al., 2004). Dabei ist darauf zu achten, dass letztere Daten an älteren Erwachsenen erhoben wurden und man aufgrund der bekannten altersatrophischen Prozesse davon ausgehen muss, dass die Werte von jüngeren Erwachsenen höher liegen. Daten aus Kadaverstudien für Kinder und Jugendliche liegen bislang nicht vor.

Schätzungen der Muskelmassenveränderung durch die Kreatininexkretion gehen davon aus, dass in etwa 42% der Körpermasse bei fünfjährigen Jungen und etwa 40% bei gleichaltrigen Mädchen als magere Körpermasse gezählt werden können (Naughton et al., 2000). Dieser Wert erhöht sich beim männlichen Geschlecht bis zum 17. Lebensjahr auf 54%, während die magere Körpermasse bei weiblichen Jugendlichen nur auf 40% ansteigt (Naughton et al., 2000).

MRT-basierte Untersuchungen der physiologischen Muskelmassenveränderung sind selten. Eine umfangreiche Untersuchung dieses Prozesses über neun Lebensdekaden findet sich jedoch bei Kim et al. (Kim et al., 2006). Die hier untersuchte Probandengruppe bestand aus 270 Erwachsenen und 99 Kindern und Jugendlichen verschiedener Altersgruppen. Es konnte gezeigt werden, dass sich das Verhältnis zwischen der appendiculären und der Gesamtmuskelmasse während des Wachstums und der Reifeentwicklung verändert (siehe *Abb. 5*). So fand sich bei prä- und intrapupertären Kindern (Tanner Stadium \leq IV) ein größerer Anteil der Gesamtmuskelmasse im appendiculären Bereich (56 %) als bei den erwachsenen Probanden (53 %) (siehe *Abb. 12*).

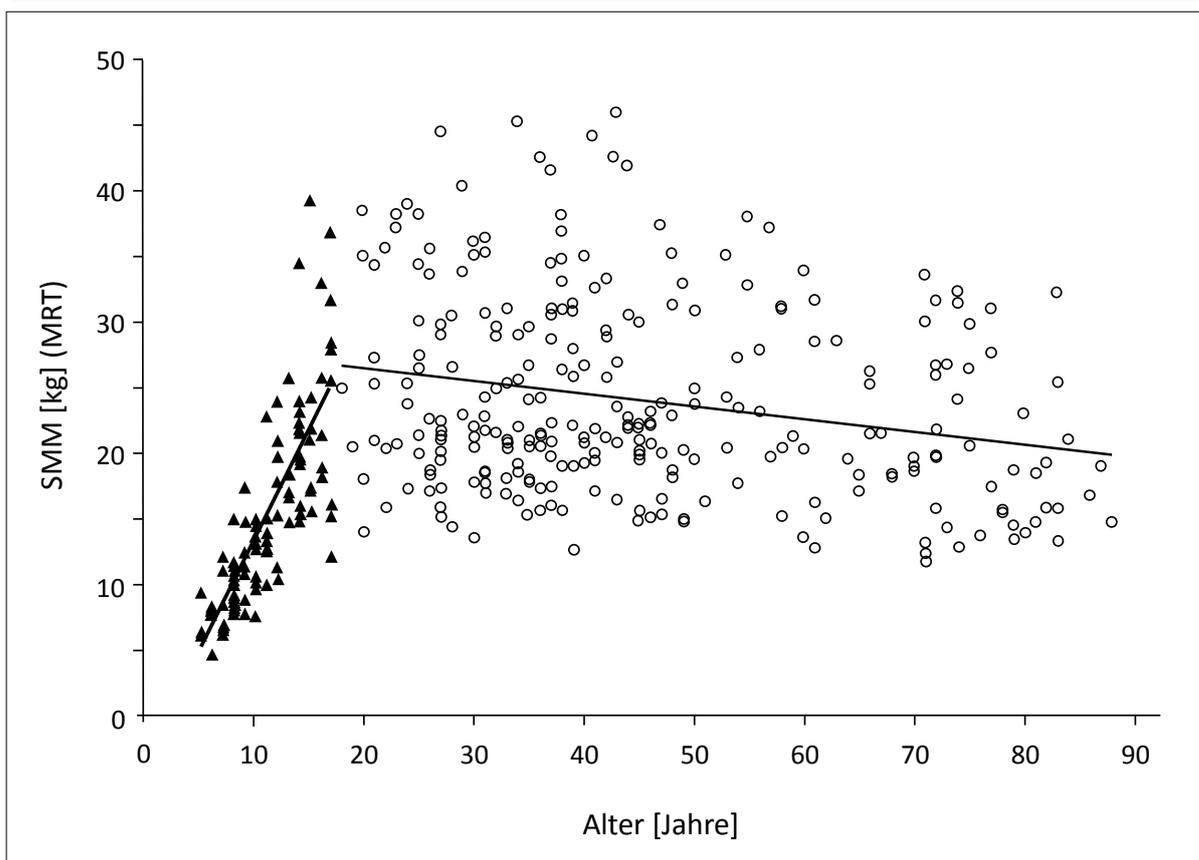


Abb. 12: Skelettmuskelmasse (SMM) als Funktion des Alters für Kinder und Jugendliche (\blacktriangle ; $r = 0,79$, $p < 0,001$) und Erwachsene (\circ ; $r = -0,24$, $p < 0,001$). Gemessen mit einem 1,5-Tesla Scanner. Abbildung aus (Kim et al., 2006).

Obwohl Kim et al. in ihrer Arbeit auf geschlechtsspezifische Unterschiede im Muskelwachstum hinweisen, lässt die oben gezeigte Abbildung keine Differenzierung zwischen Jungen und Mädchen, bzw. Frauen und Männern zu. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass der geschlechtsspezifische Dimorphismus der Körperzusammensetzung bereits in der Fetalperiode beginnt und die entsprechende Differenz der mageren Körpermasse über die Kindheit hinweg nachzuweisen ist, um schließlich in der Pubertät einen deutlichen Schub zu erfahren (Butte et al., 2000; Fomon und Nelson, 2002; Wells, 2007). Diese Akzeleration wird nach heutigem Wissensstand entscheidend durch endokrine Faktoren wie die gonadalen Steroide und dem Wachstumshormon gesteuert (Loomba-Albrecht und Styne, 2009).

Die oben dargestellten Untersuchungen beschreiben einen Zuwachs der Muskelmasse, der im Zeitverlauf dem der Muskelkraftentwicklung ähnelt (siehe Kapitel 7.1). Eine Normierung der Kraft auf die gesamte Muskelmasse des Körpers vermag nach einzelnen Autoren die altersabhängige Kraftdifferenz sogar komplett zu eliminieren, wohingegen andere einen über die Massezunahme hinausgehenden Kraftzuwachs im Verlauf der Reifeentwicklung beobachten konnten (Bassa et al., 2001). Letzteres spricht für die Beteiligung weiterer Faktoren an der Generierung

der Muskelkraft, welche über die vorhandene Menge kontraktiler Masse hinausgehen. Dies gilt es bei der Interpretation von krafttrainingsinduzierten Veränderungen der Muskelmasse zu berücksichtigen. Qualitative Veränderungen der Muskulatur, wie sie weiter unten beschrieben werden sollen, spielen offenbar eine entscheidende Rolle für die Varianz der Massennormierten Muskelkraft.

6.2.5 Muskelwachstum in unterschiedlichen Körperbereichen

Beschreibungen des physiologischen Muskelwachstums, beziehen sich oftmals auf Veränderungen der Gesamtmuskelmasse des Körpers, ohne dabei auf Unterschiede zwischen einzelnen Körperregionen einzugehen. Longitudinale Messung des Muskelvolumens von Kindern und Jugendlichen konnten jedoch zeigen, dass neben den bekannten geschlechtsspezifischen Differenzen auch ungleiche Entwicklungen zwischen oberer und unterer Extremität zu beobachten sind (Kemper und Verschuur, 1985). Nach Eintritt in die Pubertät zeigen Jungen verglichen mit gleichaltrigen Mädchen dabei einen größeren Muskelzuwachs am Oberkörper. Jones und Round interpretieren diese Differenz als eine Art sekundäres Geschlechtsmerkmal im Zuge einer erhöhten Testosteronsensitivität dieser Muskelgruppen, vergleichbar mit der Entwicklung des Schultergürtels (Jones und Round, 2008). Zurückzuführen sind diese Phänomene nach Jones und Round möglicherweise auf einen Selektionsvorteil im Laufe unserer Evolution. So könnte eine stärker ausgeprägte Oberkörpermuskulatur beispielsweise entscheidende Vorteile für die Jagd mit sich gebracht haben.

Unterstützt werden diese Ergebnisse durch Daten von standardisierten Weichteil-Röntgenaufnahmen. Diese zeigen präpubertär ein vergleichbares Muskelwachstum von Mädchen und Jungen (Goulding et al., 1996; Tanner et al., 1981). Erst mit dem Einsatz des Wachstumsschubes der Mädchen, in etwa im Alter von 11 Jahren, erlangen diese, bezogen auf das Muskelwachstum der Beinmuskulatur, einen temporalen Vorteil gegenüber ihren männlichen Altersgenossen. Im Bereich der Arme kann dieser reifebedingte Muskelzuwachs hingegen nicht beobachtet werden. Hier bleiben die Werte der Jungen im Mittel über denen der Mädchen, um sich dann im Rahmen der Pubertät noch weiter von diesen zu entfernen. Auch der zuvor genannte, temporale Vorsprung der Mädchen im Bereich der Beinmuskulatur, wird durch das intrapubertäre Muskelwachstum der Jungen aufgehoben.

Tab. 4: Altersabhängige Zusammensetzung der Fettfreien Körpermasse in den ersten beiden Lebensdekaden bei Jungen und Mädchen (Daten von (Fomon et al., 1982))

Alter [Jahre]	Jungen		Mädchen	
	Wasser [%]	Protein [%]	Wasser [%]	Protein [%]
Geburt	80,6	15,0	80,6	15,0
1	79,0	16,6	78,8	16,9
3	77,5	17,8	77,9	17,7
5	76,6	18,5	77,6	18,0
7-9	76,8	18,1	77,6	17,5
9-11	76,2	18,4	77,0	17,8
11-13	75,4	18,9	76,6	17,9
13-15	74,7	19,1	75,5	18,6
15-17	74,2	19,3	75,0	18,9
17-20	74,0	19,4	74,8	19,2

Es bleibt festzuhalten, dass sich die Muskelmasse in Abhängigkeit der Körperregion zwischen Jungen und Mädchen unterschiedlich entwickelt. In diesem Zusammenhang ist insbesondere der wachstumsbedingte, temporale Vorteil der Mädchen in Bezug auf die Beinmuskulatur zu nennen. Bei nicht Berücksichtigung dieser Zusammenhänge kann es leicht zur Fehlinterpretation von Studienergebnissen kommen.

6.2.6 Ernährungseinflüsse auf das Muskelwachstum

Die Ernährung liefert dem Organismus neben der Energie auch Bauelemente in Form von Proteinen, welche in Folge des erhöhten Stickstoffturnovers nach dem Training von der Muskulatur benötigt wird. Obwohl dieser Zusammenhang bekannt ist, wird die Ernährung nur in wenigen Kraftstudien mit Kindern- und Jugendlichen berücksichtigt. Da durch den Ernährungsstatus vermutlich auch ein Einfluss auf die Grundvoraussetzungen für die Trainingsadaptationen ausgeübt wird, soll im Folgenden geklärt werden welche Bedeutung die Nährstoffzufuhr für das Muskelwachstum hat.

Wie weiter oben beschrieben, spielt bei der ontogenetischen Entwicklung der Muskulatur auch die Ernährung eine entscheidende Rolle. In diesem Rahmen ist neben dem alters- und aktivitätsabhängigen Gesamtbedarf an Energie, insbesondere eine ausreichende Proteinzufuhr von Bedeutung (Jones und Round, 2008). Dabei ist zu berücksichtigen, dass der diätetische Proteinbedarf pro kg Körpergewicht bei jüngeren Kindern höher ist als bei älteren so, dass der Bedarf eines 17jährigen nur noch etwa 40% von dem eines Kleinkindes ausmacht (Malina et al., 2004). Geschlechtsspezifische Unterschiede finden sich erst mit Einsetzen der Pubertät. Hier ist der Bedarf der Jungen höher als der der Mädchen (siehe *Abb. 13*). Liegt die Proteinzufuhr chronisch unter der benötigten Proteinmenge, kommt es zu einer negativen Stickstoffbilanz und damit zu einer Beeinträchtigung des Muskelwachstums (Fuller und Chen, 1997). Fuller und Chen weisen darüber hinaus darauf hin, dass die Proteinakkretion, also der Aufbau von Proteinen, in der Entwicklung unreifer Tiere und Kindern durch die Protein-, Kohlenhydrat- und Fettaufnahme stimuliert wird (Fuller und Chen, 1997).

Die Bedeutung der Proteinzufuhr für das physiologische Muskelwachstum wurde in einer aktuellen Untersuchung bestätigt. In dieser randomisierten und kontrollierten Ernährungsstudie zeigte sich in Bezug auf die Entwicklung der am Oberarm gemessenen Muskelquerschnittsfläche eine deutliche Überlegenheit der mit Fleisch supplementierten Untersuchungsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe, deren Mahlzeiten einen deutlich geringeren Proteingehalt aufwies (Neumann et al., 2007).

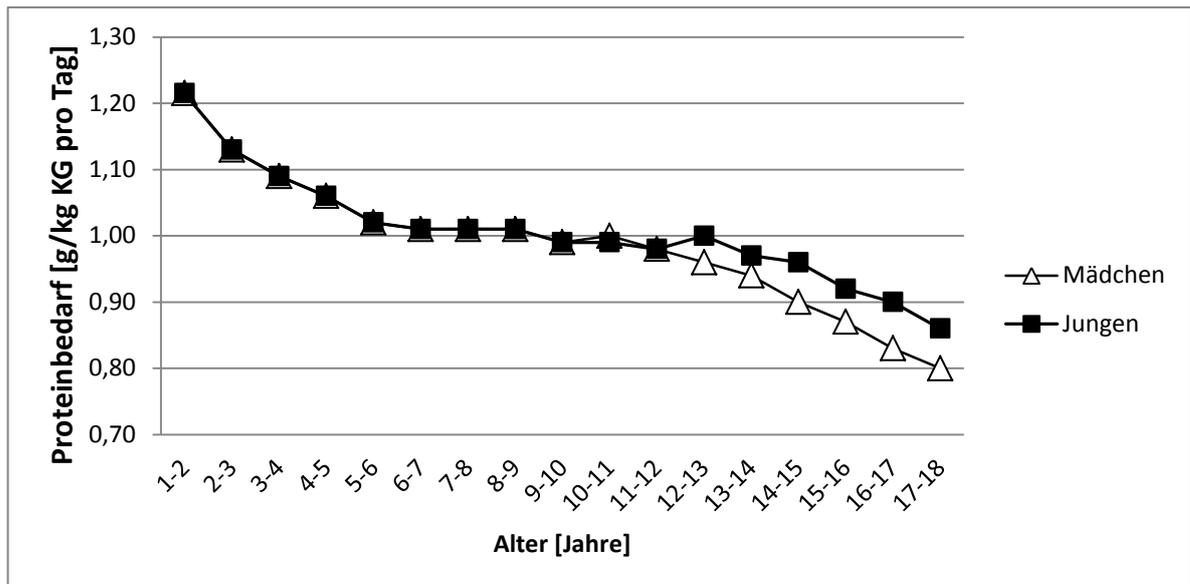


Abb. 13: Proteinbedarf in Gramm pro kg Körpergewicht (nach Alter und Geschlecht) in den ersten beiden Lebensdekaden. Daten von (World Health Organization, 1985).

Aus den beschriebenen Studien ist abzuleiten, dass die Proteinzufuhr einen entscheidenden Einfluss auf die muskuläre Entwicklung ausübt und sich der Proteinbedarf mit zunehmendem Alter vermindert. Auch lässt sich festhalten, dass der Proteinbedarf bei Jungen nach Einsetzen der Pubertät über dem der Mädchen liegt. Zusammenhänge, die sicherlich auch für die krafttrainingsinduzierten Strukturveränderungen der Muskulatur von Bedeutung sind.

6.2.7 Genetik

Nicht zuletzt sei darauf hingewiesen, dass das Muskelwachstum wahrscheinlich stark durch genetische Faktoren bestimmt wird. So konnte beispielsweise eine Arbeit von Livshits et al. zeigen, dass die mittels Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA / DEXA) gemessene magere Körpermasse (Lean Body Mass = LBM) eine ausgeprägte Vererbbarkeit aufweist mit Genlokationen auf Chromosom 12 (bes. 12q24.32) und 14 (bes. 14q22.3) (Livshits et al., 2007). Auch die Ergebnisse umfangreicher Zwillingsstudien zur Vererbbarkeit der Körperbautypen (Ektomorph, Mesomorph, Endomorph), welche eng mit dem Muskelwachstum verknüpft sind, untermauern die Bedeutung der genetischen Komponente für die Entwicklung der Muskulatur (Li et al., 2006; Peeters et al., 2003; Peeters et al., 2007; Reis et al., 2007). Die Werte für Jungen liegen dabei im Mittel zwischen 0,21 bis 0,88, 0,46 bis 0,76 und 0,16 bis 0,73 für Endo-, Meso- und Ektomorphie und die entsprechenden Werte für Mädchen bei 0,76 bis 0,89, 0,36 bis 0,57 und 0,57 bis 0,76 (Peeters et al., 2003).

6.3 Muskelarchitektur und biomechanische Einflussfaktoren

6.3.1 Fiederungswinkel

Neben der beschriebenen wachstumsabhängigen Zunahme der Gesamtmuskelmasse, zählen Änderungen der Muskelfaserarchitektur zu den eingangs erwähnten strukturellen Faktoren, welche die physiologische Muskelkraftentwicklung möglicherweise beeinflussen könnten. So wurde beispielsweise mit Hilfe von Ultraschalluntersuchungen bereits in mehreren Studien gezeigt, dass der Fiederungswinkel⁶ mit zunehmendem Alter in vielen Muskeln ansteigt (Binzoni et al., 2001; Blimkie und Sale, 1998; Kurihara et al., 2007), wenngleich er in anderen Muskeln scheinbar unverändert bleibt (Kubo et al., 2001; O'Brien et al., 2010). Mit zunehmendem Winkel lässt dabei die Zugwirkung der einzelnen Muskelfasern auf die Sehne nach (Hollmann und Hettinger, 2000). Es kommt demzufolge bei einigen Muskeln im Rahmen der Entwicklung zu einer verminderten Kraftproduktion pro Quadratzentimeter der anatomischen muskulären Querschnittsfläche. Da jedoch durch den steigende Fiederungswinkel mehr Muskelfasern an der jeweiligen Sehne ansetzen können, ist die an der Sehne angreifende Kraft bei gleichem Muskelvolumen größer, als bei niedrigeren Fiederungswinkeln (Fleck und Kraemer, 2004). Zieht man zu diesen Überlegungen allerdings die Erkenntnis hinzu, dass die Anzahl der Muskelfasern bereits zum Zeitpunkt der Geburt weitestgehend determiniert ist, stellt sich die Frage, in welcher Form der so geschaffene Platzgewinn im Rahmen der Reifeentwicklung genutzt wird. Denkbar ist beispielsweise, dass nicht die Zahl der Muskelfasern sondern lediglich die Anzahl der Sarcomere pro definierten Sehnenabschnitt steigt.

Betrachtet man den altersabhängigen Verlauf der Winkeländerung beispielsweise in der Wadenmuskulatur, so zeigt sich nach Binzoni et al. ein charakteristisches Muster (Binzoni et al., 2001): Der zunächst monotone Anstieg mit dem Lebensalter erreicht in etwa zum Zeitpunkt der Adoleszenz einen stabilen Wert, welcher über die nachfolgenden Jahrzehnte verhältnismäßig konstant bleibt (siehe *Abb. 14*).

⁶ Der Fiederungswinkel/ Insertionswinkel als Kenngröße für das Verhältnis von Kraft und Verkürzungsfähigkeit beschreibt den Winkel zwischen der einzelnen Muskelfasern und der kraftgenerierenden Achse (Lieber und Friden, 2000).

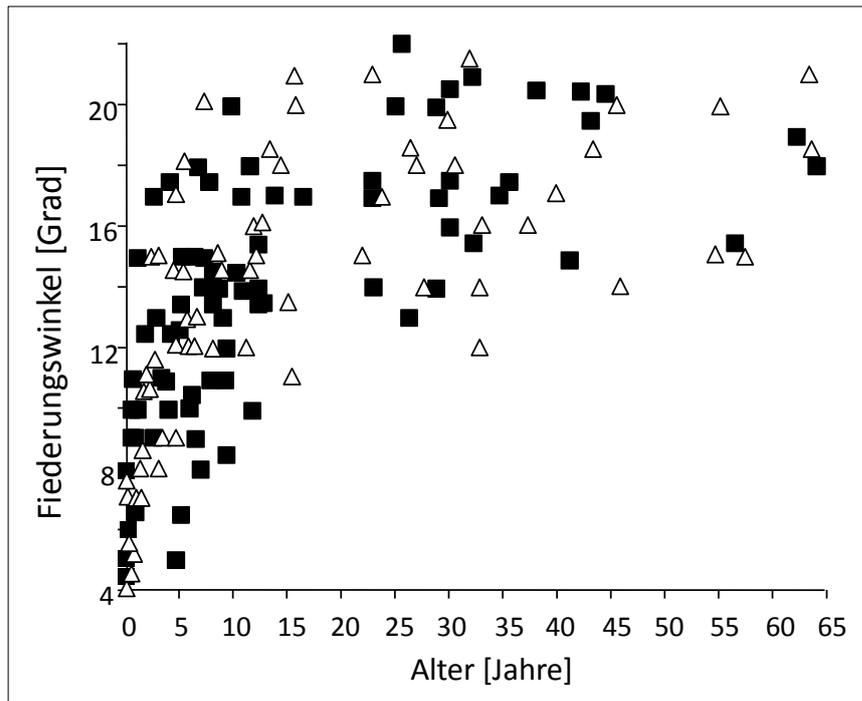


Abb. 14: Veränderung des Fiederungswinkels des *M. gastrocnemius medialis* in Abhängigkeit Alter (\triangle = weiblich, \blacksquare = männlich). Abbildung nach (Binzoni et al., 2001).

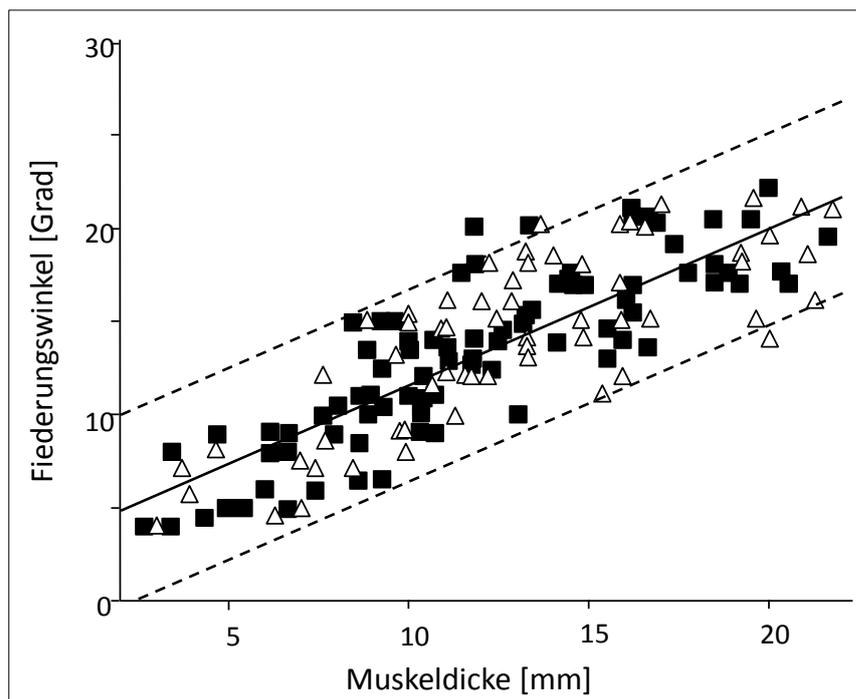


Abb. 15: Veränderung des Fiederungswinkels des *M. gastrocnemius medialis* in Abhängigkeit der Muskeldicke (\triangle = weiblich, \blacksquare = männlich). Abbildung nach (Binzoni et al., 2001).

Es ist jedoch anzumerken, dass nur ein Teil der interindividuellen Varianz durch das kalendarische Alter erklärt werden kann (Legerlotz et al., 2010). Vielmehr scheint die Entwicklung des Fiederungswinkels in einem direkten Verhältnis zur Muskelhypertrophie zu stehen (Hollmann und Hettinger, 2000). Binzoni et al., welche die Fiederungswinkel des M. gastrocnemius bei 162 Probanden (96 männlich und 66 weiblich) im Alter von 0 - 70 Jahren sonographisch untersuchten fanden für diese beiden Variablen die signifikant ($p < 0,05$) lineare Beziehung von (Binzoni et al., 2001):

$$\text{Fiederungswinkel} = 0,84 (\pm 0,09) * \text{Muskeldicke} + 3,15 (\pm 1,13).$$

Sowohl die Werte der Männer als auch die Werte der Frauen standen dabei in einem linearen Verhältnis zur Muskeldicke ($p < 0,05$) (siehe Abb. 15). Durch diese direkte Abhängigkeit, ist die Veränderung des Fiederungswinkels nicht klar von dem zuvor besprochenen Muskelwachstum abzugrenzen und wäre folglich nicht als eigenständige strukturelle Moderatorvariable zu bewerten. Die eingangs erwähnten Untersuchungen, bei denen keine altersabhängige Veränderung des Fiederungswinkels gefunden werden konnte (Kubo et al., 2001; O'Brien et al., 2010), trotz zunehmender Muskeldicke, machen deutlich, dass diese Aussage zumindest nicht für alle Muskelgruppen Gültigkeit hat. So konstatieren O'Brien et al., dass die im Rahmen der Reifeentwicklung zu beobachtende Längenzunahme der Sehne eine ausgeprägtere Parallelschaltung von Sarcomeren erlaubt, ohne dabei den Fiederungswinkel zu erhöhen:

„[...] muscle lengthening [with maturation] creating space for the addition of parallel sarcomers along the length of the aponeurosis, unlike hypertrophy in intervention models when the additional attachment area is acquired by increasing pennation angle.“ (O'Brien et al., 2010).

Auch stellt sich die Frage, wie groß der Einfluss einer Änderung des Fiederungswinkels auf die generierbare Kraft ist. Aus der Formel zur Berechnung der Sehnenkraft (Sehnenkraft = Faszikelkraft \times cos Fiederungswinkel) lässt sich ableiten, dass selbst verhältnismäßig große Unterschiede im Fiederungswinkel mit nur geringen Kraftveränderungen in der Sehne einhergehen - vorausgesetzt andere architektonische Fasereigenschaften bleiben konstant. So konnten Morse et al. zeigen, dass die von ihnen gemessene 21%ige Differenz des Fiederungswinkels zwischen Erwachsenen und Kindern nur 3% der Kraftunterschiede erklären (Morse et al., 2008).

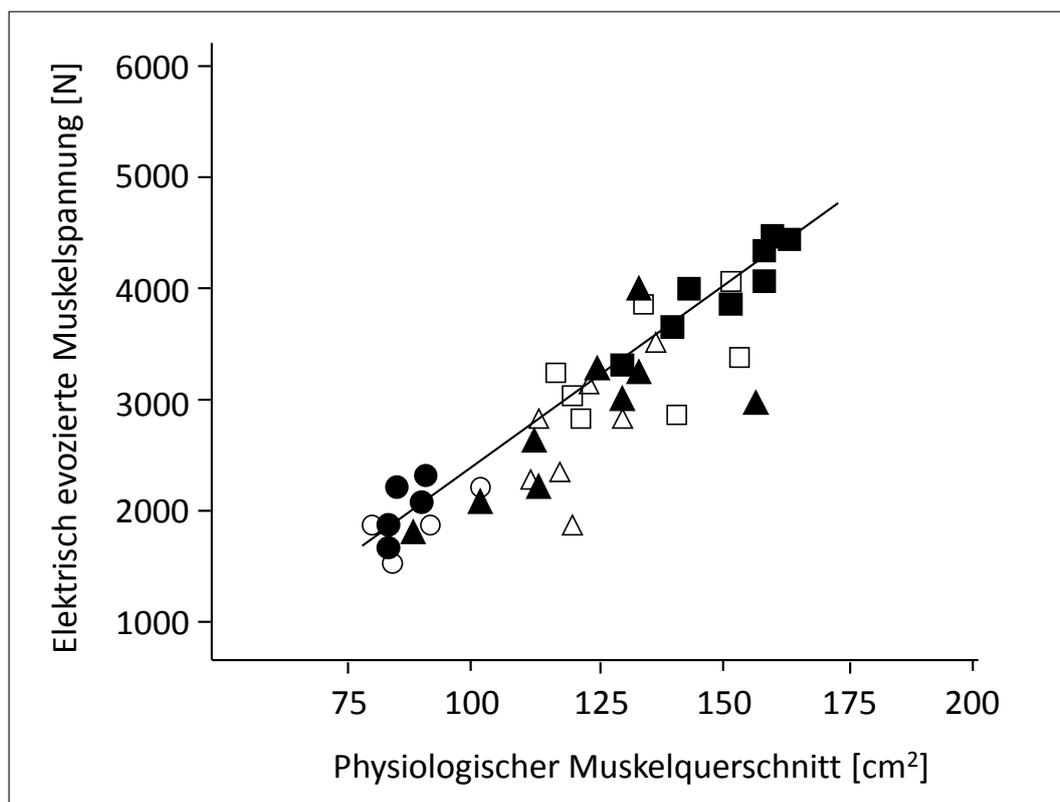
6.3.2 Physiologische Querschnittsfläche

Unabhängig davon bleibt jedoch festzuhalten, dass die physiologische Querschnittsfläche (= PCSA) mit steigendem Fiederungswinkel stärker zunimmt als das Volumen des Muskels (MacIntosh et al., 2006) und eine Normierung der Kraft auf die anatomische Querschnittsfläche (= ACSA) dieses Phänomen nicht berücksichtigen kann. Dieser Zusammenhang erklärt möglicherweise auch die bereits mehrfach beobachteten Unterschiede in der Kraftproduktion pro ACSA zwischen verschiedenen Altersgruppen. Steigt wie oben besprochen der Fiederungswinkel mit zunehmendem Alter an, fällt die auf den anatomischen Muskelquerschnitt normierte Kraft größer aus als bei Muskeln jüngerer Individuen. So fanden Kanehisa et al. (Kanehisa et al., 1995) und Deighan et al. (Deighan et al., 2006) höhere isokinetische Kraftwerte pro ACSA für Jugendliche (13 bzw. 16 Jahre) als für die von ihnen untersuchten Kindern (7 bzw. 9 Jahre). Kanehisa et al. untersuchten in der genannten Studie die Kraft der Plantarflexoren und der Dorsalextensoren des oberen Sprunggelenkes, während Deighan et al. die Flexoren und Extensoren des Ellenbogengelenkes untersuchten. Auch die bereits von mehreren Autoren beschriebene moderat positive Korrelation zwischen Alter und Kraft pro ACSA ($r = 0,57$ bis $0,85$) ist wahrscheinlich zumindest teilweise durch die Diskrepanz zwischen dem physiologischen und anatomischen Muskelquerschnitt zu erklären (De Ste Croix, 2007). Auf neuromuskuläre Faktoren, die ebenfalls einen Einfluss auf diesen Zusammenhang ausüben, wird später vertieft eingegangen.

Aus diesen Erkenntnissen lässt sich ableiten, dass die physiologische Querschnittsfläche die geeignetere Variable zur Abschätzung der möglichen Kraftproduktion eines Muskels darstellt als die ACSA (Morse et al., 2008). Nach Lieber und Fridén ist die PCSA der einzige architektonische Parameter, welcher direkt proportional zu der maximalen tetanischen Kraft ist, welche vom Muskel erzeugt werden kann (Lieber und Friden, 2000). Technisch ist die PCSA in vivo jedoch nur schwer bestimmbar und bislang liegen diesbezüglich nur wenige Daten für Kinder und Jugendliche vor (De Ste Croix, 2007).

Davies et al., welche die elektrisch evozierbare Muskelkraft pro physiologische Querschnittsfläche in drei verschiedenen Altersgruppen untersuchten (neun- bis elfjähriger Kinder, 14 jährige Kinder und Erwachsene), kamen zu dem Ergebnis, dass sich die so generierte Kraft für beide Geschlechter über alle Altersstufen linear ($r = 0,86$; siehe

Abb. 16) zur physiologischen Querschnittsfläche verhielt (Davies, 1985). Alters- und geschlechtsspezifische Unterschiede konnten nach Normierung auf die physiologische Muskelquerschnittsfläche nicht mehr nachgewiesen werden. Wurde die maximale willkürlich erbrachte Muskelspannung in Relation zur PCSA gesetzt, ergab sich ein noch höherer Korrelationskoeffizient von $r = 0,92$. Diese Daten weisen darauf hin, dass muskelgrößenbezogene Variablen, wie die physiologische Querschnittsfläche des Muskels, als geeignete Normierungsfaktoren einzustufen



sind.

Abb. 16: Darstellung der elektrisch evozierten Kontraktionskraft des *M. triceps surae* im Verhältnis zur physiologischen Querschnittsfläche des *M. triceps surae*. (● = männlich, 11 Jahre; ○ = weiblich, 11 Jahre; ▲ = männlich, 14 Jahre; △ =

weiblich, 14 Jahre; ■ = männlich, erwachsen; □ = weiblich, erwachsen).
Abbildung nach (Davies, 1985).

Morse et al. untersuchten in diesem Zusammenhang die spezifische Kraft und architektonische Eigenschaften des lateralen Gastrocnemius bei frühpubertären Jungen ($n = 11$, Alter = $10,9 \pm 0,3$ Jahre, Tanner-Stadium 2) sowie bei erwachsenen Männern ($n = 12$, Alter = $25,3 \pm 4,4$ Jahre) (Morse et al., 2008). Im Rahmen dieser Studie konnte gezeigt werden, dass bei den untersuchten Kindern das Drehmoment der Plantarflexion um 56 % und der physiologische Muskelquerschnitt um 52 % niedriger lag als bei den erwachsenen Probanden. Wurde die erzeugte Kraft auf die anatomische Querschnittsfläche des untersuchten Muskels normiert, so verschwanden die Unterschiede zwischen Erwachsenen und Kindern in Bezug auf die gemessene Kraft.

Kritisch zu hinterfragen ist sicherlich auch, wie zuverlässig die genannte Methode zur Bestimmung des Insertionswinkels ist. Während die Reliabilität der sonographischen Erfassung der Muskelfaserarchitektur für das Erwachsenenalter bereits vor über zehn Jahren überprüft wurde, waren vergleichbare Untersuchungen für das Kindes- und Jugendalter lange Zeit nicht verfügbar. Erst eine kürzlich veröffentlichte Studie von Legerlotz et al. untersuchte die Reliabilität der ultraschallgestützten Insertionswinkelbestimmung explizit für Kinder und kamen zu dem Ergebnis, dass die genannte Methode auch in dieser Altersgruppe als reliabel einzustufen ist (Legerlotz et al., 2010). Hierzu wurden die Insertionswinkel von 21 Kindern (13 Jungen und 8 Mädchen) im Alter von vier bis zehn Jahren in einem Abstand von vier bis sechs Wochen in verschiedenen Gelenkpositionen des oberen Sprunggelenkes je zweifach bestimmt und miteinander verglichen. Der Intraklassenkorrelationskoeffizient (ICC) und der Variationskoeffizient für die Bestimmung des Fiederungswinkels lagen in der genannten Studie bei 0,85 - 0,96 bzw. 4,1 % - 6 %. Lieber und Fridén weisen hingegen darauf hin, dass die Mehrheit der menschlichen Muskeln keinen konstanten, sondern einen stark variierenden Fiederungswinkel aufweisen und eine Bestimmung desgleichen via MRT, CT oder Ultraschall diese Variation nicht berücksichtigen kann (Lieber und Friden, 2000).

6.3.3 Muskelfaserzusammensetzung

Zu der Gruppe der strukturellen Einflussgrößen auf die Muskelkraftentwicklung ist auch die Muskelfaserzusammensetzung zu zählen. So ist aus Studien mit isolierten und gehäuteten Muskelfasern bekannt, dass die maximale Kraft pro Einzelzuckung bei Typ-II Fasern mit ca. 1,2 mN höher liegt als die der Typ-I Fasern (ca. 0,8 mN) (Malisoux et al., 2007). Demnach würde eine reifebedingte Verschiebung

in der Muskelfaserzusammensetzung mit einer veränderten Kraftproduktion pro cm^2 der PCSA einhergehen.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich die oben genannten Kraftwerte jeweils auf eine Muskelfaser des jeweiligen Typs (FTF / STF) beziehen, welche sich in der zitierten Studie deutlich im Durchmesser unterschieden. So lag die mittlere Querschnittsfläche der FTFs bei rund $7000 \mu\text{m}^2$ und die der STFs bei etwa $5000 \mu\text{m}^2$ (Malisoux et al., 2007). Dennoch bleibt auch bei Normierung auf die Querschnittsfläche eine leichte Überlegenheit bezüglich der Kraftproduktion für die Typ-II Fasern ($171 \text{ kN} / \text{m}^2$ vs. $160 \text{ kN} / \text{m}^2$). Deutlichere Unterschiede in der Kraft pro Querschnittsfläche fanden Widrick et al., welche für die Fasern des Typs IIx im Mittel $170 \text{ kN} / \text{m}^2$, für die des Typs IIA $156 \text{ kN} / \text{m}^2$ und für die Fasern des Typs I $143 \text{ kN} / \text{m}^2$ (Widrick et al., 1996). Ob diese Unterschiede auch bei kindlichen Muskelfasern gleichermaßen ausgeprägt sind, ist bislang jedoch ungeklärt. Auch bleibt zu erwähnen, dass die beschriebenen Unterschiede nicht von allen Studien gefunden werden konnten (Larsson und Moss, 1993).

Daten über die Faserzusammensetzung der kindlichen Muskulatur sind jedoch äußerst selten. Einer Autopsiestudie von Lexell et al. zu Folge besteht eine hochsignifikante negative Korrelation zwischen chronologischem Alter und dem Typ-I Faseranteil des M. vastus lateralis mit entsprechendem Anstieg des Typ-II Anteils (Lexell et al., 1992). Bei den zuvor gesunden 22 männlichen Individuen, im Alter zwischen 5 und 37 Jahren, konnte mit Hilfe einer enzymhistochemischen Anfärbung der myofibrillären ATPase gezeigt werden, dass der Anteil der Typ-II Fasern signifikant mit dem Alter ansteigt. So lag der Wert im Alter von fünf Jahren bei etwa 35% und stieg bis zum Alter von 20 Jahren auf etwa 50% an. Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch die wenige Jahre zuvor von Oertel et al. durchgeführten Untersuchung. In dieser, mit 113 Individuen deutlich größer angelegten Studie, zeigte sich für die beiden untersuchten Muskeln (M. deltoideus und M. vastus lateralis) ein Anstieg der Typ-I Fasern in den ersten beiden Lebensjahren, mit einem anschließenden Abfall in den darauffolgenden Jahren (Oertel, 1988)(siehe

Abb. 17: Anteil der Typ-I Fasern im M. deltoideus von 113 Individuen im Alter von 0 bis 20 Jahren. Abbildung). Die Ursache für diese Verschiebung ist derzeit noch nicht geklärt. Die relative Verteilung der einzelnen Typ II Subtypen bleibt jedoch offenbar während der Entwicklung konstant. So zeigte eine Arbeitsgruppe um Bell et al., dass die Zusammensetzung der FTF-Subtypen zwischen sechsjährigen Kindern und Erwachsenen annähernd gleich ist (Bell et al., 1980).

Die im Erwachsenenalter nachgewiesenen geschlechtsspezifischen Unterschiede in Bezug auf die Prädominanz eines Fasertyps weisen darauf hin, dass es im

Rahmen des Reifeprozesses zu unterschiedlichen Wachstumsgeschwindigkeiten der einzelnen Faserarten kommen muss. So ist bekannt, dass die größten Fasern bei Frauen dem Typ I zugeordnet werden können, wohingegen bei Männern Fasern vom Typ IIA den größten Teil der muskulären Querschnittsfläche einnehmen (Staron et al., 2000).

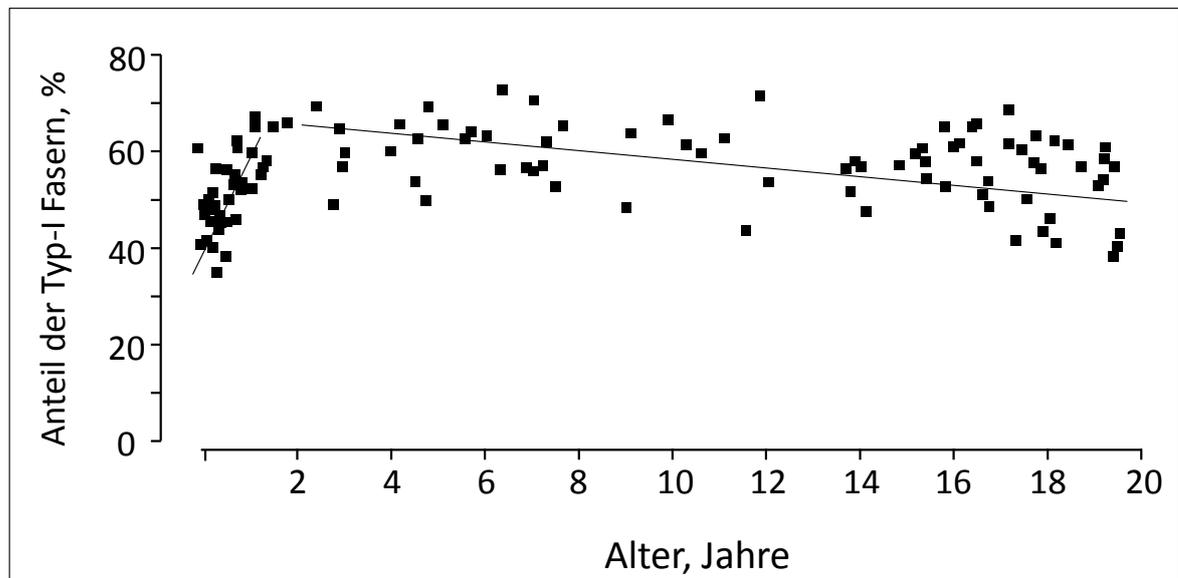


Abb. 17: Anteil der Typ-I Fasern im M. deltoideus von 113 Individuen im Alter von 0 bis 20 Jahren. Abbildung modifiziert nach (Oertel, 1988).

Neben der Bestimmung der Muskelfaserzusammensetzung via Autopsiestudien besteht die Möglichkeit, die Zusammensetzung der Muskelfasertypen über die Zeit bis zur maximalen Twitch-induzierten Einzelspannung abzuschätzen, da die verschiedenen Fasertypen diesbezüglich unterschiedliche Muster zeigen (De Ste Croix, 2007). Davies et al. fanden unter Verwendung dieser Methode keine signifikanten Unterschiede zwischen drei Jahre alten Kindern und 25 Jahre alten Erwachsenen, was auf eine unveränderte Muskelfaserzusammensetzung hindeutet (Davies et al., 1983).

6.3.4 Veränderungen des Hebelarmes

Neben den genannten intrinsischen Einflussgrößen mit Wirkung auf die Muskelkraftentwicklung existieren auch extrinsische biomechanische Faktoren, welche einen Teil der Kraftvarianz aufklären können (Wood et al., 2006). Dazu zählt insbesondere der mit dem Muskelansatz variierende Hebelarm der Muskulatur. Je weiter sich der anatomische Ansatzpunkt des jeweiligen Muskels dabei vom ent-

sprechenden Gelenk entfernt, desto größer ist bei gleichbleibender Kontraktionskraft das am Gelenk erzeugbare Drehmoment.

Eine in diesem Zusammenhang von der Arbeitsgruppe um Wood durchgeführte Untersuchung von 38 präpubertären Kindern im Alter von 9,6 Jahren ($\pm 0,3$) konnte zeigen, dass 19% der Varianz der isometrisch gemessenen Kraft (bei 90° Flexion) durch interindividuelle Längenunterschiede des Kraftarmes erklärt werden können (Wood et al., 2006). Derartige Ergebnisse machen deutlich, wie wichtig die Berücksichtigung biomechanischer Einflussgrößen bei der Interpretation der physiologischen Muskelkraftentwicklung ist.

Am Beispiel des M. quadriceps femoris fanden O'Brien et al. über die von ihnen untersuchten Winkelstellungen einen im Mittel um ca. 20% größeren Kraftarm der Patellarsehne (PTMA) bei Erwachsenen (10 Männer und 10 Frauen, 28, $1 \pm 3,7$ Jahre) als bei Kindern (10 Jungen und 10 Mädchen; 9,1 $\pm 0,8$ Jahre) (O'Brien et al., 2009). Da dieser Hebelarm bei Kindern durch einfache anthropometrische Messungen abgeschätzt werden konnte ($PTMA = -0,25 + 0,083 \times \text{Tibiallänge} + 0,02 \times \text{Beinlänge}$; ($R^2 = 0.83$)), nicht aber bei Erwachsenen, betonen O'Brien et al., dass es sich bei dem Beinstrecker-Mechanismus präpubertärer Kinder keinesfalls nur um eine „verkleinerte Version“ von Erwachsenen handeln würde.

6.4 Endokrine Steuerung

Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt, sind strukturelle und endokrine Elemente im Rahmen der reifebedingten Muskelkraftentwicklung nur schwer voneinander zu trennen. Die massiven hormonellen Veränderungen im Zuge des physiologischen Reifungsprozesses, insbesondere während der Pubertät, beinhalten dabei vor allem einen rapiden Anstieg anaboler Hormone (Rogol, 2010). Ihr Einfluss auf die Muskelkraftentwicklung über eine Zunahme der kontraktilen Masse ist dabei naheliegend. Insbesondere die Sexualhormone scheinen in diesem Zusammenhang von zentraler Bedeutung zu sein. Aber auch bereits vor der Pubertät, ohne nennenswerte Sexualhormonspiegel, stehen dem im Reifeprozess befindlichen Organismus eine Reihe hochwirksamer Hormone für das muskuläre Wachstum zur Verfügung. Im Folgenden soll auf einzelne Hormone näher eingegangen und ihre Bedeutung für die physiologische Muskelkraftentwicklung erörtert werden.

6.4.1 Testosteron

Testosteron gilt als wichtigster hormoneller Promotor für das Muskelwachstum und dem damit einhergehenden Anstieg der Muskelkraft (Vingren et al., 2010). Seine

anabole Wirkung entfaltet das Hormon dabei über eine Interaktion mit intrazellulären Androgenrezeptoren der Muskelfasern und der damit verbundenen Aktivierung der Proteinbiosynthese. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass Testosteron die Zahl der muskulären Satellitenzellen erhöht, welche sich zu Myoblasten umwandeln und damit die bereits beschriebene Vermehrung der Myonuclei in großen Muskelfasern bedingt (Bhasin et al., 2003; Herbst und Bhasin, 2004; Solomon und Bouloux, 2006). Die Effekte physiologischer Testosteronkonzentrationen sind jedoch weit weniger erforscht als die der enormen Mengen, welche im Rahmen des Steroidabusus aufgenommen werden (Jones und Round, 2008).

Den fundamentalen Beitrag dieser Einflussgröße am physiologischen Muskelwachstum lässt sich jedoch insbesondere bei angeborenen Hormonmangelsyndromen beobachten. So zeigen die an dem Klinefelter Syndrom⁷ leidenden Kinder und Jugendlichen aufgrund einer verminderten Testosteronproduktion an einer systemisch verminderten Muskelmasse, welcher effektiv nur durch regelmäßige iatrogene Substitution des fehlenden Hormons entgegengewirkt werden kann (Bhasin et al., 1997; Bojesen et al., 2006). Supplementiert man bei hypogonadalen Jungen physiologische Mengen des männlichen Sexualhormons, so lassen sich ein Wachstum der mageren Körpermasse, eine Steigerung der Gesamtmuskelmasse, eine Hemmung des Proteinbreakdowns und eine erhöhte isokinetische Kraft beobachten (Veldhuis et al., 2005). Mero et al. konnten darüber hinaus bei gesunden Kindern zeigen, dass die Testosteronkonzentration in einem engen Verhältnis zu dem Durchmesser der Muskelfasern steht (Mero et al., 1991). Auch die Muskelkraft scheint nach Untersuchungen von Round et al. durch die zirkulierende Testosteronmenge beeinflusst zu werden (Round et al., 1999): Wird die Kraftdifferenz zwischen Jungen und Mädchen parallel zu der Testosteronkonzentration auf eine Zeitachse aufgetragen, dann zeigt sich ein auffallend ähnlicher Verlauf der beiden Parameter (siehe *Abb. 18*). Daraus lässt sich ableiten, dass die geschlechtsspezifischen Unterschiede, welche mit Einsetzen der Pubertät voll zum Tragen kommen, vermutlich maßgeblich durch die zirkulierende Testosteronmenge bestimmt werden.

⁷ Primärer hypergonadotroper Hypogonadismus, benannt nach dem US-Amerikaner Harry Fitch Klinefelter (1912 - 1990) (Pschyrembel, 2002).

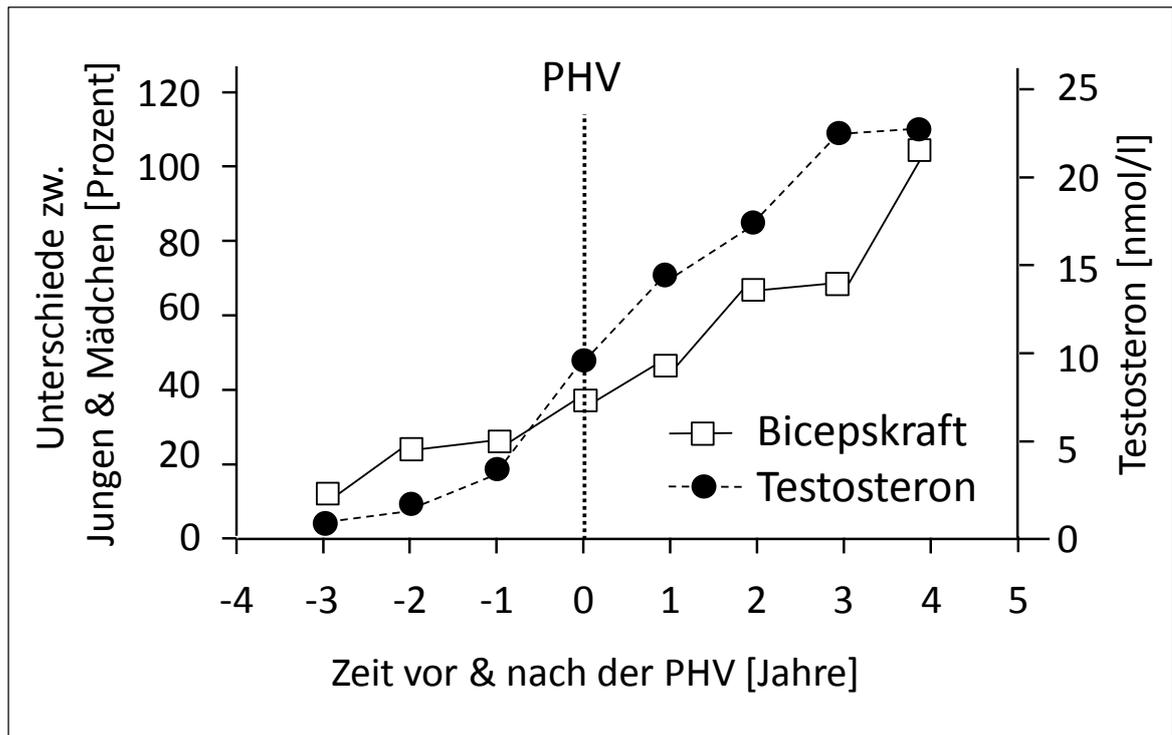


Abb. 18: Steigende Bicepskraft und Testosteronkonzentration in Jungen in einem Zeitraum von drei Jahren vor und vier Jahren nach der maximalen Wachstumsgeschwindigkeit (Peak Height Velocity = PHV). Die Kraft des Biceps ist dargestellt in Prozent der weiblichen Vergleichsgruppe. Abbildung nach (Jones und Round, 2008) und (Round et al., 1999).

Die zentrale Stellung für die Genese und den Erhalt der Muskulatur ist jedoch nicht auf die ersten beiden Lebensdekaden beschränkt, sondern erstreckt sich offenbar über die komplette Lebensspanne. So konnte in mehreren epidemiologischen Studien dargelegt werden, dass Männer mit niedrigerem Testosteronspiegel eine geringere appendikuläre Muskelmasse aufwiesen (Roy et al., 2002; Szulc et al., 2003; van den Beld et al., 2000). Elmlinger et al., welche die Testosteronkonzentration von Geburt bis ins hohe Alter untersuchten, konnten zeigen, dass mit Einsetzen der Pubertät ein steiler Anstieg der zirkulierenden Testosteronkonzentration zu verzeichnen ist, der etwa im Alter von 17 Jahren sein Maximum erreicht (Elmlinger et al., 2005). Bei Jungen kommt es dabei zu einem >20fachen Anstieg, während bei den Mädchen lediglich eine Verdopplung des Ausgangswertes zu beobachten ist. Dieser Anstieg, so Elmlinger et al. weiter, wird begleitet von einem Rückgang des SHBG⁸ - Spiegels im Blut, wodurch der ungebundene und damit biologisch aktive Anteil des Testosterons weiter ansteigt. Da auch der genannte Rückgang des Bindungsglobulins bei männlichen Jugendlichen stärker ausgeprägt ist als bei weiblichen, nimmt die geschlechtsspezifische Differenz in Bezug auf den Effekt von Testosteron im Rahmen der Reifeentwicklung weiter zu. Dennoch ist

⁸ Sexualhormon-bindendes Globulin

darauf hinzuweisen, dass die Testosteronkonzentration bei Jungen zwar stärker ansteigt als bei Mädchen, jedoch auch beim weiblichen Geschlecht mit jeder Tanner-Stufe eine höhere Testosteronkonzentration gemessen werden kann (Meikle et al., 2007). Bereits präpubertär nachweisbare geschlechtsspezifische Differenzen der Testosteronkonzentration ohne nennenswerte Kraftunterschiede sowie der auch bei Mädchen zu beobachtende altersabhängige Kraftanstieg weisen darüber hinaus darauf hin, dass Testosteron nicht die einzige erklärende Variable in der physiologischen Kraftentwicklung sein kann (Ramos et al., 1998). Auch Garnett et al. fanden für den präpubertären Bereich eine nur schwach positive Korrelation zwischen Testosteronkonzentration und fettfreier Weichteilmasse ($r = 0,187$; $p < 0,01$) (Garnett et al., 2004).

Während diese Ergebnisse wenig überraschen, konnte unter Verwendung einer neuen ultrasensitiven Methode (Gaschromatographie - Tandem-Massenspektrometrie) in einer aktuellen Studie bei präpubertären Mädchen höhere Konzentrationen androgener Metabolite im Blut gefunden werden, als bei gleichaltrige Jungen (Courant et al., 2010). Wenngleich diese Stoffwechselprodukte nicht die biologische Aktivität des jeweiligen Hormons aufweisen, sind sie jedoch zumindest als Hinweis auf die entsprechende Steroidproduktion zu werten. Der Widerspruch zu den zuvor beschriebenen geschlechtsspezifischen Angaben sowie die große Varianz der Ergebnisse vergleichbarer Studien (Gassler et al., 2000; Gupta et al., 1975; Mitamura et al., 1999; Mitamura et al., 2000), erklärt sich aus Sicht der Autoren durch Differenzen in der Sensitivität des verwendeten Verfahrens (Courant et al., 2010).

Round et al. welche den Einfluss hormoneller Faktoren auf die geschlechtsspezifischen Unterschiede in der Kraftentwicklung in einer longitudinalen Studie bei 100 Kindern (50 Jungen und 50 Mädchen) im Alter zwischen 8 und 17 Jahren untersuchten, fanden, dass sich die Kraft der Mädchen proportional zu Körpergewicht und –größe entwickelte (Round et al., 1999). Im Gegensatz dazu ließ sich die Zunahme der Muskelkraft bei den untersuchten männlichen Probanden nicht komplett durch die beiden genannten biometrischen Variablen erklären. Round et al. gehen demzufolge davon aus, dass der Effekt von Testosteron auf die Muskelkraftentwicklung über die Stimulation des Muskelwachstums hinausgeht.

Aus Tierexperimenten ist bekannt, dass Testosteron neben der Hypertrophie der Muskelfasern auch auf metabolisch relevante Kenngrößen der Muskelzelle wirkt und mit einer Erhöhung der intrazellulären Lipidtröpfchen und Glycogenpartikel einhergeht. Weiterhin konnte in diesen Versuchen ein Anstieg der Ribosomendichte und eine vermehrte Teilung der Myofibrillen beobachtet werden (Ramos et al., 1998). In wie weit diese Veränderungen im Rahmen der physiologischen Muskel-

entwicklung durch Testosteron gesteuert werden und wie groß ihr Einfluss auf die Muskelkraft ist, wurde bislang nicht untersucht.

6.4.2 Östrogene

Die weiblichen Sexualhormone spielen im Rahmen der Pubertät eine entscheidende Rolle. Insbesondere ihre Wirkung auf die weibliche Fettverteilung ist für die Pubertät gut belegt (Loomba-Albrecht und Styne, 2009; Wells, 2007). Verglichen mit den Androgenen, ist ihre Bedeutung im Rahmen des physiologischen Muskelwachstums hingegen deutlich schlechter erforscht. Untersuchungen mit ovariectomierten Ratten lassen jedoch einen hemmenden Einfluss der Östrogene auf die muskuläre Proteinsynthese und damit auf das physiologische Muskelwachstum vermuten (Tipton, 2001). Blieb nämlich der Einfluss der ovariellen Hormone durch den genannten operativen Eingriff aus, so ließ sich ein stärkeres Wachstum der fettfreien Masse beobachten, als bei den Tieren, welche nach dem Eingriff mit den entsprechenden Hormonen substituiert wurden (Toth et al., 2001).

Eine Untersuchung zu dem Einfluss von Östrogenen auf den Proteinstoffwechsel von präpubertären Mädchen aus dem Jahr 1995 kam zu ähnlichen Ergebnissen (Mauras, 1995). Es fand sich zwar keine östrogenbedingte Hemmung des Muskelwachstums, jedoch konnten keine anabolen Effekte durch die orale oder parenterale Estradiolgabe⁹ nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse verwundern insofern, als dass die steigenden Steroidkonzentrationen, insbesondere die der Östrogene, mit einer Stimulation der GH-Produktion assoziiert sind, welche die anabole GH/ IGF-1 Achse aktiviert (s.u.) (Christoforidis et al., 2005). Somit wäre zumindest eine indirekte Stimulation des Muskelwachstums durch Estradiolgabe denkbar gewesen. Auch in der Studie von Mauras stieg die IGF-1 Konzentration der untersuchten Probanden durch die Applikation von Estradiol an ohne dabei anabole Effekte auszulösen. Östrogene scheinen diesen Ergebnissen nach keinen entscheidenden Einfluss auf den Proteinumsatz im Rahmen der Reifeentwicklung auszuüben, was sich mit der geschlechtsspezifischen Muskelmassenentwicklung weitgehend deckt. Bei der Interpretation der Daten von Mauras ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich um eine kleine und darüber hinaus heterogene Probandengruppe gehandelt hat, welche unter Störungen des Endokrinen Systems litten (Turner-Syndrom: n = 6; Hypogonadotropismus, n = 1).

Konkordante Ergebnisse lieferte jedoch auch die bereits erwähnte Untersuchung von Garnett et al. (Garnett et al., 2004). Diese an insgesamt 255 gesunden präpu-

⁹ Estradiol gilt als stärkstes natürliches Östrogen, welches vorwiegend in den Eierstöcken gebildet wird (Pschyrembel, 2002).

bertären Kindern (137 Mädchen und 118 Jungen) durchgeführte Studie konnte keinen Bezug zwischen dem Serum-Estradiollevel und der vorhandenen fettfreien Körpermasse finden ($r = -0,072$; $p > 0,05$). Hier ist jedoch einschränkend darauf hinzuweisen, dass es sich um Korrelationen mit äußerst geringen präpubertären Estradiolkonzentrationen ($< 50 \text{ pmol / l}$) handelte und die Übertragbarkeit auf spätere Reifestadien damit kaum möglich sind.

Nach Ansicht von Jones und Round ist eine östrogenbedingte Hemmung des Muskelwachstums unter physiologischen Bedingungen jedoch auch anderweitig erklärbar (Jones und Round, 2000). So gehen diese Autoren davon aus, dass mit steigenden Östrogenkonzentrationen ein frühzeitiges Sistieren des Knochenwachstums mit einem Verlust des weiter oben beschriebenen Längenwachstumsreizes für die Muskulatur einhergeht.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die weiblichen Sexualhormone im Rahmen des physiologischen Muskelwachstums eine untergeordnete Rolle spielen. Aufgrund der schlechten Datenlage ist diese Einschätzung jedoch nur wenig belastbar und sollte in weiteren Studien eingehend geprüft werden. So ist insbesondere die östrogenvermittelte Stimulation der Wachstumshormonproduktion ein möglicher aber noch kaum erforschter Weg, über welchen die weiblichen Sexualhormone einen anabolen Einfluss auf die physiologische Muskelmasseentwicklung haben könnten (Christoforidis et al., 2005).

6.4.3 Wachstumshormon (HGH) und Insulin like Growth Factor (IGF-1)

Während die anabole Wirkung der Sexualhormone aufgrund ihrer niedrigen präpubertären Serumkonzentrationen erst in frühen Pubertätsphasen voll zum Tragen kommt, lassen sich für das humane Wachstumshormon (Somatotropin = human growth hormone = HGH) und das damit assoziierte IGF-1 bereits präpubertär biowirksame Hormonspiegel nachweisen (Martha, Jr. et al., 1989). Zu den bedeutenden Wirkungen von HGH gehört insbesondere ein erhöhter Aminosäuren Transport sowie eine erhöhte Stickstoffretention in der Skelettmuskulatur, welches das Wachstum der mageren Muskelmasse fördert (Rowland, 2005). Diese anabolen Effekte entfaltet das Hormon zum einen direkt an den Zielzellen und zum anderen über insulinähnliche Wachstumsfaktoren wie IGF – 1 (siehe *Abb. 19*), deren Synthese in der Leber durch HGH stimuliert wird (Malina et al., 2004). Der simultane Anstieg von HGH und IGF-1 und die damit verbundene Veränderung des hormonellen Milieus gehören nach aktuellen Übersichtsarbeiten zu den zentralen Steuergrößen anaboler Prozesse während der Pubertät (Casazza et al., 2010). Im Gegensatz dazu scheinen supraphysiologische systemische HGH- oder IGF-1-

Konzentrationen keinen anabolen Effekt auf die Skelettmuskulatur zu entfalten (Velloso, 2008). Wodurch diese Wirkungsdivergenz zustande kommt ist bislang ungeklärt.

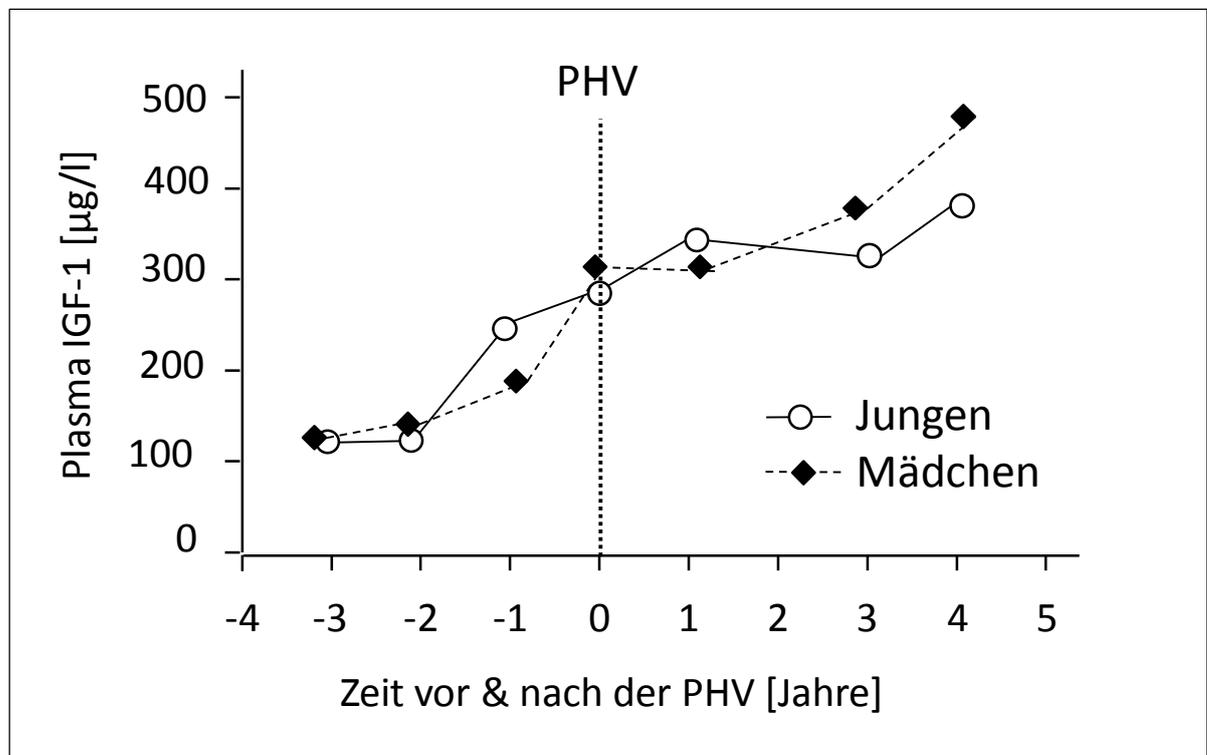


Abb. 19: Steigende Plasma – IGF-1 - Konzentrationen bei Jungen und Mädchen in einem Zeitraum von drei Jahren vor und vier Jahren nach der maximalen Wachstumsgeschwindigkeit (PHV = Peak Height Velocity). Abbildung nach (Jones und Round, 2008).

Die Synthese und Sekretion des Somatotropins im Hypophysenvorderlappen wird gesteuert über den Releasing-Faktor GHRH und über das Somatostatin des Hypothalamus (Malina et al., 2004). Die Freisetzung von HGH folgt dabei einem zirkadianen Rhythmus mit pulsatilen Ausstößen alle zwei Stunden, deren Amplitude in den frühen Morgenstunden ihr Maximum erreicht (Gan und Quinton, 2010). Wie im vorangehenden Kapitel beschrieben besteht ein Zusammenhang zwischen der Höhe der zirkulierenden Sexualhormonkonzentration und der Menge an freigesetztem HGH. Insbesondere im Zeitraum der Pubertät scheint die HGH Sekretion sehr sensitiv gegenüber unterschiedlicher Stimuli zu sein, zu denen auch die Sekretion gonadaler Sexualhormone zählen (Naughton et al., 2000). Beeinflusst wird dabei weniger die Frequenz der Freisetzung, als vielmehr deren Amplitude (Christoforidis et al., 2005). Auch die in späten Pubertätsstadien zu beobachtende Erhöhung der HGH-Freisetzung ist das Resultat größerer Abgabemengen und

nicht die Konsequenz einer veränderten Abgabefrequenz (Martha, Jr. et al., 1989) (siehe Abb. 20).

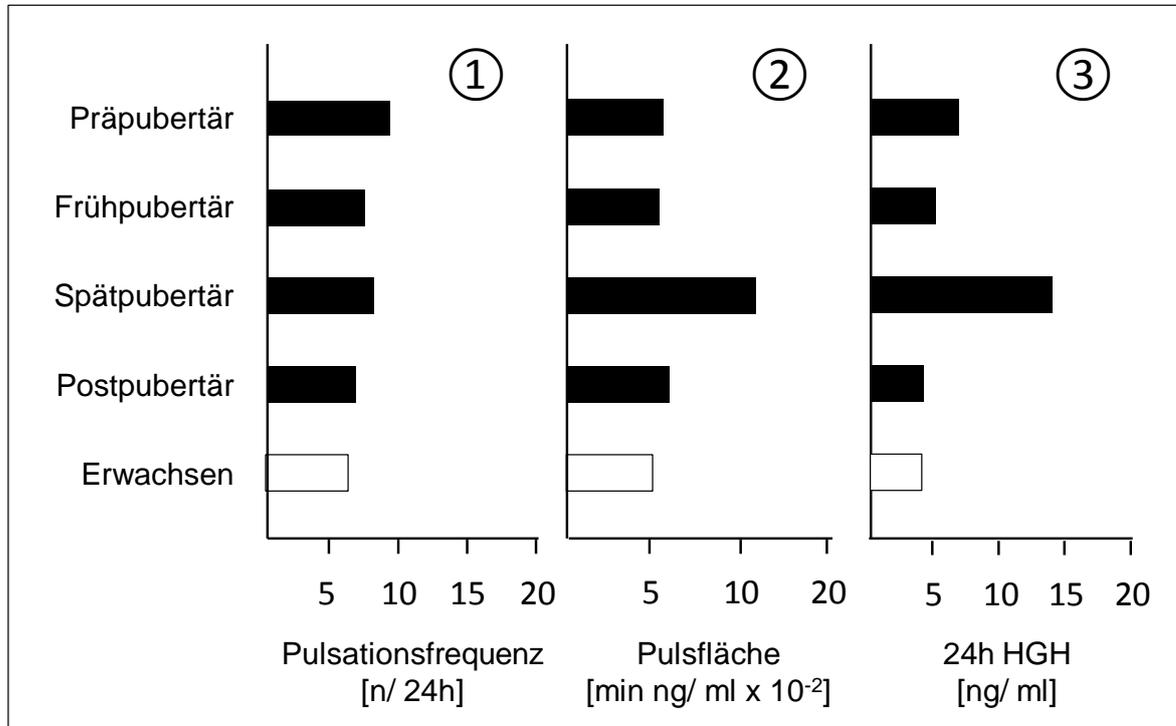


Abb. 20: Wachstumshormonausschüttung in fünf verschiedenen Altersgruppen (präpubertär, frühpubertär, spätpubertär, postpubertär und erwachsen). ① Mittlere Anzahl erfasster HGH Pulse im Zeitraum von 24 Stunden; ② mittlere Fläche unter der HGH-Blutkonzentrationskurve; ③ mittlere 24-Stunden HGH Konzentration. Daten von 60 männlichen Probanden im Alter von 7 – 27 Jahren. Abbildung modifiziert nach (Martha, Jr. et al., 1989)

Das neben den anabolen Effekten der Androgene auch andere Hormone für das physiologische Muskelwachstum von Bedeutung zu sein scheinen, zeigen bereits frühe tierexperimentelle Untersuchungen von Goldberg und Goodman (Goldberg und Goodman, 1969). Die mittels Hypophysenablation bei Mäusen erzeugte Hyposomatotropinämie und der damit einhergehende Wachstumshormonmangel führten bei den untersuchten Labortieren zu einem defizitären Muskelwachstum. Dieser konnte durch Injektionen von Wachstumshormon (GH) wieder normalisiert werden, was die Bedeutung dieses Hormones unter den anderen defizitären Hormonen in Bezug auf das Muskelwachstum hervorhebt. Wie Florini et al. zeigen konnten wirkt das Wachstumshormon dabei nicht nur über die GH-IGF Achse sondern stimuliert das muskuläre Wachstum auch durch einen direkten Effekt an der Muskelzelle (s.o.) (Florini et al., 1996). Werden diese Rezeptoren künstlich eliminiert (GH-Rezeptor Knockout Mäuse), lässt sich bei normaler Faseranzahl ein

vermindertes Muskelwachstum beobachten, welches sich in einer verminderten Muskelquerschnittsfläche (mSCA) äußert (Sotiropoulos et al., 2006). Da jedoch in diesen Versuchstieren auch eine verminderte IGF-1-Konzentration auftrat, ist es schwierig, den isolierten Beitrag des GH-Mangels abzuschätzen. So zeigen Mäuse ohne Expression des IGF-I Rezeptors (IGF-IR) ebenfalls eine verminderte muskuläre Gesamtmasse sowie einen reduzierten Querschnitt pro Muskelfaser (Kim et al., 2005).

Untersuchungen mit 16- bis 21jährigen Patienten, welche unter einem Wachstumshormonmangel litten, unterstreichen die Bedeutung des Wachstumshormons für die Entwicklung der Muskelmasse. So wurde in einer von Hulthén et al. durchgeführten Studie, nach Absetzen der GH-Supplementation ein Rückgang der mageren Körpermasse beobachtet (Hulthen et al., 2001). Auch zeigte die Probandengruppe in dem darauffolgenden Beobachtungszeitraum von vier Jahren keinen alterstypischen Zuwachs der Muskelmasse.

Wenngleich die genannten Ergebnisse aus Tierversuchen und die Beobachtungen bei Wachstumshormonmangelsyndromen darauf hinweisen, dass die GH / IGF-1 Achse einen hypertrophievermittelten Beitrag zur physiologischen Muskelkraftentwicklung liefern, fehlen Erkenntnisse darüber, wie groß dieser Beitrag ist. Zur Klärung dieser Frage für den präpubertären Bereich, untersuchten Garnett et al. neben anderen Hormonen (s.o.) die IGF-1 Konzentrationen im Blut von 255 gesunden Kindern (137 Mädchen und 118 Jungen) (Garnett et al., 2004). Es konnte gezeigt werden, dass bereits bei präpubertären Individuen eine signifikant positive Korrelation zwischen IGF-1 und der fettfreien Körpermasse besteht ($r = 0,223$; $p < 0,001$). Aufgrund seines stark anabolen Effektes wäre es denkbar, dass dieses Hormon einen Teil der bereits präpubertär vorhandenen geschlechtsspezifischen Differenz der Körperzusammensetzung erklären könnte. Demgegenüber steht jedoch die Tatsache, dass die oben genannte Arbeitsgruppe höhere IGF-1 Level für Mädchen gefunden hatte als für Jungen (Garnett et al., 2004). Ein Widerspruch, den die Autoren auf andere, nicht überprüfte reifeabhängige Faktoren zurückführen. Insgesamt konnte IGF-1 in Kombination mit DHEAS¹⁰ und dem Geschlecht als unabhängige Variable 27% der Varianz der Körperzusammensetzung erklären.

Da nur der freie, nicht gebundene Anteil des IGF-1 biologisch aktiv ist, spielen Veränderungen der entsprechenden Bindungsproteine neben der reinen Hormonkonzentration eine ebenfalls bedeutende Rolle, die sich möglicherweise im Rahmen der Reifeentwicklung verändert. Interessanterweise steigt die Serumkonzentration von IGF-1 (Velloso, 2008) sowie das Verhältnis von IGF-1 zu dem Bin-

¹⁰ Das Steroidhormon Dehydroepiandrosteron (= DHEA) ist eine Vorstufe für die männlichen und weiblichen Sexualhormone (Srinivasan und Premkumar, 2011).

dungsprotein IGFBP-3 mit zunehmendem Reifestadium (Kanbur-Oksuz et al., 2004).

Abschließend bleibt zu sagen, dass sowohl GH und IGF-I eine bedeutende Rolle in der prä- und postnatalen Muskelentwicklung spielen (Velloso, 2008).

6.4.4 Schilddrüsenhormone

Bereits in den 1970er Jahren konnte in mehreren Tierversuchen gezeigt werden, dass die Hormone der Schilddrüse eine Vielzahl verschiedener Effekte auf die Muskelzelle ausüben. Dazu gehören eine Stimulation der mitochondrialen Biogenese, der Proteinbiosynthese, der rRNA-Bildung und des Muskelwachstums sowie die Veränderung verschiedener intrazellulärer Hormone. Diese Auflistung der am Tiermodell gewonnenen Erkenntnisse findet sich in einer Übersichtsarbeit von Florini aus dem Jahr 1985 (Florini, 1987). Florini ist bereits zum damaligen Zeitraum verwundert über die schlechte Datenlage zum Einfluss der Schilddrüsenhormone auf die Muskelzelle:

„The iodinated hormones secreted by the thyroid are generally believed to have anabolic actions, and it is well known that thyroid deficiency states are accompanied by poor muscle growth, development, and function. In view of this fact, there has been surprisingly little study of the effects of thyroid hormones on muscle growth and development; the computer and I found only one study (Kumegawa et al., 1980) in which thyroid hormones had been added to muscle cells and effects on growth and differentiation measured.” (Florini, 1987).

Auch wenn über die aktuellen internetbasierten Datenbanken heutzutage mehr Ergebnisse unter den von Florini definierten Suchkriterien gefunden werden können, so ist festzuhalten, dass die Bedeutung der Schilddrüsenhormone im Rahmen der physiologischen Muskelkraftentwicklung noch immer kaum untersucht ist.

Neuere Untersuchungen bestätigen zwar die Bedeutung der Schilddrüsenhormone für die regelhafte Entwicklung der Muskulatur, sind jedoch nach wie vor selten. Clément et al. konnten beispielsweise zeigen, dass Trijodthyronin (T3) einen entscheidenden Einfluss auf die Regulation der muskulären Genexpression hat und neben der Steuerung des zellulären Energiehaushaltes auch maßgeblichen Einfluss auf den Proteinumsatz der Muskelzelle hat (Clement et al., 2002).

Gestützt werden diese Untersuchungsergebnisse durch das klinische Bild einer kindlichen Hypothyreose, die unter anderem durch eine negativ beeinträchtigte

muskuläre Entwicklung geprägt ist (Malina et al., 2004). Auch konnte gezeigt werden, dass bei Patienten mit einer angeborenen Resistenz gegen Schilddrüsenhormonen eine verminderte intramuskuläre Energieproduktion in Form der ATP Synthese abläuft, was möglicherweise ebenfalls mit einer verminderten Kraftproduktion einhergeht (Mitchell et al., 2010).

6.4.5 Verhältnis zwischen anabolen und katabolen Hormonen

Nicht zuletzt sei darauf hingewiesen, dass die hormonellen Einflüsse auf das Muskelwachstum vermutlich maßgeblich von dem Gleichgewicht zwischen anabolen und katabolen Hormonen bestimmt werden. Den anabolen Effekten der vorgenannten Hormone stehen dabei insbesondere die katabolen Wirkungen des Cortisols gegenüber. Dieses physiologische Glucocorticoid, welches zu den Steroidhormonen gehört und in der Nebennierenrinde gebildet wird, fördert den Proteinabbau und wird vermehrt in den Morgenstunden (06:00 - 08:00 Uhr) und in Stresssituationen ausgeschüttet (Pschyrembel, 2002). Unter Verwendung einer verhältnismäßig neuen Methode, dem Nachweis von Cortisol im Speichel, konnte in einer Studie gezeigt werden, dass die Cortisolkonzentrationen bei Kindern und Jugendlichen alters- aber nicht geschlechtsabhängig sind (Safarzadeh et al., 2004).

Auch wenn die Bedeutung des Gleichgewichtes zwischen anabolen und katabolen Hormonen in Form des Testosteron : Cortisol Verhältnisses zur Einschätzung intensiver Trainingsbelastungen bereits thematisiert wurde (Rich et al., 1992), sind vergleichbare Untersuchungen mit Bezug auf das physiologische Muskelwachstum nicht verfügbar. Blimkie und Sale gehen jedoch davon aus, dass diese Hormone bei gesunden Kindern vermutlich eine nur untergeordnete Rolle im Rahmen der Muskelkraftentwicklung spielen (Blimkie und Sale, 1998).

6.5 Neuromuskuläre Steuerung

6.5.1 Funktionelle Veränderungen

Die neurogene Ansteuerung des kontraktiven Gewebes stellt eine elementare Einflussgröße für die Kraftentfaltung pro Muskelmasse dar. Sowohl die Anzahl der rekrutierten motorischen Einheiten als auch deren Aktivierungsfrequenz, stehen in einem direkten Zusammenhang mit der Muskelkraft (Duchateau et al., 2006; Jones et al., 2008; Moritani und Devries, 1979). Denkbar wäre demnach, dass durch reifebedingte Unterschiede im Aktivierungsmuster muskelmassenormierte Kraftunterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen erklärt werden können. Darüber hinaus zählen der Grad der Myelinisierung und die intra- und intermusku-

läre Koordination zu den nervalen Faktoren, welche die Muskelkraft beeinflussen. Von den genannten Einflussgrößen wurde bislang jedoch nur der Grad der Aktivierung im Rahmen von Interventionsstudien untersucht (Haywood und Getchell, 2009).

Falk et al., welche nach Unterschieden im muskulären Aktivierungsmuster zwischen Kindern und Erwachsenen suchten, kamen zu dem Ergebnis, dass Kinder im Rahmen maximal willkürlicher Kontraktionen nicht in der Lage sind, gewisse motorische Einheiten zu aktivieren (Falk et al., 2009). Bei diesen handelt es sich nach Falk et al., um besonders schnelle Einheiten mit hoher Erregungsschwelle. Gestützt werden die Ergebnisse durch eine Untersuchung von Halin et al, welche die Unterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen durch einen geringeren Typ-II Faseranteil bei maximalen Kontraktionen von Kindern erklären (Halin et al., 2003). Die genannte Arbeitsgruppe begründet diese Vermutung insbesondere durch das unterschiedliche Muster des Kraftverlaufes während der gemessenen 30sekündigen isometrischen Kontraktion. Während die Kraft bei den Kindern nur langsam über die Zeit abfiel, ließ sich bei den Erwachsenen ein deutlich schneller Kraftverlust nachweisen. Zusammen mit der langsamer nachlassenden mittleren EMG-Frequenz, weist dies auf eine geringere Typ-II-Faserbeteiligung hin. Das bedeutet mit anderen Worten, dass Kinder bei maximal willkürlicher Kontraktion der Muskulatur nur einen kleineren Anteil ihrer muskulären Querschnittsfläche aktivieren können. Ein Phänomen, welches möglicherweise das Ergebnis neuromuskulärer Reifeunterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen widerspiegelt.

Setzt man die willkürlich aktivierbare Kraft in ein Verhältnis zu der Kraft, die durch einen supramaximalen elektrischen Stimulus (siehe *Abb. 21*) ausgelöst wird, so lässt sich das sog. Aktivierungsdefizit berechnen. Grosset et al. konnten unter Verwendung dieser Methode einen altersabhängigen Abfall des genannten Aktivierungsdefizites nachweisen (Grosset et al., 2008). Die Arbeitsgruppe verglich dabei die Aktivierungsfähigkeit des *M. triceps surae* von präpubertären Kindern (7 - 11 Jahre) mit der von Erwachsenen (21 ± 2,3 Jahre). Die applizierten elektrischen Impulse lagen dabei um 20% über der Frequenz, welche in etwa die maximale Muskelspannung hervorrufen würde. Der grundsätzliche Vorteil elektrisch evozierter Kontraktionen liegt im Wesentlichen in der Möglichkeit zentrale Einflüsse auf das Untersuchungsergebnis zu eliminieren (Allen et al., 2008). Zur Linderung von etwaigen Schmerzempfindungen wurden im Rahmen dieser Untersuchung, wie auch in anderen pädiatrischen Studien, Einzelstimulationen der Dauerstimulation vorgezogen (Shield und Zhou, 2004). Das Aktivierungsdefizit lag bei den untersuchten siebenjährigen Kindern bei 12,97 (± 4,69 %), bei den Zehnjährigen bei 4,43 % (± 1,03), bei den Elfjährigen 3,30 % (± 0,28) und bei den Erwachsenen bei 1,48 % (± 0,18). Grosset et al. weisen außerdem darauf hin, dass mit zunehmendem Alter ein stetiger Abfall des entsprechenden Standardfehlers beobachtet wer-

den kann, welcher bereits in der Gruppe der elfjährigen Kinder zu vernachlässigen ist. Dies könnte dafür sprechen, dass sich das Aktivierungsdefizit einem konstanten Wert nähert und die ausgeprägte Varianz bei jüngeren Kindern das Resultat einer unterschiedlich ausgeprägten Immaturität neuromuskulärer Ansteuerung ist. Ob die bekannten Unterschiede zwischen trainierten und untrainierten Personen in Bezug auf die Kraft pro ACSA ebenfalls durch eine Art Reifung des neuromuskulären Aktivierungsapparates zurückgeführt werden kann ist unklar (Jones et al., 2008) (siehe Kapitel 6.2).

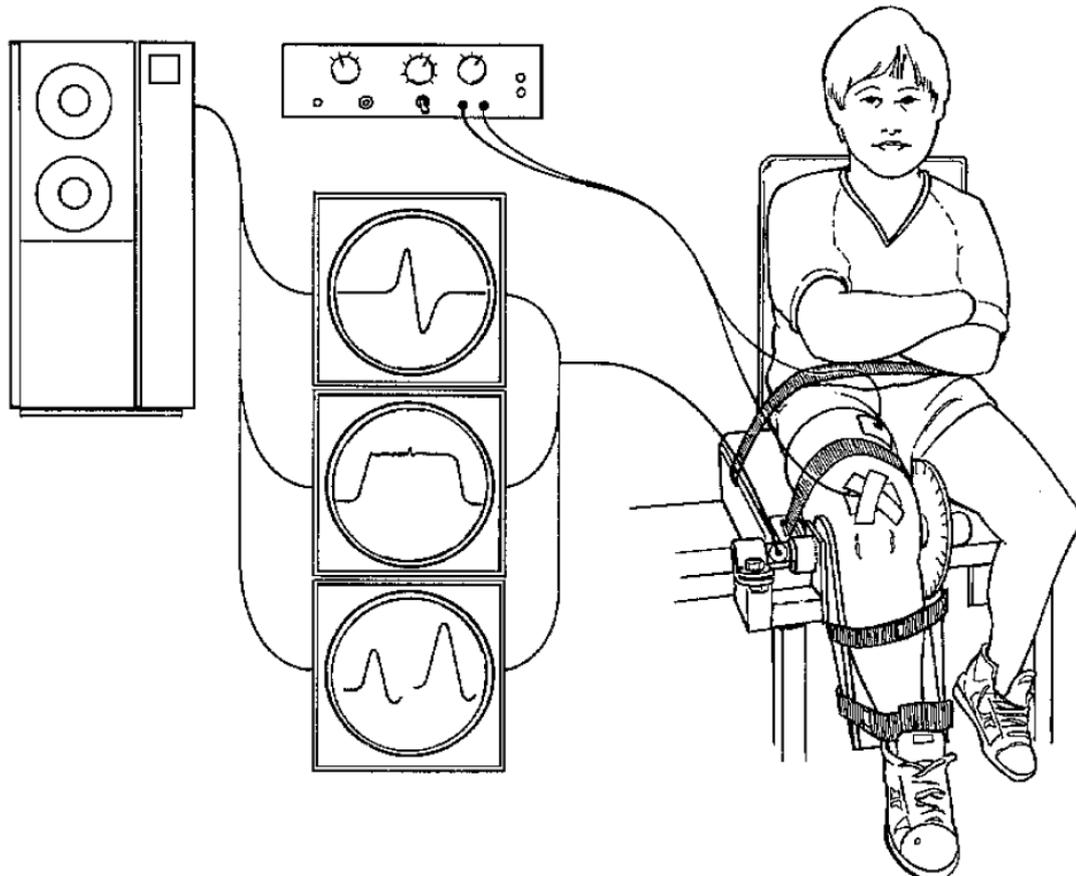


Abb. 21: Versuchsaufbau für die Erfassung der maximalen elektrisch evozierten Muskelkontraktion am Beispiel des Beinstrecker. Dargestellt sind das Stimulationsgerät mit den entsprechenden Elektroden am Oberschenkel sowie die graphische Ableitung der gemessenen Drehmomente. Abbildung aus (Blimkie et al., 1989).

Unterstrichen wird die Bedeutung der neuromuskulären Steuerung für die Muskelkraftentwicklung durch die Ergebnisse von Davies et al. (Davies, 1985). In dieser Untersuchung konnte eine Nivellierung der altersabhängigen Unterschiede beobachtet werden, sobald die elektrisch evozierte Muskelspannung auf die physiologische Querschnittsfläche bezogen wurde (siehe

Abb. 16). Mit diesem Vorgehen wurden sowohl muskelarchitektonische (siehe Kapitel 6.3) als auch neuromuskuläre Einflussgrößen weitgehend eliminiert.

Aus Studien mit Erwachsenen ist außerdem bekannt, dass die Entladungsfrequenz der Motoneurone einen Einfluss auf die Muskelspannung hat (Patten et al., 2001). Aufgrund ethischer Gesichtspunkte bezüglich der invasiven Messmethode (intramuskulärer Nadelelektroden), liegen bislang keine vergleichbare Daten für Kinder vor (Rowland, 2005).

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass nicht alleine die Innervation des kontrahierenden Muskels, sondern auch die der Antagonisten einen entscheidenden Einfluss auf die Kraftentfaltung haben. Je höher diese sogenannte Ko-kontraktion der Antagonisten ausfällt, desto stärker sinkt die resultierende Kraft. Veränderungen in der Ausprägung derartiger Ko-aktivierungen der antagonistischen Muskulatur im Rahmen des Reifeprozesses stellen demnach eine denkbare Einflussgröße für die physiologische Muskelkraftentwicklung dar.

Einen solchen Zusammenhang zwischen Ko-kontraktion und dem Lebensalter konnte bereits in mehreren Studien nachgewiesen werden. So untersuchten Frost et al. dieses Phänomen bei Kindern und Jugendlichen aus drei verschiedenen Altersgruppen (7 - 8 Jahre, $n = 10$; 10 - 12 Jahre, $n = 10$; 15 -16, $n = 10$) und konnten zeigen, dass die stärkste Ko-aktivierung bei den jüngsten und die schwächste bei den ältesten Kindern auftrat (Frost et al., 1997). Die im Rahmen dieser Untersuchung überprüften Aktivitäten bestanden aus submaximaler Laufbandbelastung bei zwei verschiedenen Geh- und vier verschiedenen Laufgeschwindigkeiten. Auch Grosset et al. fanden in ihrer Untersuchung einen signifikanten altersabhängigen Abwärtstrend ($r = 0,92$; $n = 5$; $p < 0.05$) in Bezug auf die Koaktivierung der Antagonisten (Grosset et al., 2008). Besonders hervorzuheben ist hierbei das Alter, der von Grosset et al. untersuchten Probanden. Dieses lag zwischen dem siebten und elften Lebensjahr, was auf einen von pubertären Reifungsprozessen entkoppelten Prozess hinweist.

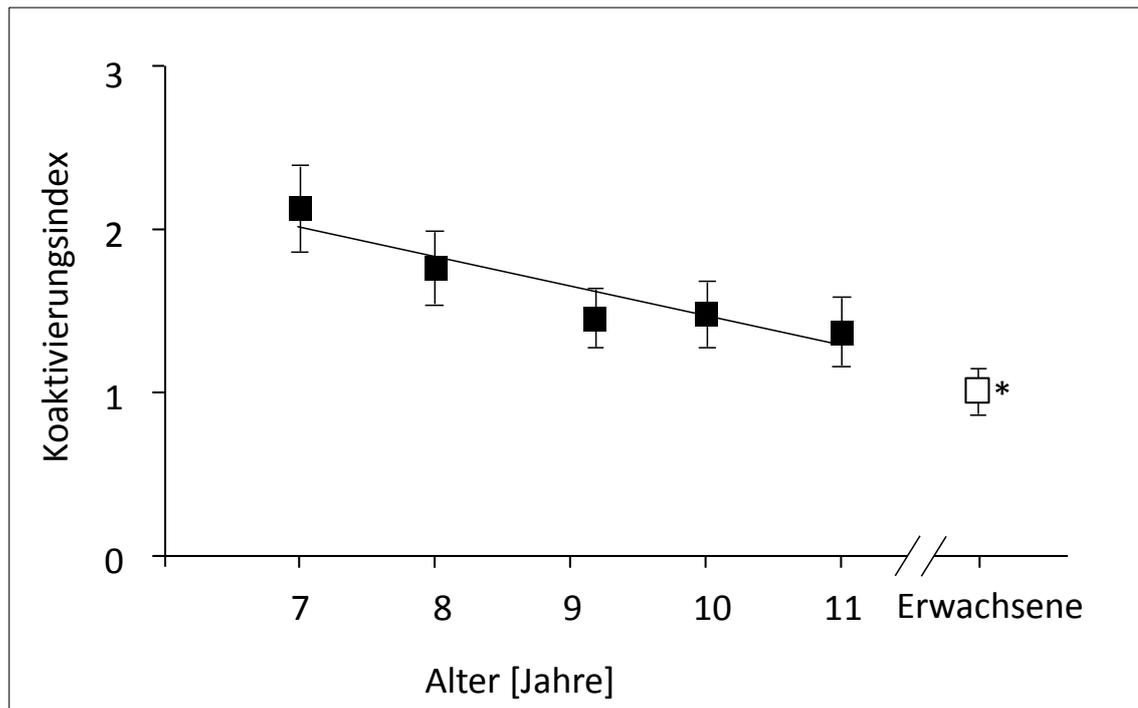


Abb. 22: Verhältnis zwischen der Koaktivierung des *M. tibialis anterior* bei Plantarflexion und dem Alter. Der Koaktivierungsindex ist definiert als Verhältnis zwischen der EMG-Aktivität des *M. tibialis anterior* und dem *M. triceps surae* (■ = präpubertäre Kinder; □ = Erwachsene; * = signifikant niedrigerer Koaktivierungsindex in der Gruppe der Erwachsenen im Vergleich zu den präpubertären Kindern) (Grosset et al., 2008).

Es sei an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass vereinzelte Arbeitsgruppen keine Altersabhängigkeit der beschriebenen Ko-kontraktion der Antagonisten finden konnten. Kellis und Unnithan beispielsweise, untersuchten die Beteiligung der Antagonistenaktivität bei pubertären Kindern ($12,6 \pm 0,5$ Jahre) und verglichen diese mit der Aktivität bei Erwachsenen ($23,1 \pm 2,1$ Jahre). Als Testübung wurde die isokinetische Kniestreckung und -beugung gewählt. Weder das Alter, noch das Geschlecht der Probanden hatte dabei einen signifikanten Einfluss auf die mittlere EMG-Aktivität des *M. vastus lateralis* bzw. des *M. biceps femoris*, wenn diese Muskeln als Antagonisten aktiv waren (Kellis und Unnithan, 1999). Auch eine muskuläre Ermüdung der Agonisten, so Kellis in einer späteren Studie, hatte keinen Einfluss auf die EMG-Aktivität der Antagonisten (Kellis, 2003).

6.5.2 Morphologische Veränderungen

Zu den morphologischen Veränderungen des Nervensystems mit zunehmender Reife, zählt unter anderem die Myelinisierung der Nervenfasern. Diese ist entscheidend für die Leitungsgeschwindigkeit und hat nach Baechle und Earle neben

der Bewegungsgeschwindigkeit einen fundamentalen Einfluss auf die mögliche Kontraktionskraft der Muskulatur:

"An important factor related to the expression of muscular strength in children is the development of the nervous system. If myelination of nerve fibers is absent or incomplete, fast reactions and skilled movements cannot be successfully performed, and high levels of strength and power are impossible." (Baechle et al., 2008).

Da die Myelinisierung motorischer Nerven vielfach bis zur sexuellen Reife anhält, so Baechle und Earle weiter, sind altersabhängige Differenzen der Muskelkraft bis zu diesem Zeitpunkt wahrscheinlich zum Teil durch Unterschiede in der Myelinisierung zu erklären (Baechle et al., 2008). Über den Zeitpunkt der kompletten Myelinisierung der motorischen Nerven herrscht in der Literatur jedoch Uneinigkeit. Moglia et al. untersuchten beispielsweise die Leitungsgeschwindigkeit des N. ulnaris und des N. peroneus in vier verschiedenen Altersgruppen bei 653 Kindern unter zwölf Jahren und fanden in Abhängigkeit vom untersuchten Nerv unterschiedliche Reifungsmuster (Moglia et al., 1989). Während die Leitungsgeschwindigkeit des N. ulnaris bis zum ersten Jahr zunahm, steigerte sich diese beim N. peroneus bis zum Alter von drei Jahren. Die ebenfalls erhobene Reizleitungsgeschwindigkeit sensibler Sensationen über den N. medianus zeigte hingegen einen Zuwachs bis zum sechsten Lebensjahr. Die Ergebnisse von Moglia et al. bestätigten damit bereits zuvor erhobene Daten für die drei genannten Nerven (Ryniewicz, 1975) und auch neuere Untersuchungen kommen zu vergleichbaren Ergebnissen (Fietzek et al., 2000; Garcia et al., 2000). Andere Arbeitsgruppen, wie die von Malmström und Lindström fanden hingegen einen kontinuierlichen Anstieg der Leitungsgeschwindigkeit in den ersten beiden Lebensdekaden (Malmstrom und Lindstrom, 1997). Auch Lang et al. berichten über Veränderungen bis in das späte Kindesalter hinein (Lang et al., 1985). Da sich diese nur an den oberen Extremitäten nachweisen ließ, die Nervenleitgeschwindigkeit an den unteren Extremitäten jedoch ein entgegengesetztes Muster in Form nachlassender Geschwindigkeiten zeigten, gehen die Autoren von einem Bezug zur Extremitätenlänge aus. Konkret bedeutet dies nach Lang et al. eine durch Ausdünnung distaler Axonanteile mit Wachstum der Extremitäten nachlassende Leitungsgeschwindigkeit. Zusammenfassend ist jedoch zu sagen, dass der Großteil der Literatur von einer Entwicklung der Reizleitungsgeschwindigkeit ausgeht, die im Zeitraum der ersten fünf Lebensjahre abgeschlossen ist.

Die reifeabhängige Veränderung der Impuls-Reaktionszeit, d.h. vom Aktionspotential des Motoneurons bis hin zur Kontraktion des Muskels, scheint nach Ergebnissen einzelner Studien nicht alleine auf Veränderung der Nervenleitgeschwindigkeit

keit zu beruhen. So konnte in einer Untersuchung von Cruz Martínez und López Terradas gezeigt werden, dass auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit entlang der Muskelfasern im Kindesalter zunimmt und signifikant geringer ist als die der Erwachsenen (Cruz Martinez und Lopez Terradas, 1990).

Die neurogenen Einflüsse auf die Muskelkraft weisen möglicherweise darüber hinaus eine Verknüpfung zu den zuvor besprochenen endokrinen Mediatoren der Reifeentwicklung auf. So ist bekannt, dass neben der Skelettmuskulatur auch die Motoneurone über Androgenrezeptoren verfügen und damit als potentielle Wirkorte für reifebedingte Hormonveränderungen in Frage kommen (Herbst und Bhasin, 2004). Aus *in vitro* und *in vivo* Untersuchungen ist bereits bekannt, dass es unter dem Einfluss von Androgenen zu einem Wachstum des Zellkörpers und zu einer verstärkten Verzweigung und Längenzunahme der Dendriten spinaler Motoneurone kommt und diese Effekte über Androgenrezeptoren der jeweiligen Nervenzellen hervorgerufen werden (Fargo et al., 2008). Aufgrund der aktuellen Datenlage kann jedoch nur darüber spekuliert werden, inwieweit dieser Signalweg im Zuge der reifebedingten neuromuskulären Entwicklung genutzt wird.

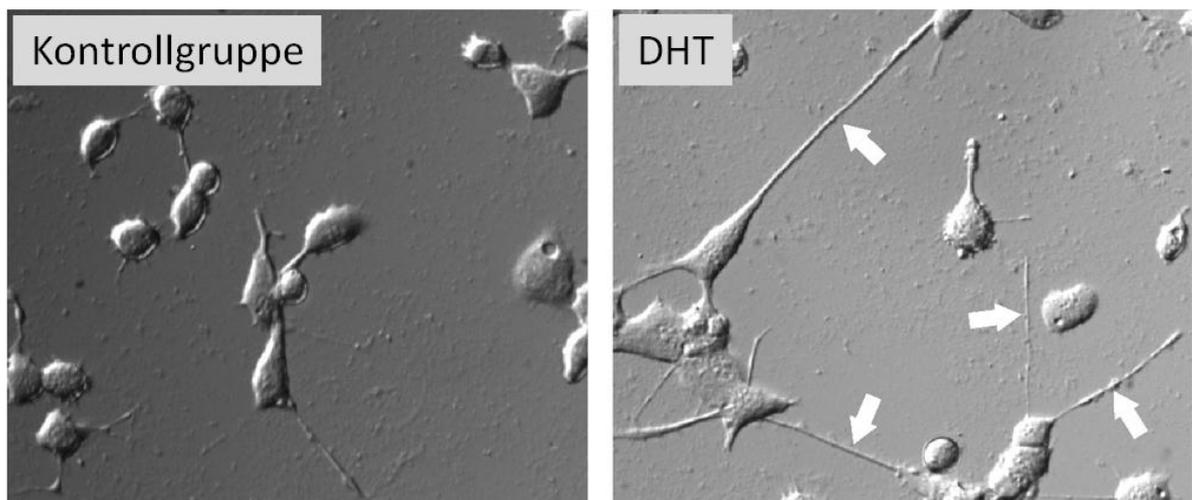


Abb. 23: Differenzial-Interferenz-Kontrast-Fotomikroskopie von Motoneuron-Hybridzellen mit transfizierten Androgenrezeptoren, welche über 48h mit 100 nM Dihydrotestosteron (= DHT) behandelt wurden im Vergleich zur Kontrollgruppe. In der DHT-behandelten Gruppe zeigen sich deutlich längere Neuriten (Pfeile). Abbildung aus (Fargo et al., 2008).

6.6 Fazit

Die mit dem Wachstum im Kindes- und Jugendalter einhergehende Zunahme der Muskelkraft lässt sich auf strukturelle und funktionelle Veränderungen der Muskulatur zurückführen, welche eng mit neuronalen, hormonellen und biomechanischen

Faktoren verknüpft sind (Grosset et al., 2008). Wie gezeigt werden konnte, erklärt dabei alleine die Zunahme der Muskelmasse bereits einen Großteil der reifebedingten Kraftzunahme. Parameter, wie die Muskelquerschnittsfläche, eignen sich demnach besonders als Normierungsvariablen und generieren eine weitgehend größenunabhängige und damit vergleichbare Variable. Einfach zu erhebende anthropometrische Größen wie das Körpergewicht, sind hingegen weniger geeignet, da sie die Muskelmasse nur grob abschätzen können. Selbst unter Berücksichtigung von Alter, Geschlecht und Körperbau können so nur 40 – 70% der Kraftvarianz zwischen dem fünften bis zum siebzehnten Lebensjahr aufgeklärt werden (*De Ste Croix, 2007*).

Da jedoch selbst nach Normierung der Kraft auf die muskuläre Querschnittsfläche altersabhängige Differenzen beobachtet wurden (Grosset et al., 2008; Halin et al., 2003; Kanehisa et al., 1994; Kanehisa et al., 1995; Paasuke et al., 2000; Seger und Thorstensson, 2000; Wood et al., 2006), ist die Beteiligung qualitativer Muskeleigenschaften an der reifebedingten Kraftentwicklung naheliegend (Bouchant et al., 2011). Dabei werden neben neuromuskulären Unterschieden auch hormonelle und biomechanische Faktoren diskutiert, welche zu dem alters- bzw. reifeabhängigen Unterschied beitragen. Als wesentlicher Einflussfaktor neuromuskulärer Art ist insbesondere der mit dem Alter zunehmende Grad der Aktivierung motorischer Einheiten zu nennen. Weitere funktionelle, die nervale Ansteuerung der Muskulatur betreffenden Veränderungen, wie das Ausmaß der Ko-contraktion antagonistischer Muskeln, sind hingegen weitaus strittiger. Zu manchen Faktoren, wie einer möglichen Veränderung des Entladungsmusters der Motoneurone, liegen uns aufgrund der Invasivität der aktuell verfügbaren Methoden keine Daten für Kinder vor. Auch oftmals diskutierte morphologische neurogene Einflussfaktoren, wie der Grad der Myelinisierung, scheinen einen nur begrenzten Einfluss auf die kindliche Muskelkraftentwicklung zu nehmen, da dieser Reifeprozess vermutlich bereits in den ersten fünf Lebensjahren abgeschlossen ist.

Mit den sich ständig wandelnden technischen Möglichkeiten, ist davon auszugehen, dass noch viele weitere Einflussgrößen erkannt werden, die im Rahmen der physiologischen Muskelkraft von Bedeutung sind. Dennoch kann bereits jetzt festgehalten werden, dass nicht ein Faktor alleine die reifeabhängige Kraftzunahme erklären kann - wenngleich die steigende Muskelmasse bereits einen großen Anteil der Varianz erklärt.

7 Trainierbarkeit der Muskelkraft

Der Hauptgrund für die nur rudimentäre Einbindung eines Krafttrainings in die üblichen Trainingspläne im Nachwuchsleistungssport ist sicherlich die Angst vor einer akuten sowie chronischen Überlastung und Schädigung der Kinder und Jugendlichen. Bevor jedoch dieses Thema erörtert wird, sollte geklärt sein, ob ein Krafttraining in diesen Altersstufen überhaupt zu einer Leistungsverbesserung führen kann oder tatsächlich der mangelnde Hormonhaushalt in den frühen Lebensjahren derartige Effekte verhindert. Die folgende Aussage von Katch würde gerade diese These unterstreichen:

„The ‘trigger hypotheses’ (Katch, 1983) implied that there would be a time (trigger point) in a child’s life – namely puberty – before which the effects of training would be negligible, or would not occur at all“ (in: (Matos und Winsley, 2007)).

Selbst die American Academy of Pediatrics gingen in einer frühen Empfehlung für Pädiater (1983) von einer verminderten Trainierbarkeit aus (American Academy of Pediatrics, 1983). Es soll im Folgenden geklärt werden, welche Studienergebnisse diesbezüglich bisher vorliegen und welche Lehrmeinungen daraus in der Vergangenheit abgeleitet wurden.

7.1 Muskelkraft

Untersucht man die Ergebnisse der Krafttrainingsstudien, die mit Kindern und Jugendlichen durchgeführt wurden, in Hinblick auf die Trainierbarkeit der Muskelkraft, so sind nur wenige frühe Studien zu nennen, welche keine positiven Wirkungen in diesem Zusammenhang fanden (Docherty et al., 1987; Hetherington, 1976; Vrijens, 1978). Darunter ist auch die Untersuchung von Vrijens (Vrijens, 1978), deren nichtsignifikante Interventionsergebnisse in der Literatur besonders häufig Erwähnung finden. Andere Untersuchungen aus dieser Zeit konnten hingegen sehr wohl Kraftzuwächse im Kindes- und Jugendalter nachweisen (Kirsten, 1963; Komi et al., 1978; Noack, 1956), was durch Folgeuntersuchungen bestätigt werden konnte (Baumgartner und Wood, 1984; Letzelter und Diekmann, 1984; Weltman et al., 1986). Vor diesem Hintergrund ist es schwierig nach zu vollziehen, warum dennoch vereinzelt Autoren die Trainierbarkeit der Nachwuchssportler auch noch Jahre später als äußerst gering einstufen. Neben der oben formulierten „Trigger Hypothesis“ von Katch fanden sich vergleichbare Aussagen auch in früheren nationalen Lehrbüchern wieder. Hollmann und Hettinger schrieben beispielsweise in der Erstauflage des Referenzwerkes „Sportmedizin“ aus dem Jahre 1976, dass die Trainierbarkeit der Muskelkraft unter dem zehnten Lebensjahr

kaum gegeben ist (Hollmann und Hettinger, 1976). In dem vier Jahre später veröffentlichten Lehrbuch „Grundlagen der Trainingslehre“ von Martin et al. ist nachzulesen, dass die Trainierbarkeit der Krafteigenschaften vermutlich erst dann einsetzt, wenn ein ausreichend hoher Testosteronspiegel in der Zelle erreicht ist (Martin, 1980). Selbst einflussreiche Institutionen wie die American Academy of Pediatrics formulierten 1983 in der Zeitschrift „The Physician and Sportsmedicine“, dass ein Krafttraining vor der Pubertät aufgrund der zu geringen Androgenspiegel praktisch zwecklos sei und nur mit minimalen Kraftverbesserung zu rechnen ist (American Academy of Pediatrics, 1983). Auch in der von Hettinger bereits in den späten fünfziger Jahren erstellten Abbildung zur Trainierbarkeit in Abhängigkeit vom Alter (siehe Abb. 24), lässt sich für beide Geschlechter im prä- und inrapubertären Alter niedrigere Werte ablesen, verglichen mit späteren Lebensphasen. Nach diesen Darstellungen sind fünfjährige Jungen etwa gleich trainierbar wie 50-55jährige Männer.

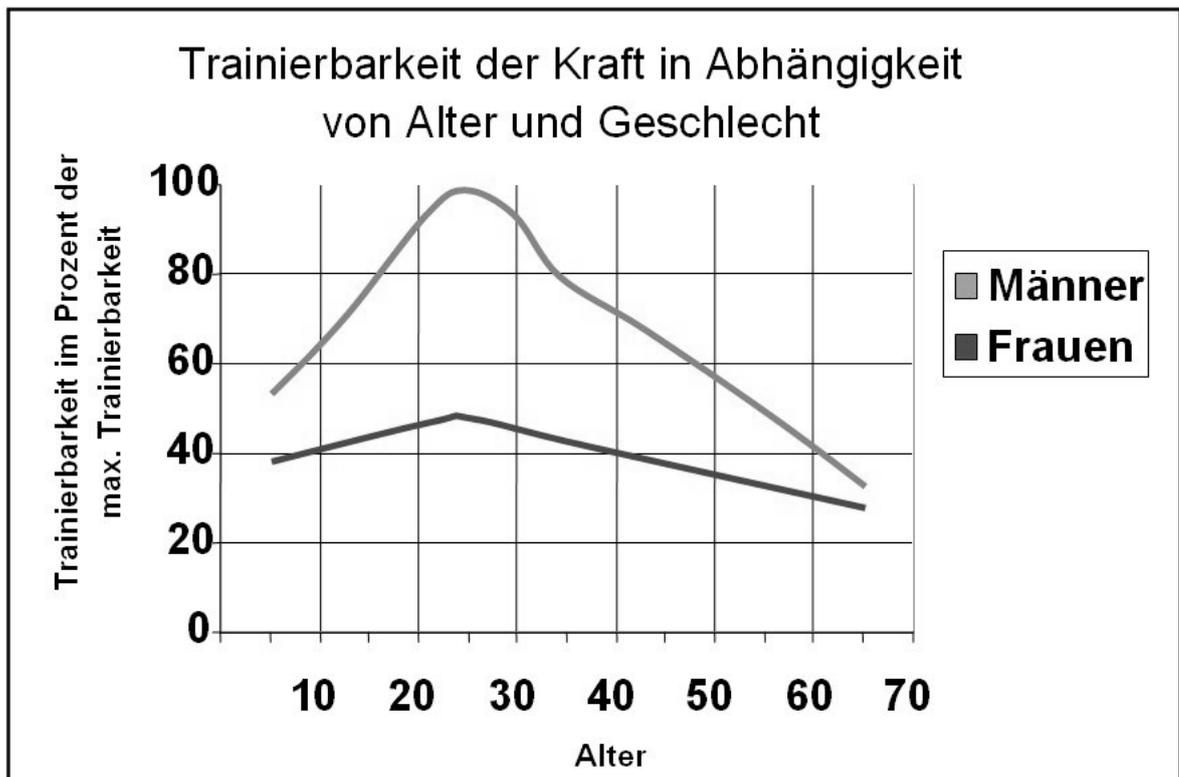


Abb. 24: Krafttrainierbarkeit in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht. Abbildung nach (Hettinger, 1958).

Es ist allerdings zu betonen, dass ein Krafttraining für Kinder und Jugendliche auch in frühen Publikationen nicht grundsätzlich abgelehnt wurde. Vielmehr bezogen sich die Einschränkungen für diese Altersgruppe, aus Angst vor Schädigungen des sich in der Entwicklung befindenden Organismus, auf die zu wählende Trainingsgestaltung (siehe Kapitel 9). Weiterhin gilt zu beachten, dass die damals

angewandten Testverfahren fast ausschließlich auf isometrische Krafttests beschränkt waren (Fukunaga, 1976; Hetherington, 1976; Hettinger, 1958; Hettinger, 1978; Kirsten, 1963; Noack, 1956; Rohmert, 1968; Vrijens, 1978). Mit anderen Worten basierte die damalig negative Schlussfolgerung in Bezug auf die Krafttrainierbarkeit auf den Ergebnissen einer einzigen Kontraktionsform. Die Mehrzahl der neueren Studien greift dagegen oft auf auxotonische Krafttestverfahren zurück, da diese die Leistung der Muskulatur in einer praxisrelevanteren Form analysieren (De Ste Croix, 2007). Ab Mitte der 80er Jahre kamen Untersuchungen mit isokinetischen Kraftanalysen hinzu (Docherty et al., 1987; Hassan, 1991; Ozmun et al., 1994; Pfeiffer und Francis, 1986; Ramsay et al., 1990; Steinmann, 1990; Weltman et al., 1986), welche einen zusätzlichen Einblick in die Kraft unter quasi-dynamischen Bedingungen gewähren (De Ste Croix, 2007).

Betrachtet man die Datenlage im Hinblick auf die prozentualen Kraftverbesserungen (relative Kraft) im Kindes- und Jugendalter, so lässt sich sagen, dass nahezu alle durchgeführten Studien zu vergleichbaren Ergebnissen kamen. Im Durchschnitt erlangten die Kinder dabei Kraftzuwächse von 3,1 % (SD = 2,6 %) pro Woche, welche mit den relativen Kraftzuwächsen von Erwachsenen vergleichbar sind (Blimkie, 1993; Sailors und Berg, 1987). Somit scheint eine Trainierbarkeit in Bezug auf Kraft auf allen Stufen der Entwicklung gegeben zu sein (Stratton et al., 2004). Es gilt zu beachten, dass die größten Kraftverbesserungen zu Beginn eines Krafttrainings zu verzeichnen sind (Moritani und Devries, 1979; Ramsay et al., 1990) und wahrscheinlich zu großen Teilen auf koordinativen Verbesserungen der Kontraktionsabläufe beruhen. Studien mit kurzer Interventionsdauer zeigen daher oft höhere wöchentliche Kraftzuwächse, als solche mit einer längeren Untersuchungsdauer. Nur wenige Studien (Ramsay et al., 1990; Sailors und Berg, 1987) versuchten diesen Einfluss durch eine vorausgehende Trainingsphase auszuschalten. Bei denen von uns analysierten Studien lag der Untersuchungszeitraum mit nur wenigen Ausnahmen bei 8-12 Wochen. Langzeiteinflüsse eines Krafttrainings im Nachwuchsleistungssport sind demnach weitgehend unerforscht.

Tab. 5: Prozentuale Veränderungen der isokinetischen Kraft im Rahmen eines Krafttrainings.

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	G	T E/W o	Dauer [Wo.]	Trng	Isokinetisch
(Pfeiffer und Francis, 1986)	15	10,26	M	3	9	1 - 3x 10 Wdh. 50 - 100 % 10RM	n.s. 30° Ellbogenbeugung (16 %) n.s. 30° Ellbogenstreckung (22,9 %) sign. 30° Kniebeugung (13,8 %) n.s. 30° Kniestreckung (6,5 %) n.s. 120° Ellbogenbeugung (28,7 %) n.s. 120° Ellbogenstreckung (17,9 %) n.s. 120° Kniebeugung (33,2 %) n.s. 120° Kniestreckung (16,7 %)
	15	13,05	M	3	9	1 - 3x 10 Wdh. 50 - 100 % 10RM	n.s. 30° Ellbogenbeugung (21,3 %) n.s. 30° Ellbogenstreckung (24,5 %) n.s. 30° Kniebeugung (-5,1 %) n.s. 30° Kniestreckung (-0,9 %) n.s. 120° Ellbogenbeugung (13,9 %) n.s. 120° Ellbogenstreckung (8,7 %) n.s. 120° Kniebeugung (9,3 %) n.s. 120° Kniestreckung (13,2 %)
	10	19,75	M	3	9	1 - 3 x 10 Wdh. 50 - 100 % 10RM	n.s. 30° Ellbogenbeugung (3,6 %) n.s. 30° Ellbogenstreckung (15 %) n.s. 30° Kniebeugung (7,2 %) n.s. 30° Kniestreckung (-4,6 %) n.s. 120° Ellbogenbeugung (10,5 %) n.s. 120° Ellbogenstreckung (8,5 %) n.s. 120° Kniebeugung (4,7 %) n.s. 120° Kniestreckung (-1 %)
(Weltman et al., 1986)	16	8,2	M	3	14	Max. Wdh. in 30sec.	sign. 30° Ellbogenbeugung (29,2 %) sign. 30° Ellbogenstreckung (32,1 %) sign. 30° Kniebeugung (23,6 %) sign. 30° Kniestreckung (24,5 %) sign. 90° Ellbogenbeugung (36,6 %) sign. 90° Ellbogenstreckung (18,5 %) sign. 90° Kniebeugung (21,0 %) sign. 90° Kniestreckung (18,6 %)
(Docherty et al., 1987)	11	12,6	M	3	4	?	n.s. 30° Armabduktion (-1,61 %) n.s. 30° Armadduktion (7,49 %) n.s. 30° Kniebeugung (1,94 %) n.s. 30° Kniestreckung (2,31 %) n.s. 180° Armabduktion (2,63 %) n.s. 180° Armadduktion (13,88 %) n.s. 180° Kniebeugung (5,2 %) n.s. 180° Kniestreckung (2,18 %)
	12	12,6	M	3	6	?	n.s. 30° Armabduktion (6,08 %) n.s. 30° Armadduktion (7,60 %) n.s. 30° Kniebeugung (4,29 %) n.s. 30° Kniestreckung (2,03 %) n.s. 180° Armabduktion (5,14 %) n.s. 180° Armadduktion (13,41%) n.s. 180° Kniebeugung (10,26 %) n.s. 180° Kniestreckung (2,03 %)

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	G	T E/ W o	Dauer [Wo.]	Trng	Isokinetisch
(Hassan, 1991)	10	7,99	M	3	6	3 x 7 - 12 Wdh.	sign. 72°/sec Kniestreckung (88,2 %) sign. 96°/sec Kniestreckung (81,3 %) sign. 114°/sec Kniestreckung (76,9 %)
	9	9,01	M	3	6	3 x 7 - 12 Wdh.	sign. 72°/sec Kniestreckung (40,7 %) sign. 96°/sec Kniestreckung (54,6 %) sign. 114°/sec Kniestreckung (57,9 %)
	10	10,01	M	3	6	3 x 7 - 12 Wdh.	sign. 72°/sec Kniestreckung (36 %) sign. 96°/sec Kniestreckung (47,6 %) sign. 114°/sec Kniestreckung (42 %)
	11	9,83	W	3	6	3 x 7 - 12 Wdh.	sign. 72°/sec Kniestreckung (40 %) sign. 96°/sec Kniestreckung (50 %) sign. 114°/sec Kniestreckung (66,7 %)
	10	10,74	M	3	6	3 x 7 - 12 Wdh.	sign. 72°/sec Kniestreckung (34,6 %) sign. 96°/sec Kniestreckung (42,4 %) sign. 114°/sec Kniestreckung (42,1 %)
	10	11,93	M	3	6	3 x 7 - 12 Wdh.	sign. 72°/sec Kniestreckung (39,3 %) sign. 96°/sec Kniestreckung (29,6 %) sign. 114°/sec Kniestreckung (30,4 %)
	11	13,17	M	3	6	3 x 7 - 12 Wdh.	sign. 72°/sec Kniestreckung (37,9 %) sign. 96°/sec Kniestreckung (44 %) sign. 114°/sec Kniestreckung (40,9 %)
(Ozmun et al., 1994)	8	10,5	M + W	3	8	3 x 10 Wdh. 10RM	sign. Ellbogenbeugung (28,8 %)
(Lephart et al., 2005)	13	14,2	W	3	8	1 x 20 - 30 Wdh.	n.s. Kniebeugung 60°/sec (6,76 %) sign. Kniestreckung 60°/sec (10,71 %) n.s. Kniebeugung 180°/sec (16,21 %) sign. Kniestreckung 180°/sec (14,55 %)
	14	14,5	W	3	8	1 x 10 - 30 Wdh.	n.s. Kniebeugung 60°/sec (6,02 %) sign. Kniestreckung 60°/sec (7,46 %) n.s. Kniebeugung 180°/sec (-5,43 %) sign. Kniestreckung 180°/sec (5,32 %)

o.S. = ohne Signifikanzangabe; *n.s.* = nicht signifikant; *Sign.* = Signifikant; *G* = Geschlecht; *TE* = Trainingseinheiten; *RM* = Repetition Maximum; *M* = männlich; *W* = weiblich, *Trng* = Training

Tab. 6: Prozentuale Veränderungen der isometrischen Kraft im Rahmen eines Krafttrainings.

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	G	TE/Wo	Dauer [Wo.]	Trng	Isometrisch
(Noack, 1956)	11	13	M	3	17	1 x 3 Wdh.	o.S.: Handgreifkraft (38 %)
	22	13	W	3	17	1 x 3 Wdh.	o.S.: Handgreifkraft (60 %)
(Hettinger, 1958)	6	12,6	M	?	8-23	1 x 1 Wdh.	o.S.: Ellbogenbeugung (2,7 %) Ellbogenstreckung (4,1 %)
	5	12,6	W	?	8-23	1 x 1 Wdh.	o.S.: Ellbogenbeugung (1,6 %) Ellbogenstreckung (3 %)
	10	12,7	M	?	8-23	1 x 1 Wdh.	o.S.: Ellbogenbeugung (3,4 %) Ellbogenstreckung (3,5 %)
	5	12,7	W	?	8-23	1 x 1 Wdh.	o.S.: Ellbogenbeugung (1,5 %) Ellbogenstreckung (6,2 %)
(Kirsten, 1963)	123	13,5	M	5	12	1 x 1 Wdh.	o.S.: Zugdynamometer (32,18 %)
	136	13,5	W	5	12	1 x 1 Wdh.	o.S.: Zugdynamometer (31,73 %)
(Rohmert, 1968)	29	8,8	M	6	9,5	1 x 1 Wdh., 1 sec.	o.S. : Ellbogenbeugung (30,77 %), Ellbogenstreckung (44,89 %)
			F	6	9,5	1 x 1 Wdh., 1 sec.	o.S. : Ellbogenbeugung (23,46 %), Ellbogenstreckung (28,48 %)
			M	6	9,5	1 x 1 Wdh., 6 sec.	o.S. : Ellbogenbeugung (32,40 %), Ellbogenstreckung (58,68 %)
			F	6	9,5	1 x 1 Wdh., 6 sec.	o.S. : Ellbogenbeugung (28,99 %), Ellbogenstreckung (46,41 %)
(Vrijens, 1978)	28	10,5	M	3	8	1 x 8 - 12 Wdh. 75 % des 1RM	n.s. Ellbogenbeugung (-3,2 %), n.s. Ellbogenstreckung (5,88 %) n.s. Kniebeugung (2,07 %) n.s. Kniestreckung (-4,74 %) sign. Rumpfbeugung (36,1 %) sign. Rumpfstreckung (35,22 %)
		16,67	M	3	8	1 x 8 - 12 Wdh. 75 % des 1RM	sign. Ellbogenbeugung (17,02 %), sign. Ellbogenstreckung (32,46 %) sign. Kniebeugung (31,55 %) sign. Kniestreckung (18,85 %) sign. Rumpfbeugung (25,52 %) sign. Rumpfstreckung (15,2 %)
(Komi et al., 1978)	12	14	M+ F	4	12	?	sign. Kniestreckung (19,91 %)
(Funato et al., 1987)	8	6,9	M	3	12	2 x 3 Wdh., 10 sec.	n.s. Ellbogenbeugung (-1,82 %) sign. Ellbogenstreckung (31,15 %)
	7	7	F	3	12	2 x 3 Wdh., 10 sec.	sign. Ellbogenbeugung (20,41 %), sign. Ellbogenstreckung (26,23 %)

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	G	TE/ Wo	Dauer [Wo.]	Trng	Isometrisch
	10	9	M	3	12	2 x 3 Wdh., 10 sec.	n.s. Ellbogenbeugung (10,61 %) sign. Ellbogenstreckung (10,26 %)
	7	9	F	3	12	2 x 3 Wdh., 10 sec.	n.s. Ellbogenbeugung (3,64 %), n.s. Ellbogenstreckung (2,99 %)
	10	11	M	3	12	2 x 3 Wdh., 10 sec.	n.s. Ellbogenbeugung (2,53 %), sign. Ellbogenstreckung (36,99 %)
	10	10,9	F	3	12	2 x 3 Wdh., 10 sec.	n.s. Ellbogenbeugung (-7,32 %), n.s. Ellbogenstreckung (-3,53 %)
(Blimkie et al., 1989)	14	10,54	M	3	10	3 - 5 x10 -12 Wdh. 60 - 65 % 1RM	sign. Ellbogenbeugung bei 80° (15,6 %) sign. Ellbogenbeugung bei 100° (22,4 %) sign. Ellbogenbeugung bei 120° (22,8 %) sign. Ellbogenbeugung bei 150° (37,8 %)
(Ramsay et al., 1990)	13	10,5	M	3	20	3 - 5 x10 -12 Wdh. 60 - 85 % 1RM	sign. Ellbogenbeugung bei 80° (42,14 %) sign. Ellbogenbeugung bei 100° (37,18 %) sign. Ellbogenbeugung bei 120° (32,35 %) sign. Ellbogenbeugung bei 150° (30,87 %) sign. Kniestreckung bei 90° (24,49 %) sign. Kniestreckerung bei 120° (13,74 %) n.s. Kniestreckung bei 140° (10,52 %) n.s. Kniestreckung bei 160° (-20,34 %)
(Mersch und Stoboy, 1989)	1	8,8	M	6	10	10 x 1 Wdh., 10 sec	o.S. Kniestreckung (36,52 %)
	1	11,2	M	6	10	10 x 1 Wdh., 10 sec	o.S. Kniestreckung (40,12 %)
(Hassan, 1991)	10	7,99	M	3	6	3 x 7-12 Wdh.	sign. Kniestreckung 60° (47,4 %) sign. Kniestreckung 90° (31,8 %) sign. Kniestreckung 110° (33,3 %) sign. Kniestreckung 150° (80 %)
	9	9,01	M	3	6	3 x 7-12 Wdh.	sign. Kniestreckung 60° (28 %) sign. Kniestreckung 90° (32,10 %) sign. Kniestreckung 110° (22,7 %) n.s. Kniestreckung 150° (0 %)
	10	10,01	M	3	6	3 x 7 - 12 Wdh.	sign. Kniestreckung 60° (37,9 %) sign. Kniestreckung 90° (30,3 %) sign. Kniestreckung 110° (21,8 %) sign. Kniestreckung 150° (18,2 %)

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	G	TE/ Wo	Dauer [Wo.]	Trng	Isometrisch
	11	9,83	W	3	6	3 x 7 - 12 Wdh.	sign. Kniestreckung 60° (25,9 %) sign. Kniestreckung 90° (39,3 %) sign. Kniestreckung 110° (16,0 %) sign. Kniestreckung 150° (18,2 %)
	10	10,74	M	3	6	3 x 7 - 12 Wdh.	sign. Kniestreckung 60° (31,3 %) sign. Kniestreckung 90° (27,3 %) sign. Kniestreckung 110° (29,2 %) sign. Kniestreckung 150° (20,0 %)
	10	11,93	M	3	6	3 x 7 - 12 Wdh.	sign. Kniestreckung 60° (36,4 %) sign. Kniestreckung 90° (33,3 %) sign. Kniestreckung 110° (32 %) sign. Kniestreckung 150° (25 %)
	11	13,17	M	3	6	3 x 7 - 12Wdh.	sign. Kniestreckung 60° (48,6 %) sign. Kniestreckung 90° (48,6 %) sign. Kniestreckung 110° (54,2 %) sign. Kniestreckung 150° (36,4 %)
(Treuth et al., 1998)	11	7-10	F	3	20	2 x 12 - 15 Wdh. 70 % 1RM	sign. Beinstreckung bei 110° (35,2 %)
(Tsolakis et al., 2000)	9	11,78	M	3	8	3 x 10 Wdh. 100 % 10RM	sign. Ellbogenbeugung 90° (17,68 %)
(Faigenbaum et al., 2002)	22	10,2	M+ W	1	8	1 x 10 - 15RM	n.s. Handgreifkraft (0,52 %)
	20	9,7	M+ W	2	8	1 x 10 - 15RM	n.s. Handgreifkraft (6,98 %)
(Dodd et al., 2003)	11	12,7	M+ W	3	6	3 x 8 - 12RM	o.S. Kniestreckung (18,18 %) o.S. Plantarflexion (50,91 %) o.S. Hüftstreckung (36,71 %)
(Lephart et al., 2005)	13	14,2	W	3	8	1 x 20 - 30Wdh.	n.s. Hüftabduktion (12,7 %)
	14	14,5	W	3	8	1 x 10 - 30 Wdh.	n.s. Hüftabduktion (-2,3 %)
(Morton et al., 2005)	8	8,42	M+ W	3	6	3 - 4 x 5 - 10 Wdh.	sign. Kniebeugung re. bei 90° (87,5 %) sign. Kniebeugung li. bei 90° (86,96 %) sign. Kniestreckung re. bei 90° (38,81 %) sign. Kniestreckung li. bei 90° (32,86 %)

o.S. = ohne Signifikanzangabe; *n.s.* = nicht signifikant; *Sign.* = Signifikant; *G* = Geschlecht; *TE*= Trainingseinheiten; *RM* = Repetition Maximum; *M* = männlich; *W* = weiblich, *Trng* = Training

Tab. 7: Prozentuale Veränderungen der auxotonischen Kraft im Rahmen eines Krafttrainings.

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	G	TE/ Wo	Dauer [Wo.]	Trng	Auxotonisch
(Letzelter und Diekmann, 1984)	96	8-10	M	2	12	?	sign. Bankdrücken (12 %) sign. Beinpresse (10,2 %)
	95	8-10	F	2	12	?	sign. Bankdrücken (10%) sign. Beinpresse (10,2 %)
(Baumgartner und Wood, 1984)	91	Grade 3-6	M+ W	3	12	1 x 1RM	sign. modif. Klimmzüge (32,03 %)
(Sailors und Berg, 1987)	5	12,6	M	3	8	3 x 5 Wdh. 65 - 100 % 5RM	sign. Bankdrücken (19,64 %) sign. Kniebeuge (52,34 %) sign. Ellbogenbeugung (26,02 %)
(Blimkie et al., 1989)	14	10,54	M	3	10	3 - 5 x 10 - 12 Wdh. 60 - 65 % 1RM	sign. Bankdrücken (13,64 %) sign. Ellbogenbeugung (39,65 %)
(Ramsay et al., 1990)	13	10,5	M	3	20	3 - 5 x 10 - 12 Wdh. 60 - 85 % 1RM	sign. Bankdrücken (34,6 %) sign. Beinpresse (22,1 %)
(Steinmann, 1990)	19 2	11.3	M	1	8	2 - 4 x 6 - 8 Wdh.	sign. Bankrücken (11,5 %) sign. Kniebeuge (17 %)
		11.3	M	2	8	2 - 4 x 6 - 8 Wdh.	sign. Bankrücken (20,4 %) sign. Kniebeuge (32,9 %)
		14.3	M	1	8	2 - 4 x 6 - 8 Wdh.	sign. Bankrücken (9,7 %) sign. Kniebeuge (12,7 %)
		14.3	M	2	8	2 - 4 x 6 - 8 Wdh.	sign. Bankrücken (19,8 %) sign. Kniebeuge (26,8 %)
(Faigenbaum et al., 1993)	14	10,8	M+ W	2	8	3 x 10-15 Wdh. 50 -100 % 10RM	sign. Bankdrücken (64,1 %) sign. Kniestreckung (64,5 %) sign. Kniebeugung (77,6 %) sign. Schulterpresse (87 %) sign. Ellbogenbeugung (78,1 %)
(Ozmun et al., 1994)	8	10,5	M+ W	3	8	3 x 10 Wdh. 10RM	sign. Ellbogenbeugung (22,6 %)
(DeRenne et al., 1996)	7	13,25	M	3	12	3 x 10 - 12 Wdh. 50 - 100 % 10RM	sign. Bankdrücken (22,9 %) sign. Beinpresse (26,3 %)
	8	13,25	M	3	12	3 x 10 - 12 Wdh. 50 - 100 % 10RM	sign. Bankdrücken (17,3%) sign. Beinpresse (14,1%)

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	G	TE/ Wo	Dauer [Wo.]	Trng	Auxotonisch
	6	13,25	M	3	12	3 x 10 - 12 Wdh. 50 - 100 % 10RM	sign. Bankdrücken (43,1 %) sign. Beinpresse (60,9 %)
(Faigenbaum et al., 1996)	15	10,8	M+W	2	8	2 - 3 x 6 - 20 Wdh. (jew. RM)	sign. Bankdrücken (41,1 %) sign. Kniestreckung (53,5 %)
(Hetzler et al., 1997)	10	13,8	M	3	12	3 x 10 Wdh. 50 - 100 % 10RM	sign. Bankdrücken (23 %) sign. Beinpresse (41 %)
	10	13,2	M	3	12	3 x 10 Wdh. 50 - 100 % 10RM	sign. Bankdrücken (18 %) sign. Beinpresse (40 %)
(Treuth et al., 1998)	11	7-10	F	3	20	2 x 12 - 15 Wdh. 70 % 1RM	sign. Bankdrücken (19,6 %) sign. Beinpresse (20 %)
(Faigenbaum et al., 1999)	15	7,8	M+W	2	8	1 x 6 - 8 Wdh.	sign. Bankdrücken (5,3 %) sign. Kniestreckung (31 %)
	16	8,5	M+W	2	8	1 x 13 - 15 Wdh.	sign. Bankdrücken (16 %) sign. Kniestreckung (40,9 %)
(Tsolakis et al., 2000)	9	11,78	M	3	8	3 x 10 Wdh. 100 % 10RM	n.s. Ellbogenbeugung (24,22 %)
(Sadres et al., 2001)	27	9,3	M	2	9	1 - 4 x 5 -30Wdh. 30-70 % 1RM	sign. Kniebeugung (63 %) sign. Kniestreckung (83 %)
(Nichols et al., 2001)	5	16,01	W	3	60	2-3x 9-14Wdh	n.s. Bankdrücken (8,3 %) sign. Beinpresse (39,98 %)
(Reuter und Buskies, 2001)	37	11,75	M	2	9	3x 20Wdh.	sign. Bankdrücken (50,7 %) sign. Beinpresse (39,1 %) sign. Lat. Zug (23 %) sign. Rumpfbeugung (40,7 %)
	31	15,54	M	2	9	3x 20Wdh.	sign. Bankdrücken (29,6 %) sign. Beinpresse (23,3 %) sign. Lat. Zug (17,2 %) sign. Rumpfbeugung (21,4 %)
	7	15,1	M	1	7	3x 20Wdh.	sign. Bankdrücken (20,3 %) sign. Beinpresse (7,8 %) sign. Lat. Zug (5,8 %) sign. Rumpfbeugung (14,1 %)

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	G	TE/ Wo	Dauer [Wo.]	Trng	Auxotonisch
	12	15,4	M	2	7	3x 20Wdh.	sign. Bankdrücken (31,6 %) sign. Beinpresse (17,0 %) sign. Lat. Zug (12,5 %) sign. Rumpfbeugung (18,8 %)
(Pikosky et al., 2002)	11	8,6	M+ W	2	6	1-2x 10-15Wdh.	sign. Bankdrücken (10 %) sign. Beinpresse (75 %)
(Faigenbaum et al., 2002)	22	10,2	M+ W	1	8	1x 10-15RM	n.s. Bankdrücken (8,46 %) sign. Beinpresse (14,2 %)
	20	9,7	M+ W	2	8	1x 10-15RM	sign. Bankdrücken (11,5 %) sign. Beinpresse (24,7 %)
(Faigenbaum et al., 2005)	19	10,4	M+ W	2	8	1x15-20 RM	sign. Bankdrücken (21 %) sign. Beinpresse (32,2 %)
	12	10,4	M+ W	2	8	1x6-10RM	sign. Bankdrücken (23 %) sign. Beinpresse (42 %)
(Christou et al., 2006)	9	13,8	M	2	16	2-3x8-15Wdh. 55-85 % 1RM	sign. Bankdrücken (52,78 %) sign. Beinpresse (59,44 %)
(Shaibi et al., 2006)	22	15,1	M	2	16	1-3x8-15Wdh. 62-97 % 1RM	sign. Bankdrücken (26,1 %) sign. Beinpresse (28 %)
(Faigenbaum et al., 2007)	22	13,9	M	2	9	3x3-25RM	sign. Bankdrücken (15 %) sign. Kniebeuge (19 %)

o.S. = ohne Signifikanzangabe; *n.s.* = nicht signifikant; *Sign.* = Signifikant; *G* = Geschlecht; *TE* = Trainingseinheiten; *RM* = Repetition Maximum; *M* = männlich; *W* = weiblich, *Trng* = Training

Bei einer von Falk und Tenenbaum durchgeführten Metaanalyse von 28 Studien lagen die Verbesserungsraten der Muskelkraft zwischen 14 % und 30 % über den wachstumsbedingten physiologischen Zugewinnen (Falk und Tenenbaum, 1996). Fleck und Kraemer sprechen von einer durchschnittlichen Verbesserung um 30 % - 50 % der Kraft im Rahmen von Kurzzeit-Trainingsprogrammen (8 - 20 Wochen) (Kraemer und Fleck, 2005). Einige Wissenschaftler kamen sogar zu dem Ergebnis, dass vorpubertäre Kinder einen größeren prozentualen Kraftzuwachs verzeichnen konnten als postpubertäre Adoleszente und vermuteten die niedrigere Ausgangsleistung als Ursache für die gemessenen Veränderungen (Falk und Tenenbaum, 1996; Pfeiffer und Francis, 1986; Reuter und Buskies, 2001).

Trägt man die prozentualen Kraftveränderungen der von uns in der vorliegenden Reanalyse aufgeführten Studien gegen das Alter der Probanden auf, so wird der oben beschriebene Trend größtenteils bestätigt (siehe *Abb. 25 - Abb. 27*). Da nur Studien mit einer genauen Altersangabe und präziser Definition der Kraftzuwächse berücksichtigt werden konnten, waren von den insgesamt 69 Studien in Bezug auf eine Krafttrainierbarkeit nur 41 auswertbar. Da die unzureichende Datenlage

eine isolierte statistische Auswertung der Krafttrainierbarkeit von Mädchen nicht zulässt, sind in den folgenden Abbildungen die isometrischen, auxotonische, als auch isokinetischen Kraftveränderungen der Jungen und Mädchen jeweils gemeinsam dargestellt.

Für die wöchentlichen auxotonischen und isokinetischen Kraftverbesserungen zeigte sich eine signifikant negative Korrelation mit dem Alter, welche die oben angeführte Vermutung aus den verwendeten Studien bekräftigt. Präpubertäre Kinder scheinen damit entgegen der weit verbreiteten Meinung sogar geringgradig besser trainierbar zu sein als pubertierende und postpubertierende Jugendliche. Es ist anzumerken, dass die Korrelation von $r = 0,44$ nur zu einer aufgeklärten Varianz von knapp 20 % führt, aber aufgrund der Zahl der Befunde signifikant ist. Dieser statistische Zusammenhang konnte für die isometrischen Kraftzuwächse nicht gefunden werden. Die Ursache dafür lässt sich retrospektiv nicht mit Sicherheit klären.

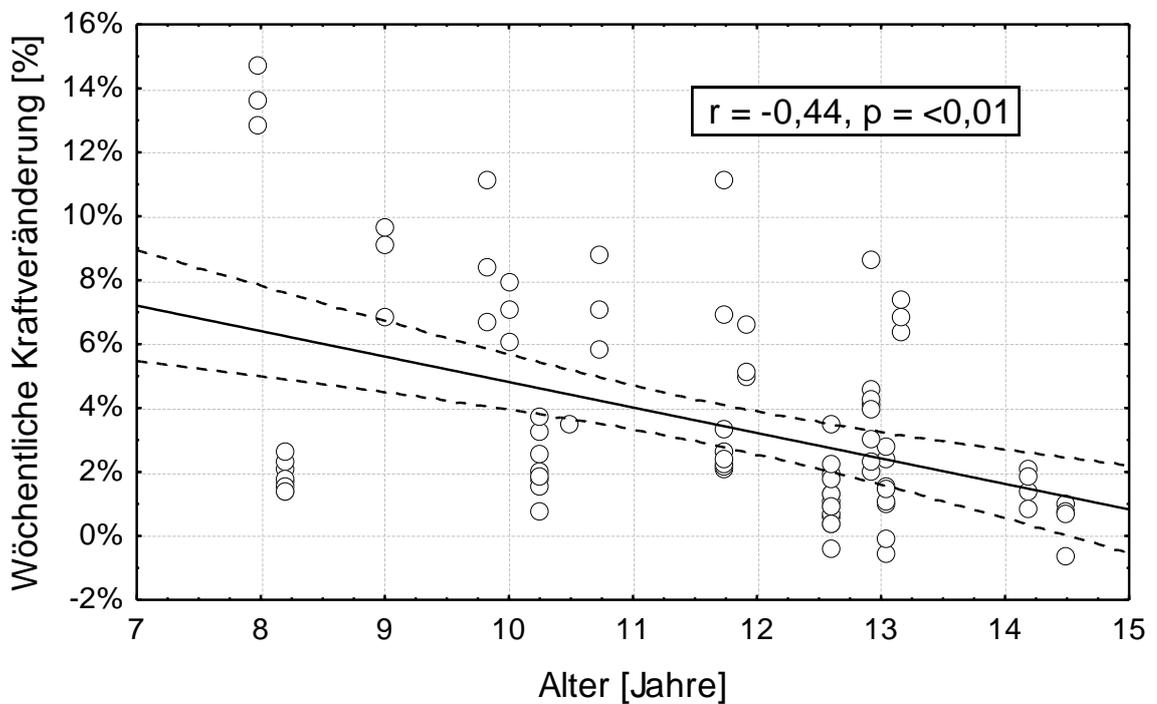


Abb. 25: Wöchentliche Verbesserung der isokinetischen Kraft in Abhängigkeit vom Alter (Daten vgl. Tab. 5).

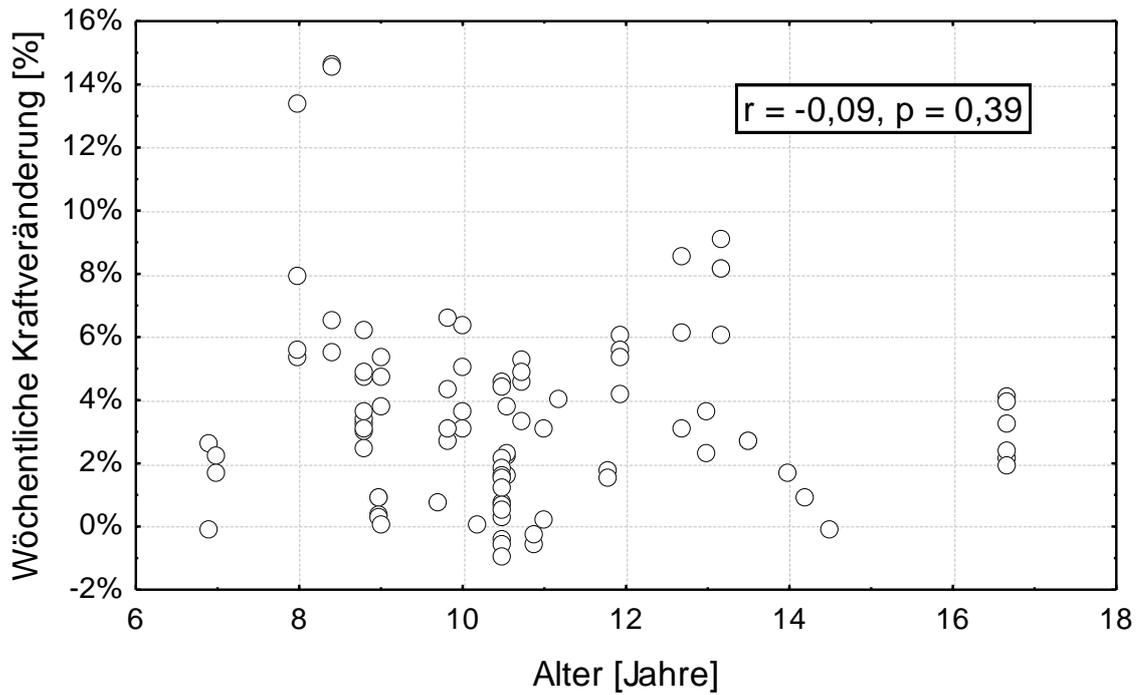


Abb. 26: Wöchentliche Verbesserung der isometrischen Kraft in Abhängigkeit vom Alter (Daten vgl. Tab. 6).

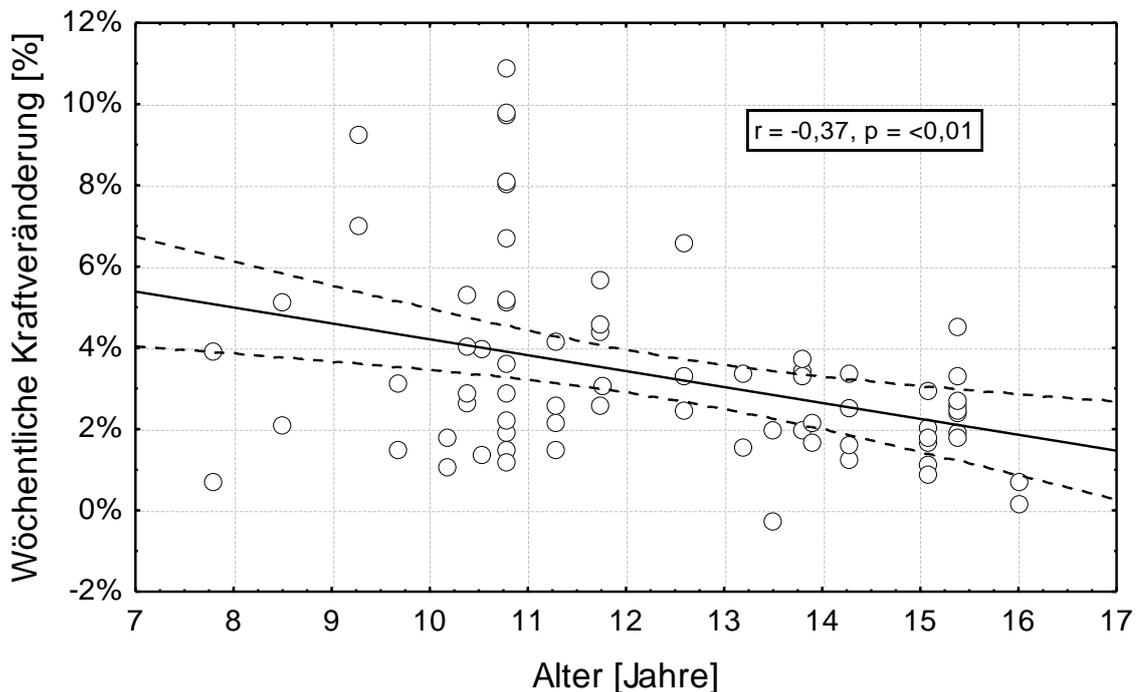


Abb. 27: Wöchentliche Verbesserung der auxotonischen Kraft in Abhängigkeit vom Alter (Daten siehe Tab. 7).

Abgesehen von der angesprochenen Korrelation sollte jedoch auch auf die große Streuung der Werte hingewiesen werden, welche sich über alle Altersstufen er-

streckt. Für die Werteverteilung ist unter anderem sicherlich der Vergleich von unterschiedlichen Studien verantwortlich, denn unter diesen wichen die Trainingsintensitäten und Trainingsumfänge stark voneinander ab. Um die Trainierbarkeit in Abhängigkeit vom Alter abschließend klären zu können, wäre eine Studie wünschenswert, welche unterschiedliche Altersgruppen mit ein- und demselben Training belasten würde. Auch die Größe der Stichproben sollte dabei beachtet werden, um eine belastbare Aussage über die Grundgesamtheit zu ermöglichen (Thomas et al., 2005). Einzig die Studie von Steinmann et al. untersuchte an einer vergleichsweise großen Probandengruppe ($n = 190$) die altersabhängige Trainierbarkeit (Steinmann, 1990).

Um die Trainierbarkeit für Nachwuchsathleten in Abhängigkeit des Alters weitergehend klären zu können, wäre eine Kraftstudie wünschenswert, welche neben einer umfangreichen Stichprobe und einer geeignete Reifeeinteilung sämtliche Gütekriterien (siehe Kapitel 11.1 und 12) einer wissenschaftlichen Studie berücksichtigt.

Eine andere Möglichkeit, die Stichprobenzahl zu erhöhen, besteht in der Durchführung einer Metaanalyse. Im Gegensatz zu einer beschreibenden Zusammenfassung in Form eines Reviews, ermöglicht dieses Verfahren die Ergebnisse verschiedener Studien mit Hilfe einer standardisierten Einheit zu quantifizieren, zu kombinieren und unter Verwendung statistischer Methoden miteinander zu vergleichen. Nachteilig bei diesem Vorgehen sind die Anforderungen an die Ergebnisdarstellung in den einzelnen Studien. Nur wenn die Messwerte der Eingangs- und Ausgangsmessungen für die Interventions- und Kontrollgruppe sowie zumindest die Standardabweichung für die Eingangstests für beide Gruppen verfügbar sind, ist die Berechnung der Effektgrößen nach Hedges und Olkin möglich (Hedges und Olkin, 1985). Da die bislang veröffentlichten Studien zum Krafttraining im Kindes- und Jugendalter deutliche Mängel diesbezüglich zeigen, sinkt die Zahl der geeigneten Studien für eine Metaanalyse drastisch ab. Für die hier vorliegende Studienauswahl blieb unter Verwendung der genannten Exklusionskriterien ein Pool von 22 Studien übrig, so dass von einem metaanalytischen Vorgehen abgesehen wurde.

In einer kürzlich veröffentlichten Metaanalyse konnte der oben beschriebene altersabhängige Abwärtstrend Trend der Trainierbarkeit von Kraft nicht bestätigt werden (Behringer et al., 2010). Hier zeigte sich vielmehr eine leicht positive Korrelation mit dem Lebensalter von Kindern und Jugendlichen. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Anzahl der Sätze und die Dauer der Intervention positiv mit dem erzielten Kraftzuwachs korrelierten. Letzteres ist insofern hervorzuheben, als dass Zugewinne in späten Phasen von Langzeituntersuchungen auf strukturelle Anpassungen der Muskulatur hinweisen, da neurologische Verände-

rungen insbesondere den frühen Phasen von Krafttrainingsstudien zugeschrieben wird.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Zugewinne der Muskelkraft im Kindes- und Jugendalter prozentual vergleichbare Werte aufweisen wie bei Erwachsenen, wobei sich eine leichte Tendenz der besseren Trainierbarkeit im präpubertären Alter abzeichnet. Zum Teil finden sich diese Erkenntnisse bereits in aktuelleren nationalen Lehrbüchern wieder:

„Entgegen der allgemeinen Ansicht führt ein Krafttraining bei präpubertären Kindern zu einem ähnlich hohen relativen Kraftzuwachs wie bei Erwachsenen.“ (Hebestreit et al., 2002).

Auch deutschsprachige Reviews griffen diesen Punkt in jüngerer Vergangenheit bereits auf:

„Untersuchungen, welche vergleichbare Trainingsprogramme über alle Entwicklungsstufen durchführten, haben in konsequenter Weise gleiche, wenn nicht sogar größere relative Kraftgewinne vor der Pubertät, verglichen mit der Adoleszenz oder dem Erwachsenenalter, aufgezeigt.“ (Menzi et al., 2007).

7.2 Geschlechtsunterschiede in der Krafttrainierbarkeit

Der Großteil der Untersuchungen zur Trainierbarkeit im Nachwuchstraining bezieht sich auf Studien mit Jungen oder auf gemischte Probandengruppen (s.o.). Aus diesem Grund kann der Einfluss des Geschlechts auf die Trainierbarkeit der Kraft nur unzureichend beurteilt werden (Falk und Tenenbaum, 1996). Nur sieben der 69 von uns untersuchten Studien gaben die Ergebnisse der Trainingseffekte geschlechtsspezifisch an (Funato et al., 1987; Hassan, 1991; Hettinger, 1958; Kirsten, 1963; Letzelter und Diekmann, 1984; Noack, 1956; Rohmert, 1968), wobei es sich in sechs der sieben Studien um deutschsprachige Artikel handelt. Warum die große Mehrheit der internationalen Untersuchungen auf diesen wesentlichen Aspekt bislang nicht einging bleibt unklar. Bei den genannten nationalen Studien ist hinzuzufügen, dass diese mehrheitlich viele Jahre zurückliegen. So sind jeweils zwei der Studien aus den fünfziger, sechziger und achtziger Jahren und nur eine Studie von Hassan zu Beginn der neunziger Jahre durchgeführt worden (Hassan, 1991).

Bereits Noack fand nach der von ihm und seinen Mitarbeitern angeleiteten Krafttrainingsintervention eine höhere Trainierbarkeit der Mädchen im Vergleich mit den gleichaltrigen Jungen (Noack, 1956). Das dreimal pro Woche durchgeführte Krafttraining führte nach 17 Wochen bei den Jungen zu einer Leistungssteigerung

in der isometrischen Handgreifkraft von 38 %, während sich die weiblichen Versuchspersonen um 60 % steigern konnten. Einschränkend gibt der Autor jedoch zu bedenken, dass sich die Mädchen in dieser präpubertären Phase bekannter Weise schneller entwickeln als die Knaben. Warum vor diesem Hintergrund jedoch die Ausgangskraft der Jungen größer war, bleibt dagegen unkommentiert. Denkbar sind natürlich soziokulturelle Einflüsse auf die alltägliche körperliche Beanspruchung zugunsten der Jungen, welche retrospektiv jedoch nicht überprüft werden können. Obwohl der Trainingseffekt der Mädchen um 37 % über dem der Jungen lag, bezeichnet Noack die Differenz als „*nicht sehr groß*“ und kommt zu dem Schluss, dass die

„Trainierbarkeit [...] der Handgreifkraft bei Knaben und Mädchen keine wesentlichen Unterschiede aufweist.“ (Noack, 1956).

Bereits 1958 erkannte Hettinger, dass die physiologische Kraftentwicklung in Abhängigkeit vom Alter und Geschlecht bereits von einigen Wissenschaftlern zuvor gut untersucht und dokumentiert wurde, Daten zur Trainierbarkeit in diesem Zusammenhang jedoch noch weitgehend fehlten (Hettinger, 1958). Aber gerade das Wissen über die Anpassungsfähigkeit durch ein Training, so Hettinger, sei von großer Wichtigkeit. Die von ihm veröffentlichte Studie „Die Trainierbarkeit menschlicher Muskeln in Abhängigkeit vom Alter und Geschlecht“ versuchte genau diesem Kenntnisdefizit entgegenzuwirken. Neben Personen in mittlerem und höherem Lebensalter analysierte er auch die Auswirkungen eines Krafttrainings auf prä- und intrapubertäre Mädchen und Jungen. Hier konnten die pubertierenden Jungen ihre Ausgangskraft der Unterarmbeuger (+24 %) und Strecker (+45 %) deutlich stärker steigern, als die Vergleichsgruppe der Mädchen (+6 %/ +24 %). Bei den Kindern, die nach der Reifeinteilung als präpubertär eingestuft worden waren, zeigten sich hingegen geringere Unterschiede zwischen Mädchen (+14 %/ +38 %) und Jungen (+19 %/ +40 %). Für den Vergleich der Trainierbarkeit kommt Hettinger zu Folgendem Schluss:

„Das Kraftverhältnis der weiblichen zu den männlichen Versuchspersonen vor und nach dem Training verändert sich bei der unreifen Jugendgruppe [...] praktisch nicht, während es bei der reiferen Jugendgruppe [...] abnimmt.“ (Hettinger, 1958).

Kirsten untersuchte im Rahmen einer frühen Interventionsstudie insgesamt 567 Kinder und fand in der Interventionsgruppe (n= 159) nach dem 12wöchigen isometrischen Krafttraining zwischen den verschiedenen Altersgruppen und zwischen beiden Geschlechtern keine eindeutigen Unterschiede der Kraftzunahme (Kirsten, 1963). Bei dem von Rohmert et al. durchgeführte isometrische Krafttraining zeigten die vorpubertären Mädchen etwas (4-12 %) niedrigere Kraftzuwächse als entsprechende Gruppe der Jungen (siehe Tab. 5) (Rohmert, 1968). Diese Ergebnisse

würden sich auch mit der auch in anderen Studien beschriebenen präpuberalen Differenz in der physiologischen Kraftentwicklung decken. So beschreibt Hebestreit, dass zahlreiche Studien signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede zugunsten der Jungen auch schon vor dem 10. Lebensjahr angeben (Hebestreit et al., 2002).

Die Anfang der 80er Jahre durchgeführte Untersuchung von Letzelter und Diekmann mit 382 Grundschulern fand in der Trainierbarkeit weder für die Arm-, noch für die Beinstreckermuskulatur geschlechtsbedingte Unterschiede:

„Eine höhere Trainierbarkeit der Jungen hinsichtlich der Maximalkraft kann also nicht behauptet werden, auch wenn die Trainingsgewinne der Jungen etwas ausgeprägter sind.“ (Letzelter und Diekmann, 1984).

Die einzige internationale Studie mit geschlechtsspezifischer Angabe der Kraftzuwächse von Funato et al. untersuchte die Trainierbarkeit bei sechs ($n = 15$), neun ($n = 17$) und elfjährigen ($n = 20$) Kindern (Funato et al., 1987). Das 12wöchige isometrische Krafttraining der Oberarmmuskulatur führte für die Ellbogenstrecker-muskulatur nur bei den sechsjährigen Mädchen zu einer signifikanten Kraftverbesserung. Alle anderen Altersgruppen konnten sich über den angegebenen Zeitraum nicht verbessern. Bei den Flexoren zeigten in der Gruppe der Sechsjährigen sowohl die Mädchen, als auch die Jungen eine signifikante Kraftsteigerung zum Eingangstest. In den beiden älteren Altersgruppen konnten nur die männlichen Versuchsteilnehmer einen signifikanten Kraftzuwachs verzeichnen. Von diesen heterogenen Ergebnissen eine unterschiedliche Trainierbarkeit von Jungen und Mädchen abzuleiten, ist nicht möglich.

Hassan fand in einer Studie an sieben- bis dreizehnjährigen Kindern für beide Geschlechter vergleichbare Leistungsadaptationen im Bereich der Muskelkraft. „Eine höhere Trainierbarkeit der Jungen hinsichtlich der Maximalkraft“, so Hassan „kann nicht behauptet werden.“ (Hassan, 1991).

Bei genauerer Betrachtung lässt sich erkennen, dass fünf der sieben Studien isometrische Krafttests nutzten und nur bei zwei der etwas aktuelleren Untersuchungen andere Testverfahren (isokinetisch, auxotonisch) zur Anwendung kamen. Bei Kindern bestehen jedoch deutliche Unterschiede in der statischen und dynamischen Kraftfähigkeit, was es bei der Untersuchung der alters- und geschlechtsabhängigen Trainierbarkeit zu berücksichtigen gilt (De Ste Croix, 2007). Hinzu kommt, dass die bislang erhobenen Werte sich zum Teil widersprechen.

Auch wenn die wenigen verfügbaren Daten geringe Unterschiede zwischen Jungen und Mädchen vermuten lassen (Falk und Tenenbaum, 1996), wird deutlich

wie wichtig weitere Untersuchungen zur Krafttrainierbarkeit von Mädchen, insbesondere während der Pubertät und Jugend, sind (Malina et al., 2004).

7.3 Hypertrophie

Des Weiteren ist zu klären, welche Mechanismen für die trainingsbedingten Kraftzuwächse bei Kindern und Jugendlichen verantwortlich sind und ob sie sich von denen der Erwachsenen unterscheiden. Eine Möglichkeit wäre eine Zunahme der Muskelmasse (Hypertrophie) und der damit verbundenen Vermehrung der funktionellen Einheiten, den so genannten Sarcomeren. Dieses Potential wird Kindern jedoch gerade in der nationalen Literatur nach wie vor abgesprochen:

„Die Mechanismen, die dem Kraftzuwachs zugrunde liegen, basieren vor der Pubertät wohl auf einer Verbesserung der neuralen Muskelaktivierung und nicht auf einer Muskelhypertrophie.“
(Hebestreit et al., 2002).

Bei Erwachsenen wurde stets angenommen, dass die Muskelgröße, Muskelquerschnittsfläche, der wichtigste Parameter für die potentielle Kraftentwicklung darstellt (De Ste Croix, 2007). Da sich bei Kindern und Jugendlichen jedoch alleine wachstumsbedingt viele Einflussgrößen rasch verändern, sind solche Zusammenhänge deutlich schwerer zu untersuchen. Die zur Verfügung stehende kontraktile Masse, oft vereinfacht als Muskelgröße umschrieben, wird dabei in Abhängigkeit der verwendeten Messmethode in den verschiedenen Studien durch unterschiedliche Kenngrößen beschrieben. So beziehen sich der Muskelumfang, die Muskelmasse, der Muskelquerschnitt und das Muskelvolumen alle auf hypertrophische Prozesse, sind jedoch faktisch nicht gleichzusetzen.

Hinzu kommt, dass sich invasive Messmethoden, oder solche mit potentiell gravierenden Nebenwirkungen bei Kindern allein aus ethischen Gründen verbieten. Bei den angewandten Verfahren handelt es sich demnach meist um weitaus ungenauere Umfangsmessungen (Blanksby und Gregor, 1981; Blimkie et al., 1989; Christou et al., 2006; DeRenne et al., 1996; Faigenbaum et al., 1993; Hetzler et al., 1997; Ozmun et al., 1994; Rians et al., 1987; Sailors und Berg, 1987; Siegel et al., 1989; Vrijens, 1978; Weltman et al., 1986), welche mit einer hohen Fehleranfälligkeit behaftet sind. De Ste Croix geht davon aus, dass die Messung der Muskelgröße bei Kindern unter Verwendung anthropometrischer Messmethoden das tatsächliche Muskelvolumen um 30 % unterschätzt (De Ste Croix, 2007). Deighan et al. untersuchte den maximalen Muskelquerschnitt mittels MRT (Magnet Resonanz Tomographie) und kam zu dem Ergebnis, dass es altersabhängige Unterschiede in der Lokalisation des maximalen Muskelquerschnittes existieren (Deighan et al., 2006), was eine Umfangsmessung weiter als Messmethode dis-

qualifiziert. Hinzu kommt, dass es diesen Verfahren nicht möglich ist zwischen Muskelwachstum und einer Zunahme des Körperfettes zu differenzieren. Solche anthropometrischen Näherungen können daher als „Momentaufnahme“ dienen, um die Muskulatur und Knochen unterschiedlicher Populationen miteinander zu vergleichen, nicht jedoch als Monitoring zur Aufspürung von Muskelquerschnittsveränderungen im Rahmen von Krafttrainingsstudien ((Housh et al., 1995) in (De Ste Croix, 2007)). Berücksichtigt man, dass im Rahmen von Kurzzeitinterventionen auch bei Erwachsenen zum Teil keine Umfangsvergrößerungen nachzuweisen waren, dann wird deutlich, dass gerade bei Kindern, bei denen die Hypertrophieeffekte niedriger liegen werden, die genannte Methode nicht sensitiv genug ist, um Veränderungen zu erfassen (Staron et al., 1994; Young et al., 1983).

Eine weitere Methode zur Überprüfung von Hypertrophieeffekten wäre die Analyse trainingsabhängiger Veränderungen der Proteinbiosynthese. Da deren akute, sowie chronische Steigerung die biochemische Grundlage des Muskelwachstums darstellt, würde der Nachweis einer gesteigerten Synthese für eine Hypertrophie sprechen. Entsprechende Ergebnisse konnten für Erwachsene bereits nachgewiesen werden. Mittels der isotoopenmarkierter Aminosäure Leucin gelang es Chesley und seinen Mitarbeitern nachzuweisen, dass bereits ein einzelnes Training die Proteinsynthese im M. biceps brachii über 24 Stunden steigerte (Chesley et al., 1992). Da jedoch im Rahmen dieser Untersuchung Muskelbiopsien gewonnen werden müssen, ist diese Methode für Kinder als ungeeignet einzustufen.

Eine alternative Möglichkeit zur Erfassung von Veränderungen in der Proteinbiosynthese stellt ein aktuelles Verfahren dar, welches stabile Stickstoffisotope in Haaren nachweisen kann und damit Rückschlüsse auf katabole oder anabole Stoffwechsellagen zulässt. Aufgrund der nahezu konstanten Wachstumsgeschwindigkeit der Haare (ca. 0,3 Millimeter/Tag) entsteht eine relativ präzise Zeitachse, welche es rückblickend ermöglicht, absolvierte Trainingsbelastungen mit Steigerungen der Proteinbiosynthese abzugleichen (Huelsemann et al., 2008).

Neben dieser indirekten Methode sind aus oben genannten ethischen Gesichtspunkten und im Hinblick auf die Messqualität im Wesentlichen nur die Sonographie, insbesondere in Kombination mit anthropometrischen Messungen (Bemben et al., 2005), und die weitaus genauere Methode via MRT geeignet. Doch die Untersuchungen mit derartigen Messmethoden sind äußerst selten und viele der durchgeführten Studien haben es gänzlich versäumt, Hypertrophieeffekte zu untersuchen. Obwohl es nur wenige Studien zu diesem Bereich gibt und die beiden oft zitierten Studien von Mersch und Stoboy (Mersch und Stoboy, 1989) bzw. von Fukunaga (Fukunaga et al., 1992) bereits mehr als 15 Jahre zurückliegen und erstere sich auf gerade einmal 4 Probanden bezieht, gibt es diesbezüglich kaum aktuellere Studien. Möglicherweise ist ein Grund der, dass selbst bei ei-

nem Nachweis einer Hypertrophie diese nur einen geringeren Anteil an dem trainingsbedingten Kraftzuwachs bei Kindern ausmacht (Tolfrey, 2007). Rowland merkte jedoch an, dass Kinder aufgrund ihrer niedrigen Hormonspiegel im Vergleich zu Erwachsenen möglicherweise einfach länger und intensiver belastet werden müssten, um Hypertrophieeffekte beobachten zu können (Rowland, 2005). Um ein effektives Training zu gestalten, sollten daher angemessene Trainingspläne mit ausreichend schwerem Gewicht zur Anwendung kommen, welche darüber hinaus über einen ausreichend langen Zeitraum durchgeführt werden (Kraemer und Fleck, 2005). Auch Tolfrey hält die durchschnittliche Studiendauer von acht Wochen aus den gleichen Gründen wie Rowland für zu kurz (Tolfrey, 2007). Aber nicht nur in der internationalen Literatur sind derartige Überlegungen zur strukturellen Anpassung anzutreffen. Hollmann und Hettinger formulierten beispielsweise:

„Grundsätzlich gilt die Regel, dass im präpuberalen Alter die prozentualen Belastungsintensitäten in Relation zur maximalen Leistungsfähigkeit im Training höher liegen müssen, sollen strukturelle Modifikationen erreicht werden.“ (Hollmann und Hettinger, 2000).

Tab. 8: Einfluss von Krafttraining auf hypertrophische Prozesse

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Dauer/ Häufigkeit	Umfang	Quer-schnitt	M
(Vrijens, 1978)	16	10,5	8 W/ 3x pro Woche	sign. Arm (1,69 %) n.s. Oberschenkel (0 %)	n.s. Arm (2,36%) n.s. Oberschenkel (1,2%)	Rö
	12	16,67	9 W/ 3x pro Woche	sign. Arm (3,92 %) sign. Oberschenkel (1,98 %)	sign. Arm (4,6%) sign. Oberschenkel (14,25%)	Rö
(Blanksby und Gregor, 1981)	48	10-14	WS/ 3x pro Woche	n.s. re. Arm (1,84 %) n.s. li. Arm (1,03 %) n.s. re. Unterarm (2,4 %) n.s. li. Unterarm (0,35 %) n.s. re. Oberschenkel (0,52 %) n.s. li. Oberschenkel (5,23 %) n.s. re. Bein (2,55 %) n.s. li. Bein (1,00 %)	-	-
(Weltman et al., 1986)	26	8.2 +/- 1,3	14 W/ 3x pro Woche	n.s. Nacken (1,6 %) sign. Schulter (1,8 %) sign. Brust (2,5 %) sign. Bauch (4,1 %) n.s. Gesäß (-0,8 %) n.s. re. Oberschenkel (-0,6 %) n.s. re. Knie (1,2 %) n.s. re. Wade (2,9 %)	-	-

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Dauer/ Häufigkeit	Umfang	Quer-schnitt	M
				n.s. re. Knöchel (-0,3 %) n.s. re. Deltamuskel (1,2 %) n.s. re. Biceps gestreckt (7 %) n.s. re. Biceps flektiert (3,9 %) n.s. re. Unterarm (3,2 %) n.s. re. Handgelenk (1,7 %)		
(Funato et al., 1987)	8	6,9 +/- 0,3	14 W/ 3x pro Woche	-	n.s. Oberarm (6,09 %)	US
	7	7,0 +/- 0,3	14 W/ 3x pro Woche	-	sign. Oberarm (13,86 %)	
	10	9,0 +/- 0,3	14 W/ 3x pro Woche	-	sign. Oberarm (5,97 %)	
	7	9,0 +/- 0,4	14 W/ 3x pro Woche	-	sign. Oberarm (9,91 %)	
	10	11,0 +/- 0,3	14 W/ 3x pro Woche	-	sign. Oberarm (12,67 %)	
	10	11,9 +/- 0,3	14 W/ 3x pro Woche	-	sign. Oberarm (11,97 %)	
(Sailors und Berg, 1987)	11	12,6 +/- 0,69	8 W/ 3x pro Woche	n.s. Biceps (-0,3 %) n.s. Wade (-1,81 %)	-	-
(Blimkie et al., 1989)	14	10,4 +/- 0,8	10 W/ 3x pro Woche	sign. re. Oberarm (0,97 %)	sign. re. Oberarm (2,81 %)	UH
(Siegel et al., 1989)	26	8,37 +/- 0,2	12 W/ 3x pro Woche	n.s. Oberarm + Brust (1,05 %)	-	-
	24	8,5 +/- 0,42	12 W/ 3x pro Woche	n.s. Oberarm + Brust (0,65 %)	-	-
(Ramsay et al., 1990)	13	9-11	20 W/ 3x pro Woche	-	sign. FFM Oberarm (2,6 %) sign. FFM Oberschenkel (5,3 %) sign. Ellbogenbeuger (7,7 %) sign. Kniestrecker (8,1 %)	CT
(Faigenbaum et al., 1993)	14	10,8	8 W/ 2x pro Woche	n.s. Oberarm (1,9 %) n.s. Brust (1,1 %) n.s. Taille (0,004 %) sign. Oberschenkel (2,4 %)	-	-
(Ozmun et al., 1994)	8	10,5 +/- 0,55	8 W/ 3x pro Woche	n.s. Oberarm (1,26 %)	-	-
(DeRenne et al., 1996)	7	13,25 +/- 1,26	12 W/ 1x pro Woche	n.s. Brust (0,96 %) n.s. Biceps (-0,25 %) n.s. Taille (-1,93 %) n.s. Oberschenkel (-0,48 %) n.s. Wade (-0,64 %)	-	-
	8		12 W/ 2x pro Woche	n.s. Brust (1,2 %) n.s. Biceps (1,6 %) n.s. Taille (-0,56 %) n.s. Oberschenkel (1,3 %) n.s. Wade (-0,51 %)	-	-

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Dauer/ Häufigkeit	Umfang	Quer-schnitt	M
	6		12 W/ 3x pro Woche	n.s. Brust (2,4 %) n.s. Biceps (0,7 %) n.s. Taille (2,4 %) n.s. Oberschenkel (2 %) n.s. Wade (5,7 %)	-	-
(Hetzler et al., 1997)	10	13,8+/- 0,6	12 W/ 3x pro Woche	n.s. Brust (2,04 %) sign. Biceps (1,03 %) n.s. Taille (1,37 %) n.s. Oberschenkel (1 %) sign. Wade (1,5 %)	-	-
	10	13,2+/- 0,9	12 W/ 3x pro Woche	n.s. Brust (0,85 %) n.s. Biceps (2,12 %) n.s. Taille (-0,7 %) n.s. Oberschenkel (-0,4 %) n.s. Wade (0,88 %)	-	-

N = Anzahl der untersuchten Probanden; M = angewandte Methode, WS = Winter season

Konzentriert man sich auf die Ergebnisse der Muskelquerschnittsuntersuchungen und vernachlässigt die ungenaue Methode der Umfangsmessung (siehe Tab. 8), so zeigt sich im Mittel eine Hypertrophie von 6,7 % bei Kindern und Jugendlichen, wobei 12 der 14 untersuchten Probandengruppen signifikante Ergebnisse aufwiesen.

Alle bisher genannten Aspekte geben sicherlich Anlass, den Hypertrophieaspekt bei Kindern und Jugendlichen neu zu überdenken. Auch wenn Blimkie eine Hypertrophie deutlich in Frage stellt, so ergänzt er doch:

„Nevertheless, these results leave open the possibility of strength training induced muscle hypertrophy even during pre-adolescents.“ (Blimkie und Sale, 1998).

Dennoch übertreffen die Zuwächse der Kraft bei weitem die der Hypertrophie (Malina et al., 2004) und es bleibt daher zu klären, welche Mechanismen für diese Differenz verantwortlich sind.

7.4 Veränderungen der Muskelfasertypen

Neben der Zunahme der Muskelfasergröße könnten auch Modifikationen der Muskelfaserzusammensetzung einen Teil der Krafttrainierbarkeit erklären. Derartige Umbauprozesse im Rahmen eines Krafttrainings sind für Erwachsene in der Literatur gut dokumentiert (Fleck und Kraemer, 2004; Hollmann und Hettinger, 2000; Stone et al., 2007; Wilmore et al., 2008). Hierbei scheint eine Transformation von IIB-Fasern in Richtung IIA-Fasern stattzufinden, welche mit einer Veränderung in der Expression von Proteinisofomen und der mATPase Aktivität einhergeht

(Adams et al., 1993; Fleck und Kraemer, 2004). Hinzu kommt eine Hypertrophie der Typ-II Fasern, bei geringer bzw. ausbleibender Hypertrophie der Typ-I Fasern (Wackerhage und Atherton, 2006). Kesidis et al. zeigen in einer aktuellen Studie, dass durch ein Krafttraining besonders die von Klitgaard et al. beschriebenen intermediären Hybridfasern IIAX¹¹ (Klitgaard et al., 1990) beeinflusst werden und diese in Zahl und Querschnitt zunehmen (Kesidis et al., 2008). Die in diesen Studien untersuchten Bodybuilder wiesen 16,5 % (+/-12,8 %) IIAX Fasern auf, während sich bei den untrainierten Probanden nur 6,5 % (+/-6,0 %) fanden. Auch die durchschnittliche Querschnittsfläche dieses Fasertyps war mit 7976 μm^2 fast 40 % größer als bei der untrainierten Kontrollgruppe (4673 μm^2).

Da muskelbiopsische Untersuchungen mit der traditionellen Stanzmethode jedoch sehr schmerzhaft sein können, sind direkte Nachweise trainingsinduzierter Transformationen der Muskelfasertypen im Kindes und Jugendalter bislang nicht angestellt worden (Menzi et al., 2007). Schmerzauslösend wirkt dabei neben der Einführung der Biopsienadel in die Haut, die bei der Durchstechung der Muskelmembran entstehende unwillkürliche Kontraktion des Muskels. Neuere Methoden wie die Feinnadelbiopsien, bei welcher unter lokaler Betäubung eine Hohlnadel in den Muskeleingeführt wird, werden aufgrund des geringeren Nadeldurchmessers hingegen deutlich besser toleriert. Dank moderner Analyseverfahren wie der „real-time PCR“ (Polymerase-Kettenreaktion) und dem „Western blotting“ ist man in der Lage, auch aus den vergleichsweise kleineren Gewebeproben Rückschlüsse auf die Gen- und Proteinexpression zu machen (Tobina et al.).

Die wenigen bisher durchgeführten Biopsiestudien für diese Altersklasse stammen aus den 70er Jahren (Bell et al., 1980; Eriksson et al., 1973; Lundberg et al., 1979) und beschränkten sich dabei auf die physiologischen altersabhängigen Faktoren. Der Einfluss eines Krafttrainings auf die prozentuale Verteilung der einzelnen Muskelfasersubtypen wurde für den Nachwuchssport bislang nicht untersucht.

Abgesehen von der Schmerzproblematik kommt hinzu, dass bei Muskelbiopsien üblicherweise nur ein oberflächliches Biopsat gewonnen wird, während tiefere Schichten nicht erreicht werden. Aus Sektionsstudien mit Kleintieren weiß man jedoch, dass sich beispielsweise in tieferen, knochennahen Muskelschichten vermehrt rote Muskelfasern befinden (Spurway, 2006). Nach Spurway finden sich auch bei größeren Lebewesen wie dem Menschen, eine vergleichbare Fasertypenverteilung, auch wenn der Gradient von der Tiefe zur Oberfläche bei vielen Muskeln etwas schwächer ausgeprägt ist (Spurway, 2006). Untersuchungen des M. obliquus capitis inferior zeigen dagegen ähnlich starke Verteilungsmuster wie bei den zuvor genannten Kleintieren. Richmond et al. gaben an, dass „Slow-

¹¹ Hybridfasern vom Typ IIAX exprimieren sowohl Myosin-Heavy-Chain (=MHC) Isoformen vom Typ MHC IIA, als auch vom Typ IIX.

Twitch-Fibers“ (Typ-1) in den tiefsten Schichten dieses Muskels zwischen 95 % - 100 % ausmachen, während ihr Anteil in der oberflächlichen Schicht bei nur 10 % betrug (Richmond et al., 1999).

Anhand dieser Zusammenhänge lässt sich erkennen, dass eine Muskelbiopsie die Muskelfaserverteilung nur unzureichend wiedergeben kann. Spurway kommt daher zu dem Schluss, dass eine Aussage über die Zusammensetzung eines Muskels nur mittels Studien von Leichen getroffen werden können (Spurway, 2006)

Denkbar sind aber auch Näherungswerte mit Hilfe eines Oberflächen-EMGs. Bereits seit Ende der 70er Jahre versucht man, unter Anwendung dieser Methode auf die Muskelfaserverteilung zu schließen (Gerdle et al., 1991; Komi und Tesch, 1979; Wretling et al., 1987). Die Ergebnisse der frühen Studien machten einen Zusammenhang zwischen elektromyographisch messbaren Aktivierungsmustern und der Fasertypenverteilung zwar wahrscheinlich, konnten diesen aber nicht eindeutig nachweisen. Die Begründung dafür liegt in einer Beschränkung dieser Studien auf in-vivo Versuche mit willkürlichen Muskelkontraktionen, in denen physiologische Einflussgrößen nicht kontrolliert werden konnten. Erst 1995 verglichen Kupa et al. anhand eines in-vitro Modells die Ergebnisse einer Oberflächenableitung mit denen der histochemischen Aufbereitung der Muskelfasern (Kupa et al., 1995). Dabei fanden die Autoren signifikante Korrelationen zwischen der initial gemessenen mittleren EMG Frequenz und dem Anteil an langsamen oxidativen Muskelfasern ($r = -0,92$), schnell oxidativen glycolytischen Muskelfasern ($r = 0,83$) beziehungsweise den schnell glycolytischen Muskelfasern ($r = 0,9$). Kupa et al. kommen anhand ihrer Daten zu folgendem Schluss:

„These findings support the possibility of utilizing surface EMG techniques to obtain a non-invasive electrophysiological “muscle biopsy” for estimating muscle fiber composition.”(Kupa et al., 1995).

7.5 Neurologische und nervale Anpassungserscheinungen

Wenn die Hypertrophie nur einen geringen Teil der Krafttrainierbarkeit erklärt, liegt eine Verbesserung auf nervaler Ebene nahe, auch wenn es auch dafür bisher nur recht wenige klare wissenschaftliche Belege gibt (Armstrong et al., 2007; Rowland, 2005; Tolfrey, 2007):

Durch den Einfluss von hemmenden corticospinalen Bahnen gestaltet sich die Diskrimination von muskulären und neuronalen Adaptationen als schwierig. Eine Möglichkeit zur isolierten Untersuchung von Anpassungserscheinungen im Rekrutierungsmuster, bietet die weiter oben erwähnte iatrogene Stimulation einzelner Nerven, bei gleichzeitiger Registrierung der evozierten Kraft. Auch die motivatio-

nenalen Einflüsse auf die Testergebnisse bleiben, wie erwähnt, bei diesem Verfahren außen vor. Es muss jedoch bedacht werden, dass diese Methode für einige Kinder unangenehm oder sogar schmerzvoll sein kann (Tolfrey, 2007), so dass Informationen über trainingsbedingte Modifikationen selten sind. Ramsay et al. haben unter Anwendung dieser Methode den Einfluss neuronaler Anpassungserscheinungen unter einem 20wöchigen Krafttraining mit 13 präpubertären Jungen untersucht (Ramsay et al., 1990). Während sich hinsichtlich der Muskelquerschnittsfläche innerhalb der Untersuchungsgruppen signifikante Zuwächse ergaben, wurden bezüglich der Rekrutierung in keiner der Gruppen signifikante Veränderungen erfasst. Dennoch bestand eine Tendenz zur vermehrten Muskelfaseraktivierung. Die nichtsignifikanten Zuwächse in der prozentualen Aktivierung der motorischen Einheiten betragen für Ellbogenbeuger und Knieextensoren jeweils 13,2 % und 17,4 %. Aus diesen Resultaten folgern die Autoren, dass Verbesserungen in der Muskelkraft nicht vollständig auf Veränderungen in der Muskelaktivierung zurückgeführt werden können, und dass andere neurologische Adaptationen, wie Modifikationen in der Synchronisation, Rekrutierungsabfolge und Frequenzierung motorischer Einheiten, als auch in der intermuskulären Koordination eine Rolle spielen. Zu ähnlichen Befunden gelangten Blimkie et al. (1989), welche in Folge einer 10wöchigen Krafttrainingsintervention bei präpubertären Jungen (N=27) eine insignifikante Zunahme der % MUA der Ellbogenbeuger von 9 % beobachteten (Blimkie et al., 1989).

Eine weitere Möglichkeit, nervale Veränderungen durch ein Krafttraining zu identifizieren, bietet auch hier prinzipiell die Elektromyographie (EMG). Mit diesem Verfahren kann die elektrische Aktivität des Muskels gemessen werden. Dies geschieht entweder über in den Muskel eingebrachte Nadel-Elektroden (Nadel-EMG) oder über Klebe-Elektroden, welche auf die Hautoberfläche aufgebracht werden (Oberflächen EMG). Sollen Rekrutierungsmuster erfasst werden, welche den zeitlich- und räumlichen Verlauf der Erregung anzeigen können, kommen 2-D-Multichannel-Oberflächenmyographen zur Anwendung. Da bei solchen mehrkanalig registrierten Elektromyogrammen eine topographisch-orientierte Darstellung der Verteilung spektraler EMG-Parameter durch farbige Karten erfolgt, spricht man auch von einem sogenannten Mappingverfahren (Witte et al., 1991). Aus den Ergebnissen lassen sich sowohl die Leitungsgeschwindigkeit der Muskulatur, als auch die Faserorientierung ableiten (Gronlund et al., 2005). Solche Mapping-Technologien sind sicher traditionellen EMG-Ableitungen überlegen, stellen aber aufgrund der Datenmengen hohe Anforderungen an die Auswertungsparadigmen.

Insgesamt sind auch Untersuchungen mit diesen Messmethoden bei Kindern und Jugendlichen selten. Eine frühe Untersuchung von Komi et al. (1978) konnte unter Anwendung eines Oberflächen-EMGs bei jugendlichen Zwillingen (14,9 Jahre) zeigen, dass eine 20 %ige Verbesserung der Knieextensionskraft mit einer signifi-

kant erhöhten iEMG Aktivität des M. rectus femoris einherging, während sich der Umfang des Oberschenkels nur insignifikant um 1,8 % erhöhte (Komi und Karlsson, 1979). Diese Autoren folgerten daraus, dass die Kinder nach dem isometrischen Krafttraining einen größeren Anteil der verfügbaren motorischen Einheiten aktivieren konnten, wie es auch bei Erwachsenen zu beobachten ist. Gleichzeitig beobachteten die Wissenschaftler in submaximalen Belastungsbereichen ein effizienteres Rekrutierungsmuster. Auch Ozmun et al. fanden nach einem achtwöchigen Training mit präpubertären Kindern eine signifikant erhöhte Aktivität im iEMG (16,8 %), während die Kontrollgruppe keine signifikanten Veränderungen (-6%) diesbezüglich aufwies (Ozmun et al., 1994). Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass frühe Zuwächse der Kraft auf einer verbesserten Muskelaktivierung beruhen. In einer aktuelleren Studie von Lopes et al. mit elf präpubertären Kindern fanden sich dagegen keine signifikante EMG Modifikation (Lopes et al., 2001).

Die Veränderung der elektrischen Aktivität scheint somit einen Teil der hypertrophieunabhängigen Krafttrainierbarkeit bei Kindern und Jugendlichen zu erklären. Wie groß dieser Einfluss im Vergleich zu anderen Parametern ist, lässt sich anhand der bislang durchgeführten Studien jedoch nicht abschätzen.

Tab. 9: Neurologische Anpassungserscheinungen im Krafttraining mit Kindern und Jugendlichen.

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Dauer/ Häufigkeit	Messverfahren	Ergebnis
(Komi et al., 1978)	3	14,9	12 W/ ?x pro Woche	iEMG	sign. Zuwachs von 38 % im maximalen iEMG des M. rectus femoris
(Blimkie et al., 1989)	14	10,4 +/- 0,8	10 W/ 3x pro Woche	Interpolated Twitch Technique	n.s. Trend zur erhöhten % MUA der Ellbogenbeuger (9 %)
(Ramsay et al., 1990)	13	10,5	20 W/ 3x pro Woche	Interpolated Twitch Technique	n.s. Zuwachs in der % MUA der Ellbogenbeuger (13,2 %) und Knieextensoren (17,4 %)
(Ozmun et al., 1994)	8	10,5 +/- 0,55	8 W/ 3x pro Woche	iEMG	sign. Zuwachs der iEMG-Amplitude der Armbeuger (16,8 %)
(Lopes et al., 2001)	6	9,52 +/- 0,55	10 W/ 3x pro Woche	iEMG	n.s. Veränderungen im iEMG der Armbeuger und -strecker

iEMG = integrierte Elektromyographie; n.s. = nicht signifikant; sign. = signifikant

Die mit Hilfe von eingebrachten Nadelelektroden erfassbare Veränderung der Motoneuronenentladungsfrequenz stellt eine weitere interessante Messgröße bei der Klärung neurologischer Anpassungsreaktionen dar. Die Beziehung zwischen Kraft und Entladungsfrequenz wird von den meisten Autoren als s-förmig beschrieben ((Clamann, 1970; Kanosue et al., 1979; Petajan und Philip, 1969; Tanji und Kato, 1973) in (Perl, A., 2004)). Bei geringer Muskelanspannung findet demnach eine Kraftsteigerung über eine erhöhte Entladungsfrequenz statt, während weitere

Kraftzuwächse bei gleich bleibender Entladungsrate, vornehmlich durch Rekrutierung neuer motorischer Einheiten geschieht. Erst ab circa 70 % der Maximalkraft, wo bereits ein Großteil der verfügbaren motorischen Einheiten aktiviert ist, werden weitere Kraftreserven wieder über eine Steigerung der Motoneuronenfrequenz erzeugt (Perl, A., 2004). Während Veränderungen in Form von niedrigeren Entladungsraten mit einhergehendem Kraftverlust im Alter gezeigt werden konnten, fehlen Informationen über krafttrainingsbedingte Anpassungen der Frequenzierung im Kindes und Jugendalter, da das intramuskuläre Einbringen von Nadeln aus ethischen Gründen bei Kindern problematisch ist (Rowland, 2005).

Aufgrund von theoretischen Überlegungen sind durchaus weitere Anpassungserscheinungen denkbar. Eine davon könnte die Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen motorischen Endplatten und den dazugehörenden Muskelfasern sein. Derartige Veränderungen wurden jedoch bisher nur im Tierexperiment mittels hochintensivem Training nachgewiesen (Rowland, 2005). Die Ergebnisse aus den Tierversuchen weisen darauf hin, dass sich eine Vergrößerung der neuromuskulären Kontaktfläche in einer verminderten Muskelermüdung äußert (Deschenes et al., 2000). Das könnte insbesondere bei Krafttests mit höheren Wiederholungszahlen einen weiteren Teil der hypertrophieunabhängigen Zuwächse in der Kraftleistung erklären. Leider werden diese und andere neuroplastische Anpassungserscheinungen aufgrund der Invasivität derzeitiger Untersuchungsverfahren auch in näherer Zukunft für das Krafttraining von Kindern und Jugendlichen kaum geklärt werden können.

Auch eine verminderte Ko-contraktion von antagonistischen Muskeln, sowie eine reduzierte zentrale Hemmung von Aktionspotentialen ist denkbar, bisher jedoch nicht untersucht worden.

Anhand der dargestellten Literaturlage ist deutlich zu erkennen, dass die Veränderungen auf neuronaler Ebene sicherlich einen Teil zu den hypertrophieunabhängigen Kraftzuwächsen beitragen, deren Ausmaß und Form jedoch alles andere als sicher wissenschaftlich geklärt ist. Malina et al. fassten diese Tatsache wie folgt zusammen:

„The nature of the response is not known with certainty, but probably includes enhanced motor unit recruitment and frequency of motor unit firing.” (Malina et al., 2004).

Bezugnehmend auf das vorherige Kapitel ist zu sagen, dass offensichtlich auch für die neuronalen Adaptationen im Krafttraining von Kindern und Jugendlichen wenig Daten verfügbar sind, auch wenn hier die größten Anpassungserscheinungen vermutet werden. Möglicherweise wurde in der Vergangenheit auch deswegen den neurologischen Veränderungen das größte Anpassungspotential zugeschrie-

ben, weil es als erstes System nachweisbare funktionelle Modifikationen zeigt (Kraemer und Fleck, 2005), während strukturelle Veränderungen anderer Teilsysteme aufgrund der oft gewählten kurzen Studiendauer nicht nachweisbar sind.

7.6 Muskelmechanische Anpassungserscheinungen

Neben den neuronalen Veränderungen sind auch muskelmechanische Umwandlungsprozesse als Erklärung für die nachweisbaren Kraftzuwächse denkbar. Muskelarchitektonische Anpassungserscheinungen, wie die Veränderung des Fiederungswinkels und damit des physiologischen Muskelquerschnittes, könnten somit nicht nur bei reifebedingten (siehe Kapitel 6.2), sondern auch bei trainingsassoziierten Verbesserungen der Kraft eine Rolle spielen.

Eine Möglichkeit der nicht invasiven Identifikation von Veränderungen im Fiederungswinkel stellt die Untersuchung mittels Diffusions-Tensor-MRT dar. Bei dieser Methode wird die Diffusion von Wassermolekülen im Gewebe detektiert und anschließend über aufwendige Visualisierungstechniken dargestellt. Auf diese Weise können in vivo Muskelfaserverläufe untersucht werden, welche mit denen der direkten anatomischen Inspektion stark korrelieren ($r = 0,89$) (Damon et al., 2002). Aufgrund der hohen Kosten dieses Verfahrens, wird in der Praxis meist auf die Sonographie zurückgegriffen, mit deren Hilfe ebenfalls eine recht genaue Bestimmung der Insertionswinkel möglich ist (Rutherford und Jones, 1992).

Auch wenn der Beitrag zu einer Krafttrainierbarkeit bislang nicht geklärt wurde, existieren zumindest vereinzelte Hinweise auf derartige Strukturveränderungen mit dem Wachstum (s.o.). Die Relevanz einer derartigen Veränderung für die Krafttrainierbarkeit bleibt aus Sicht von Blimkie und Sale zu klären (Blimkie und Sale, 1998).

In der deutschen Literatur, sowohl auf Lehrbuchebeane, als auch in den veröffentlichten Studien, finden sich diesbezüglich bislang keine Informationen.

Eine weitere denkbare Modifikation muskelmechanischer Einflussgrößen auf die Kraft, wäre eine Verbesserung der Hebelarme. Würde ein Krafttraining durch Verschiebung der Muskelinsertionsstellen zu einer Vergrößerung der Hebelarme führen, ergäbe sich hierdurch eine weitere muskelgrößenunabhängige Kraftzunahme. Betrachtet man die Anpassungsfähigkeit dieser Insertionspunkte in Bezug auf das physiologische Längenwachstum (De Ste Croix, 2007), erscheint eine potentielle Veränderung im Rahmen von Krafttrainingsreizen zumindest nicht unwahrscheinlich.

Zählt man im weiteren Sinne auch Veränderungen der Sehne zu den möglichen Muskelmechanischen Anpassungserscheinungen, sind auch über diesen Weg

trainingsbedingte Kraftzuwächse denkbar. Um dieser Frage nachzugehen untersuchten Arampatzis et al. 66 männliche Probanden im Alter von 26 ± 5 Jahren, von denen 28 Ausdauerathleten und 28 Sprinter waren (Arampatzis et al., 2007). Dabei kam die Arbeitsgruppe zu dem Schluss, dass die mechanischen Eigenschaften (insbesondere die Steifigkeit) der Sehne und der Aponeurose des M. triceps surae nicht mit der Intensität der ausgeführten Sportart korrelierten. In einer weiteren Studie kam die genannte Arbeitsgruppe zu dem Ergebnis, dass weder statische noch zyklische Belastungen mit Dehnungen der Sehne um 2% - 6% ausreichen, um das Dehnungs-/Kraftverhältnis der Sehne oder der Aponeurose zu verändern. Erst wenn der applizierte Dehnungsreiz den Level übersteigt, welcher die Sehne unter Alltagsbedingungen ausgesetzt wird, sind Adaptationen in diesem Bereich zu erwarten (Arampatzis et al., 2009).

7.7 Genetische Einflüsse

Ein großes, bislang jedoch noch unzureichend erforschtes Gebiet stellen die genetischen Einflüsse auf die Krafttrainierbarkeit von Kindern und Jugendlichen dar. Daten hierzu existieren lediglich für den Bereich der physiologischen Kraftzuwächse im Rahmen der Reifeentwicklung, jedoch nicht für die Veränderung unter dem Einfluss von Trainingsreizen. Aber selbst Informationen zu ersterem finden über nur wenige internationale Lehrbücher ihren Weg in die Praxis.

Blimkie bezieht sich in dem Buch „Pediatric Anaerobic Performance“ auf Untersuchungen aus den 50er bis 80er Jahren (Engstrom und Fischbein, 1977; Komi und Karlsson, 1979; Komi et al., 1973) und spricht von geringen bis moderaten genetischen Einflüssen auf die isometrische Kraft einzelner Muskelgruppen (Blimkie und Sale, 1998).

Eine neuere Untersuchung von Beunen, welche Umwelt- und Geneinflüsse auf die isometrische Kraftleistungsfähigkeit und die Explosionskraft analysierte, kam zu vergleichbaren Resultaten (Beunen et al., 2003). Dabei wurden Daten einer Längsschnittstudie von 105 Zwillingspaaren verwendet und in Bezug auf die beiden zuvor genannten Krafftfähigkeiten analysiert. Auch hier kam man zu dem Schluss, dass die Kraftentwicklung unter moderaten bis moderat starken Beeinflussungen durch genetische Faktoren steht.

In dem von Hollmann und Strüder verfassten Standardwerk „Sportmedizin“ findet sich ein kurzer Abschnitt im Kapitel Krafttraining über die Genfunktion (Hollmann und Strüder, 2009). Die hier zitierte Studie von Häkkinen aus dem Jahr 1994 untersuchte die genetischen Einflüsse im Rahmen eines maximalen statischen Krafttrainings. Das Ergebnis war eine „70 %ige genetische Bestimmung der Kraftgröße und eine 84-86 %ige im Hinblick auf die Beschaffenheit der Armmuskulatur“ (Hollmann und Strüder, 2009). Bei den hier untersuchten Individuen handelte es sich jedoch um Zwillinge im dritten Lebensjahrzehnt und nicht um Kinder.

Für den genetischen Einfluss auf die Muskelfaserzusammensetzung (Typ 1 Fasern) fanden Simoneau und Bouchard Werte von 45 % (siehe

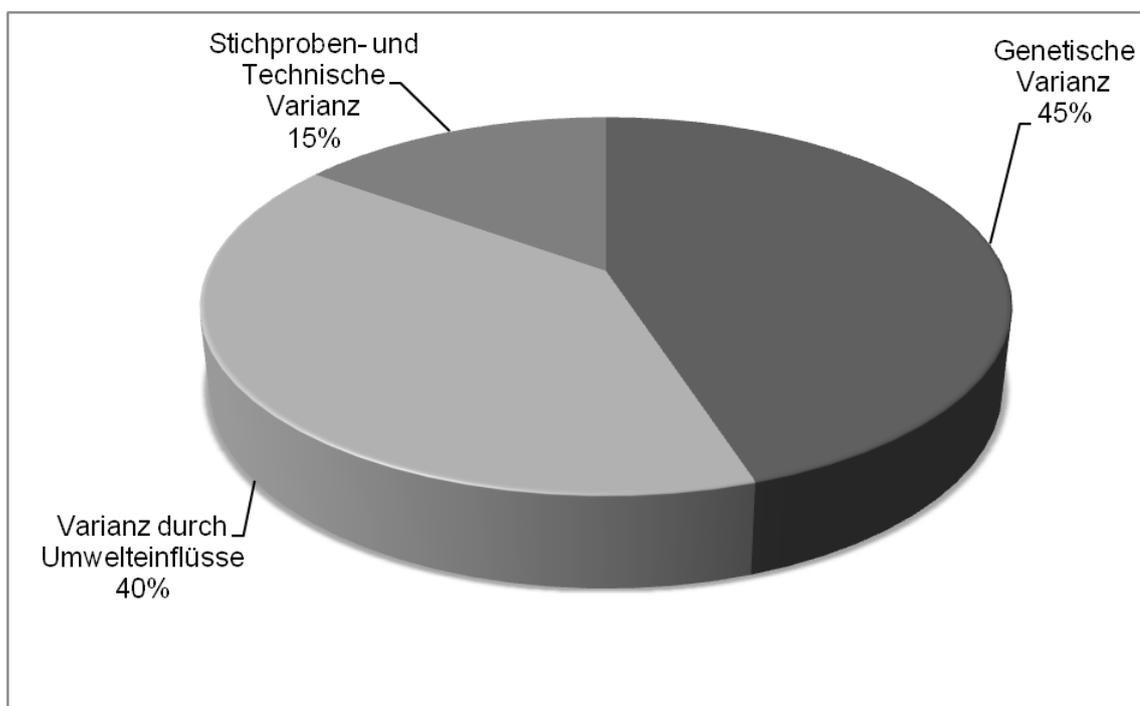


Abb. 28) (Simoneau und Bouchard, 1995).

Abb. 28: Übersicht über die prozentuale Verteilung verschiedener Einflussfaktoren auf das Größenverhältnis der Typ-1 Fasern im menschlichen Muskel. Abbildung nach (Simoneau und Bouchard, 1995).

Da aus der Sicht der Talentsuche und Talentförderung der Einfluss der Genetik bislang nicht abschätzbar ist, sind weiterführende Studien zu diesem Themenkomplex sicherlich lohnenswert, um präzisere Aussagen über Erfolgchancen treffen zu können. In einem der wenigen deutschsprachigen Werke zum Thema Kinder und Jugendtraining heißt es hierzu:

„So ist auch die gesamte Talentforschung im Sport, die sich auf humangenetische Erkenntnisse zu stützen versucht, bisher ohne Ergebnis geblieben.“ (Martin et al., 1999).

7.8 Hormonelle Einflüsse auf die Trainierbarkeit

Wie bereits im Kapitel „Hormonelle Einflüsse auf die Kraftentwicklung“ beschrieben wurde, steigt die Serum-Testosteronkonzentration bei Jungen von einem moderaten vierfachen Zuwachs zu Beginn der Pubertät auf einen rapiden zwanzigfachen Anstieg zur Mitte bis Ende der Pubertät an (De Ste Croix, 2007). Diese enormen Veränderungen im Hormonhaushalt sind bekanntermaßen verknüpft mit einer deutlichen Zunahme der Kraft und spiegeln sich in den typischen Wachstumsfunktionsgraphen wieder (siehe Abb. 1). Sie erklären auch die mit der Pubertät eintretende Kraftdifferenz zwischen Mädchen und Jungen, selbst unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Körpergrößen (Round et al., 1999). Diese Erkenntnisse beschreiben jedoch wie so häufig nur die physiologischen Veränderungen während des Reifeprozesses von Kindern und Jugendlichen. Welchen Einfluss die steigenden Serumtestosteronkonzentrationen jedoch auf die Trainierbarkeit haben, ist nach dem vorliegenden Kenntnisstand bislang noch unerforscht. Um diese Frage adäquat beantworten zu können, müssten die Ergebnisse der Kraftgewinne dem jeweiligen Hormonstatus der einzelnen Probanden gegenübergestellt werden.

In den vergangenen Untersuchungen wurde jedoch bisher lediglich die hormonelle Auslenkung der Sexualhormone gemessen, die während des Krafttrainings auftreten. Eine Zusammenfassung dieser Studien zeigt, dass sich auch mit diesem Teilbereich nur wenige Studien auseinandergesetzt haben (siehe Tab. 10).

Tab. 10: Hormonelle Veränderungen im Rahmen eines Krafttrainings.

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Dauer/ Häufigkeit	Testosteron	DHEA
(Weltman et al., 1986)	16	8.2 +/- 1,3	14 W/ 3x pro Woche	n.s.	n.s.
(Mersch und Stoboy, 1989)	2	8,8 / 11,2	10 W/ 6x pro Woche	79,41 %	17,01 %
(DeRenne et al.,	7	13,25+/- 1,26	12 W/ 1x pro Woche	8,50 %**	-

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Dauer/ Häufigkeit	Testosteron	DHEA
1996)	8	13,25+/- 1,26	12 W/ 2x pro Woche	7,30 %	-
	7	13,25+/- 1,26	12 W/ 3x pro Woche	20,50 %	-
	8	13,25+/- 1,26	12 W/ 3x pro Woche	16,20 %	-
(Tsolakis et al., 2000)	9	11,78 +- 0,84	8 W/ 3x pro Woche	124 %**	-
	13	14,92 +- 0,86	8 W/ 3x pro Woche	32 %**	-

*DHEA= Dehydroepiandrosteron; n.s.= nicht signifikant; ** = signifikant*

Die aktuellste Studie in diesem Zusammenhang von Tsolakis aus dem Jahr 2000 zeigte infolge einer 12wöchigen Krafttrainingsintervention einen dreifach höheren Anstieg des Testosteronspiegels bei der prä- bis frühpubertären Probandengruppe verglichen mit den im Schnitt drei Jahre älteren pubertären Jugendlichen (Tsolakis et al., 2000). Wie bedeutend aber eine solch akute Auslenkung für die Proteinbiosynthese und damit für strukturelle Anpassungsprozesse ist, bleibt ungeklärt. Da Testosteron neben seiner anabolen Wirkung auf die Muskulatur auch mögliche Einflüsse auf die Neurotransmitterfreisetzung hat (Souccar et al., 1982), sind Kraftanstiege auch über diesen Weg grundsätzlich denkbar.

Interessant zu klären wäre in diesem Zusammenhang auch, welchen Einfluss ein Krafttraining auf die Androgenaufnahme der Muskelzelle hat und ob es im Rahmen eines solchen Trainings zu einer erhöhten Androgensensitivität kommt (Rowland, 2005).

Da die Serumkonzentration von Testosteron von präpuberalen Kindern, trotz vergleichbarer Auslenkung unter Belastung, unter der von pubertierenden Jugendlichen liegt, verweisen einige Autoren darauf, dass auch wenn Testosteron präpuberal noch nicht verfügbar ist, andere anabole Faktoren durchaus schon vorhanden sind (Blimkie und Sale, 1998; Rowland, 2005). Hervorzuheben sind hier der „insulin like growth factor“ (IGF-I) und das „human growth hormone“ (HGH).

Einer der stärksten Reize für die Ausschüttung des Wachstumshormons stellt die körperliche Belastung dar, wobei das Ausmaß der Sekretion in einem linearen Zusammenhang mit der Intensität der Belastung zu stehen scheint (Rowland, 2005). Betrachtet man die akute hormonelle Antwort auf einen Trainingsreiz (15minütiges Pedallieren bei 70 % der VO₂max), so zeichnen sich relativ gesehen präpubertär (436,9 %) und intrapubertär (456,8 %) stärkere Hormonauslenkungen des Wachstumshormons ab als postpubertär (242 %) (Wirth et al., 1978). Jedoch ist die biologische Bedeutung dieser Wachstumshormonausschüttung nicht eindeutig geklärt. Möglicherweise stellt diese eine vorgreifende Reaktion im Sinne eines anabol-reparativen Prozesses dar, um eine strukturelle Regeneration von trainingsbedingten Schädigungen der Muskulatur zu erreichen (Rowland, 2005).

Diese Untersuchungen beziehen sich allerdings auf Ergometerbelastungen, die auf ein klassisches Krafttraining nur bedingt übertragen werden können. Daten über eine HGH-Sekretion im Kindes- und Jugendalter in Folge eines Krafttrainings fehlen bislang.

Gleichermaßen verhält es sich mit dem ebenfalls anabolen Hormon IGF-I. Bislang existieren ausschließlich Untersuchungsergebnisse aus Studien ohne einen direkten Bezug zum Krafttraining. Hier zeigten sich beispielsweise nach einem fünfwöchigen Ausdauertraining bei jugendlichen Mädchen (15 – 17Jahre) ein Abfall der IGF-I Konzentration (Eliakim et al., 1996), während präpubertäre Mädchen in einer späteren vergleichbaren Studie keine IGF-I Konzentrationsveränderungen aufzeigten (Eliakim et al., 2001). Demnach bleibt für IGF-I ebenfalls zu klären, inwieweit die in der Pubertät steigenden Werte mit der Trainierbarkeit von Kindern und Jugendlichen korrelieren und wie stark diese Baselinekonzentrationen durch ein Krafttraining ausgelenkt werden.

Die Bedeutung trainingsbedingter Auslenkungen anaboler Hormone für die Hypertrophie wird jedenfalls aktuell sehr kritisch bewertet. So kommt eine aktuelle Übersichtsarbeit zu dem Ergebnis:

“However, while these hormones are clearly anabolic during childhood and puberty, or when given at supraphysiological exogenous doses, the transient post-exercise elevations in hormone concentration are of little consequence to the either the acute protein synthetic response or to a hypertrophic phenotype after resistance training.” (West et al., 2010).

In einer kurz darauf veröffentlichten Arbeit ergänzen West und Phillips:

“Instead, our data indicate that exercise-induced hormonal elevations do not enhance intracellular markers of anabolic signaling or the acute postexercise elevation of myofibrillar protein synthesis. Furthermore, data from our training study demonstrate that exercise-induced increases in GH and testosterone availability are not necessary for and do not enhance strength and hypertrophy adaptations.”
(West und Phillips, 2010).

Möglicherweise bedeutender als die anabolen Hormone im Einzelnen, scheint jedoch das Verhältnis zwischen anabolen und katabolen Faktoren zu sein (Blimkie und Sale, 1998). Gerade das von der Nebennierenrinde exprimierte Cortisol scheint dabei eine zentrale Rolle zu spielen. Eine von Rich et al. durchgeführte Studie zeigte eine Verminderung des Testosteron - Cortisol Verhältnisses infolge eines fünftägigen Trainings bei acht Elite-Turnern (Durchschnittsalter: 10 Jahre und 11 Monate) (Rich et al., 1992). Vergleichbare Veränderungen fanden sich jedoch auch in der Kontrollgruppe. Das moderat intensive Training aus Kraft-, Beweglichkeits- und Technikkomponenten hatte somit keinen Einfluss auf das angesprochene Verhältnis. Als Ursache für dieses Ergebnis vermuteten die Wissenschaftler eine zu niedrige Trainingsintensität.

Mero et al. untersuchten die Leistungsfähigkeit von 19 Jungen in der Leichtathletik über ein Jahr und kontrollierten dabei ebenfalls die Hormonspiegel von Testosteron und Cortisol (Mero et al., 1990). Sie kamen zu dem Ergebnis, dass sich in der Trainingsgruppe sowohl die Testosteronkonzentration, als auch der Testosteron - Cortisol - Quotient signifikant veränderte und dieser in den letzten sechs Monaten der Studie mit der Leistungsverbesserung korrelierte. Derartige Zusammenhänge bleiben für ein Krafttraining im Nachwuchsleistungssport zu klären.

7.9 Stabilität der Kraftzuwächse

Es konnte dargestellt werden, dass die Kraft über alle Alters- und Entwicklungsstufen in den ersten beiden Lebensdekaden trainierbar ist und dass diesem Phänomen unterschiedliche biopositive Anpassungsprozesse zugrundeliegen. Die Frage, die sich jedoch insbesondere aus praktischen Gesichtspunkten stellt ist, wie lange die generierten Kraftzuwächse andauern - bzw. wie lange die Kinder und Jugendlichen von einem derartigen Training profitieren. Denkbar sind hier zwar auch Fragestellungen bezüglich der Knochenmineralisation, der Knorpeladaptation oder Effekten an anderen Geweben, welche dem Krafttrainingsstimulus ausgesetzt sind. Der Fokus dieses Kapitels soll jedoch ausschließlich auf die Stabilität der Kraftzuwächse gerichtet sein, welche die Persistenz der gewonnenen Trainingseffekte nach Reduktion oder Aussetzen weiterer Trainingsreize beschreibt. Bei nur geringer Stabilität der Kraftzuwächse müssten die jeweiligen Trainingsstimuli folglich in kleinen Abständen gesetzt bzw. größere Trainingspausen vermieden werden. Halten die generierten Effekte hingegen an, so wären gelegentliche, über das Jahr verteilte Krafttrainingseinheiten durchaus empfehlenswert - ob im Schulunterricht oder im Nachwuchsleistungssport.

Mit derartigen Fragestellungen wurde bereits eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, welche jedoch ein heterogenes Bild für die Stabilität der Kraftzuwächse zeichnen. Zwar fanden alle Untersuchungen einen durch Trainingsabbruch (= Detraining) Richtung Wachstumsfunktion konvergierenden Kraftverlauf, jedoch zeigte die Geschwindigkeit dieses Prozesses deutliche Unterschiede (siehe Tab. 11).

Tab. 11: Wöchentlicher Kraftverlust nach unterschiedlichen Belastungspausen im Anschluss an verschiedene Krafttrainingsinterventionen.

Autor, Jahr	N	Alter, [Jahre]	Traningsdauer [Wochen]	Belastungspause [Wochen]	Mittlerer Kraftverlust* [% / Woche]
(Sewall und Micheli, 1986)	18	10 - 11	9	9	1,4
(Diekmann und Letzelter, 1987)	66	8 - 10	3 x 12	3 x 40	-0,1 bis -0,08
Erstes Jahr	66	8	12	40	-0,1
Zweites Jahr	66	9	12	40	-0,08
Drittes Jahr	66	10	12	40	kM
(Blimkie et al., 1989)	12	9 - 11	20	8	kA

Autor, Jahr	N	Alter, [Jahre]	Tranings- dauer [Wochen]	Belastungs- pause [Wochen]	Mittlerer Kraftverlust* [% / Woche]
(Isaacs et al., 1994)	16	7 - 11	12	8	kA
(DeRenne et al., 1996)	21	13,25	12	12	1,48
(Faigenbaum et al., 1996)	24	10,5	8	8	2,96
(Sadres et al., 2001)	49	9,3	84	12	kA
(Reuter und Buskies, 2001)	118	11,9 u. 15,1	10	16	0,6 – 1,29
Untersuchung 1 (6. Klasse)	33	11,9	9	12	1,29
Untersuchung 1 (9. Klasse)	26	14,8	9	12	1,10
Untersuchung 2 (5. / 6. Klasse)	32	11,5	9	12	0,99
Untersuchung 2 (9. / 10. Klasse)	27	15,9	9	12	0,6
(Tsolakis et al., 2004)	19	11 - 13	8	8	1,19
(da Fontoura et al., 2004)	14	9,4	12	12	3

* = Mittelwert über alle Testübungen; kA = keine Angaben; kM = keine Messung

Den schnellsten Rückgang gewonnener Kraftzuwächse nach Belastungspause wurde von da Fontoura et al. beschrieben (da Fontoura et al., 2004). Dabei wurde eine Gruppe von sieben Kindern ($9,4 \pm 1,6$ Jahre) über einen Zeitraum von 12 Wochen, im Anschluss an eine ebenso lange Krafttrainingsintervention, beobachtet (da Fontoura et al., 2004). Eine weitere siebenköpfige Probandengruppe ($9,7 \pm 1,7$ Jahre) diente als Kontrolle. Das von da Fontoura gewählte Interventionsprogramm bestand dabei aus insgesamt acht Kraftübungen zu je drei Sätzen und 15 Wiederholungen. Nach Abschluss der 12wöchigen Intervention stellte sich bei den untersuchten Kindern ein Kraftverlustrate von 3% pro Woche ein. Dies führte dazu, dass die gewonnenen Trainingseffekte binnen acht Wochen verschwanden und bezogen auf die Körperkraft kein Unterschied mehr zwischen der Interventions- und Kontrollgruppe gefunden werden konnte. Auch in der Studie von Faigenbaum et al. wurden vergleichbare Detrainingeffekte gefunden. Die während der Trainingsphase gewonnenen Kraftzuwächse für die Beinstreckermuskulatur von 53,5% waren so stark rückläufig, dass am Ende der achtwöchigen Detrainingphase keine signifikanten Unterschiede mehr zwischen Interventions- und Kontrollgruppe nachgewiesen werden konnten. Ähnlich verhielt sich die an der Brustpresse gemessene Kraft, deren Intergruppendifferenz am Ende des Nachuntersu-

chungszeitraumes deutlich geringer war, als im Anschluss an die Interventionsphase (Post-Test). Faigenbaum et al. konnten darüber hinaus zeigen, dass der Kraftverlust zu Beginn des Detrainings schneller von statten geht, als in späteren Phasen der Belastungspause. So lag der prozentuale Kraftverlust für die angesprochenen Beinstrecker bei -21,3 % in den ersten vier Wochen, gefolgt von einer 6,8 %igen Reduktion in den darauf folgenden vier Wochen.

Diekmann und Letzelter (Diekmann und Letzelter, 1987), welche mit einer Studiendauer von drei Jahren den mit Abstand längsten Beobachtungszeitraum hatten, fanden jedoch gegenteilige Ergebnisse. Trotz der nur jeweils 12 Wochen dauernden Trainingsphasen beschreiben die Autoren einen, die Belastungspause von 40 Wochen überdauernden Effekt, auf welchen in der jeweils nächsten Trainingsphase aufgebaut werden konnte. Damit wurde der Abstand zur Kontrollgruppe über die komplette Studiendauer stetig ausgebaut (siehe *Abb. 29*). Reuter, welcher den Einfluss eines Detrainings bei Schülern unterschiedlicher Jahrgänge untersuchte, fand ebenfalls deutlich niedrigere Kraftverluste als die von Faigenbaum et al. angegebenen Werte. Der mittlere Kraftverlust lag dabei zwischen 0,6 % pro Woche bis 1,29 % pro Woche.

Der Grund für diese widersprüchlichen Ergebnisse ist unklar. In diesem Zusammenhang kritisch zu bewerten ist sicherlich die Stichprobengröße der Studie von da Fontoura et al. ($n = 14$). Aussagen über die Stabilität der Kraftzuwächse von Kindern und Jugendlichen anhand derart kleinen Datensätzen sind nur wenig belastbar. Auch die beschriebene Studie von Faigenbaum et al. weist mit 24 Probanden im Verhältnis zu den Studien von Diekmann & Letzelter und der von Reuter eine vergleichsweise kleine Stichprobengröße auf. Insgesamt lässt sich jedoch festhalten, dass die Kraftverlustrate über alle Studien hinweg in etwa zwischen 0,5 – 1,5% / Woche lag. Diese Werte sind durchaus vergleichbar mit denen, die auch aus Studien mit Erwachsenen Probanden bekannt sind (Mujika und Padilla, 2001).

Aus Untersuchungen mit Erwachsenen ist darüber hinaus bekannt, dass Phasen der Trainingspausen mit veränderten EMG-Mustern einhergehen, welche auf eine verminderte Entladungsfrequenz der Motoneurone und eine geringere Rekrutierung motorischer Einheiten hinweisen (Fleck und Kraemer, 2004). Wenngleich die genauen Mechanismen, welche dem Kraftverlust in Detrainingphasen zugrunde liegen, nicht geklärt sind, so ist es doch wahrscheinlich, dass die genannte neuromuskuläre Ansteuerung dabei eine Rolle spielt (Baechle et al., 2008). Verstärkt wird dieser Prozess durch strukturelle Veränderungen der Muskulatur, welche unter anderem in Form einer Atrophie in Erscheinung treten (Fleck und Kraemer, 2004). Dabei lässt sich ein Rückgang der Querschnittsfläche sowohl von Typ-I als auch von Typ-II Fasern beobachten (Mujika und Padilla, 2001). Die Mehrheit der

Autoren geht aktuell davon aus, dass es gleichzeitig zu einer Verschiebung der Faserverteilung mit einer Verminderung des Typ-I / Typ-II Verhältnisses kommt (Fleck und Kraemer, 2004).

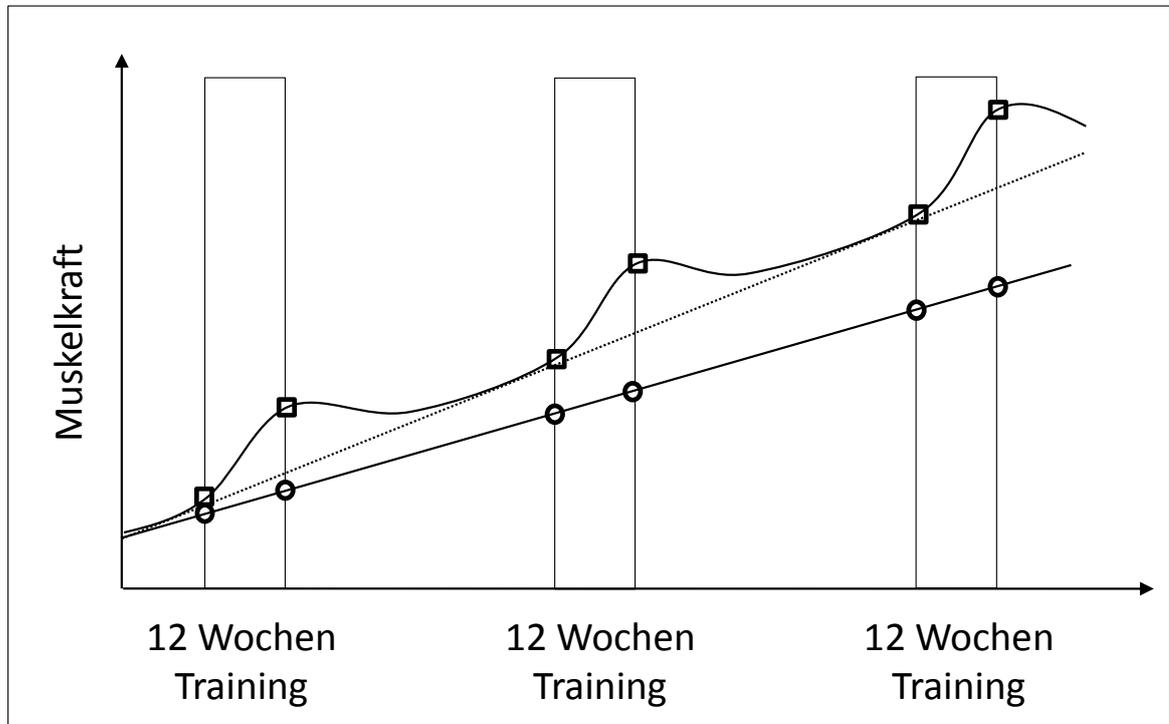


Abb. 29: Schematische Darstellung der Kraftzuwächse und -verluste im Rahmen der longitudinalen Studie von Diekmann und Letzelter (Diekmann und Letzelter, 1987). Gesamtzeitraum der Studie lag bei drei Jahren. □ = Trainingsgruppe; ○ = Kontrollgruppe; Gestrichelte Linie = Nettokraftzuwachs; Rechtecke = Zeitraum der Trainingsintervention (12 Wochen).

7.10 Fazit

Nach Verknüpfung aller oben genannten Faktoren gelangt man zu dem Schluss, dass ein Krafttraining in allen Phasen der Entwicklung bei Kindern und Jugendlichen bei entsprechend richtiger Durchführung effektiv ist. Positive Einflüsse konnten hierbei sowohl auf die einzelnen Kraftfähigkeiten, als auch auf die motorische und sportartspezifische Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden. War die Studienlage in Bezug auf die Krafttrainierbarkeit sehr umfangreich, fanden sich bei der Literaturrecherche nur wenige Untersuchungen, welche die Auswirkung eines Krafttrainings auf die motorische und sportartspezifische Leistungsfähigkeit untersucht haben. Im Hinblick auf die Bedeutung für das Nachwuchssporttraining oder den Schulsport ist jedoch gerade dieser Zusammenhang essentiell. Da nur wenige Studien Nachwuchssportler untersucht haben, ist auch die Frage nach der

Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf den Nachwuchssport kritisch zu bewerten. Vor diesem Hintergrund ist in zukünftigen Krafttrainingsstudien auf eine gezielte und kontrollierte Stichprobenauswahl zu achten.

Die Mechanismen, die der Kraftsteigerung zu Grunde liegen sind komplex und setzen sich vermutlich neben einer Veränderung auf neuraler Ebene, aus strukturell-morphologischen Veränderungen und einer hormonellen Anpassung zusammen. Bezogen auf diese Faktoren liegen nur vereinzelte und meist widersprüchliche Daten vor. Dabei ist zu berücksichtigen, dass alle vorgenannten Anpassungsmechanismen einer genetischen Beeinflussung unterliegen. Um die einzelnen Einflussfaktoren und ihren relativen Anteil an der Krafttrainierbarkeit zu bestimmen ist in zukünftigen Studien die Berücksichtigung sensibler Messverfahren obligat. Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass zur Untersuchung von strukturell-morphologischen Adaptationseffekten die Studiendauer über die initiale Phase eines Krafttrainings von acht Wochen hinausgehen sollte.

8 Sportartbezogene Relevanz

8.1 Sportartspezifische Leistungsfähigkeit

Da es eigentlich in keiner Sportart um die reine Verbesserung der Kraftleistungsfähigkeit sondern immer um die Verbesserung der Leistung bestimmter Zielübungen- / Techniken geht, stellt das Krafttraining im Nachwuchsleistungssport nur eine Komponente des allgemeinen Konditionstrainings dar. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob eine Vergrößerung der Kraft mit besseren sportartspezifischen Leistungen einhergeht. Aufgrund der Komplexität von sportartspezifischen Leistungen ist deren Verbesserung nur schwierig auf eine krafttrainingsadaptierte Muskulatur zurückzuführen. Um dennoch die Relevanz eines Krafttrainings für eine sportartspezifische Leistung im Nachwuchs zu klären, bietet es sich an, die Gesamtleistung in Form von sportartspezifischen Teilleistungen zu untersuchen. Insgesamt sind Studien, die eine Verbesserung der sportartspezifischen Leistung infolge eines Krafttrainings überprüft haben, jedoch äußerst selten (siehe Tab. 12).

Tab. 12: Auswirkungen von Krafttraining auf die sportartspezifische Leistungsfähigkeit.

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Ge.	Dauer/ Häufigkeit	SSL
(Blanksby und Gregor, 1981)	24	10-14	M+W	WS/ 3x pro Woche	sign. Schwimmzeit (9,83 %)
(Wiedner und Pfeiffer, 2006)	13	12-17	M	52 W/ 1x pro Woche	sign. 7,5-m-Startzeit (4,3 %) n.s. 15-m-Startzeit (2,7 %) sign. Wende (8 %) n.s. 10-m-Wende (2,4 %) sign. 10-m-Sprint (3 %) n.s. Delphinbewegung (3,1 %)
	10	12-17	W		sign. 7,5-m-Startzeit (3,0 %) sign. 15-m-Startzeit (1,8 %) n.s. Wende (1,4 %) n.s. 10-m-Wende (2,3 %) sign. 10-m-Sprint (2,3 %) n.s. Delphinbewegung (1,7 %)

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Ge.	Dauer/ Häufigkeit	SSL
	8	12-17	M		n.s. 7,5-m-Startzeit (4,9 %) sign. 15-m-Startzeit (2,8 %) sign. Wende (6 %) sign. 10-m-Wende (4,2 %) sign. 10-m-Sprint (1,4 %) n.s. Delphinbewegung (4,4 %)
	9	12-17	W		n.s. 7,5-m-Startzeit (5,7 %) n.s. 15-m-Startzeit (1,5 %) n.s. Wende (0,7 %) sign. 10-m-Wende (1,1 %) n.s. 10-m-Sprint (1,0 %) sign. Delphinbewegung (4,4 %)
(Christou et al., 2006)	26	12-15	M	16W/ 2x pro Woche	n.s. Fußballtechnik (-7,46 %)

SSL = Sportartspezifische Leistungsfähigkeit; n.s. = nicht signifikant; sign. = signifikant; Ge.= Geschlecht

In den ersten beiden Studien wurde die Leistungsverbesserung von Schwimmern durch ein Krafttraining untersucht. Blanksby und Gregor fanden dabei in ihrer Versuchsgruppe eine signifikante Verbesserung der Schwimmzeit (Kraul) auf 100yards um 9,8 %, während sich in der Kontrollgruppe keine signifikanten Verbesserungen zeigten (Blanksby und Gregor, 1981). Wiedner und Pfeiffer untergliederten die Testbatterie in mehrere schwimmspezifische Testleistungen und führten über zwei Jahre ein Schnellkrafttraining durch (Wiedner und Pfeiffer, 2006). Im ersten Jahr verbesserten sich die weiblichen und männlichen Probanden in drei der sechs Testübungen signifikant, während sich die Jungen im zweiten Jahr in vier und die Mädchen in drei der sechs Tests signifikant verbesserten. Die durchschnittliche Verbesserungsrate für die schwimmspezifischen Leistungen lag im ersten Jahr bei 3 % und im zweiten Jahr bei 3,4 %. Daraus ist zu folgern, dass durch Krafttraining ein positiver Effekt auf die sportartspezifische Leistungsfähigkeit im Schwimmen genommen werden kann. Ob derartige Zusammenhänge auch in anderen Sportarten zu finden sind, bleibt zu klären.

Trotz der unzureichenden Datenlage finden sich in vereinzelt Lehrbüchern ganz konkrete Hinweise auf ein Krafttraining zur Verbesserung der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit. So widmen Fleck und Kraemer ein ganzes Kapitel ihres Buches „Strength Training for Young Athletes“ diesem Thema (Kraemer und Fleck, 2005). Die dort aufgelisteten Empfehlungen orientieren sich jedoch lediglich an den in den jeweiligen Sportarten beanspruchten Muskelgruppen.

8.2 Motorische Leistungsfähigkeit

Eine weitere Möglichkeit, die Sportrelevanz eines Krafttrainings zu überprüfen, stellen die so genannten „motor performance tests“ dar. Auch wenn diese nicht exakt den Anforderungen der jeweiligen Sportart entsprechen können, so überprüfen sie doch Teilleistungen, welche in nahezu allen Disziplinen benötigt werden. Die am häufigsten angewandten Tests in den 69 untersuchten Studien zur Überprüfung einer Leistungsverbesserung nach einer Krafttrainingsintervention lassen sich in folgende Cluster unterteilen:

1. Schnelligkeit (Pendellauf, Sprints),
2. Sprungkraft (Vertikalsprünge, Weitsprünge),
3. Wurfkraft (Medizinballwurf, Medizinballstoss).

In der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Analyse deutsch- und englischsprachiger Studien zeigte sich eine durchschnittliche Verbesserung der Sprungkraft von 0,7 % pro Woche bei einer mittleren Studiendauer von 24,7 Wochen. Die Schnelligkeitstests wiesen bei einer Studiendauer von 17,4 Wochen im Durchschnitt eine 0,3 %ige Verbesserung pro Woche auf und bei der Wurfkraft lag die wöchentliche Zuwachsrate bei 1,3 % nach 18 Wochen. Dabei wurden erneut nur die Studien berücksichtigt, bei denen die Ergebnisse einer bestimmten Altersklasse zugeordnet werden konnten. Von insgesamt 69 Krafttrainingsstudien konnten somit 20 Untersuchungen, welche die motorische Leistungsfähigkeit überprüften, unter oben genannten Kriterien analysiert werden.

In den Abb. 30 bis 16 sind die wöchentlichen Veränderungen der verschiedenen motorischen Leistungsfähigkeiten gegen das chronologische Alter der Versuchsgruppen aufgetragen. Dargestellt sind die Ergebnisse der einzelnen Probandengruppen. Die Trainierbarkeit der Schnelligkeit, Sprung- und Wurfkraft steht dabei in keinem Zusammenhang mit dem chronologischen Alter ($p > 0,05$). Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass ein Krafttraining im Nachwuchsleistungssport neben einer reinen Kraftsteigerung zu einer Verbesserung von sportrelevanten Teilleistungen führen kann. Die Trainierbarkeit in diesem Bereich zeigt keine besonderen Vorteile für ältere Kinder, so dass ein Training im frühen Nachwuchsbereich als ähnlich effektiv einzustufen ist, wie es auch hinsichtlich der Verbesserung der Muskelkraft gezeigt werden konnte (vgl. Kapitel 7.1). Diese Aussage konnte durch eine kürzlich veröffentlichte Meta-Analyse bestätigt werden. Unter Berücksichtigung von insgesamt 49 themenrelevanten Studien mit 1432 Probanden, wurden hierbei, bezogen auf die oben genannten Testcluster, sogar signifikant größere Leistungszuwächse für jüngere Probanden gefunden, als für ältere (Behringer et al., 2010). Da auch Nichtsportler stärker von den Trainingsinterventionen profitier-

ten, als sportlich aktive Kinder und Jugendliche, übt das Ausgangsniveau vermutlich einen entscheidenden Einfluss auf die Trainierbarkeit der motorischen Leistungsfähigkeit aus.

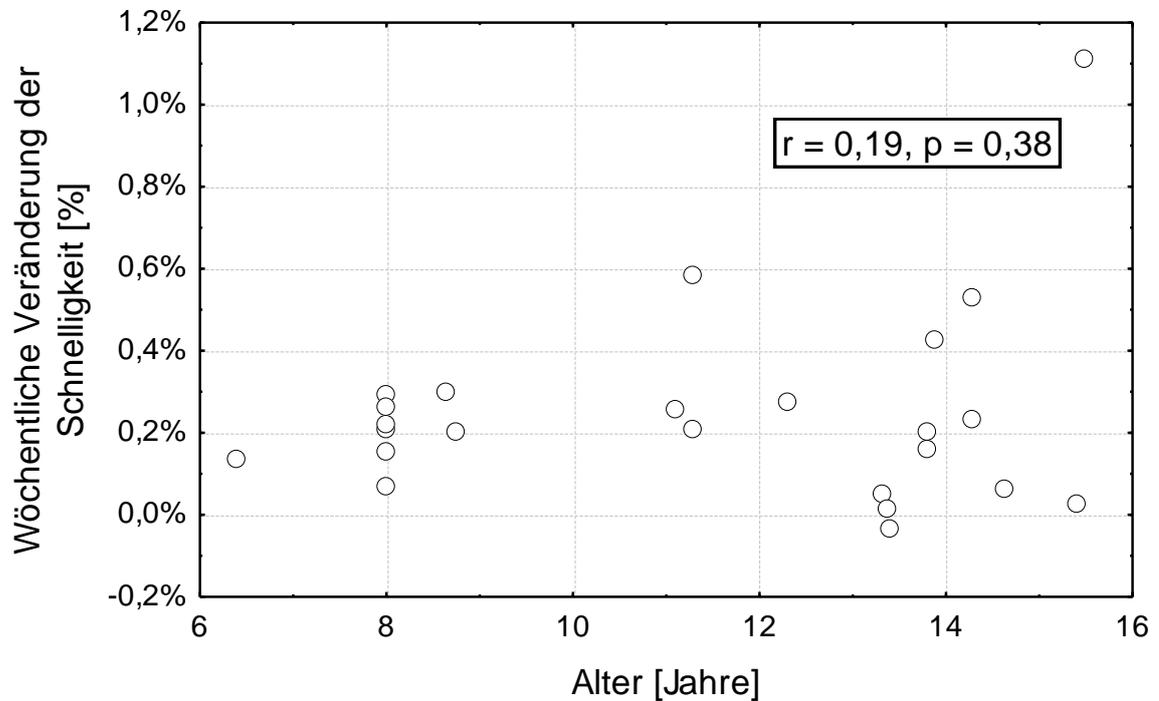


Abb. 30: Wöchentliche Veränderung der Schnelligkeit in Abhängigkeit vom Alter (Daten aus (Christou et al., 2006; Diallo et al., 2001; Diekmann und Letzelter, 1987; Faigenbaum et al., 2007; Faigenbaum und Mediate, 2006; Falk und Mor, 1996; Flanagan et al., 2002; Kotzamanidis, 2006; Steinmann, 1990; Wiedner und Pfeiffer, 2006)).

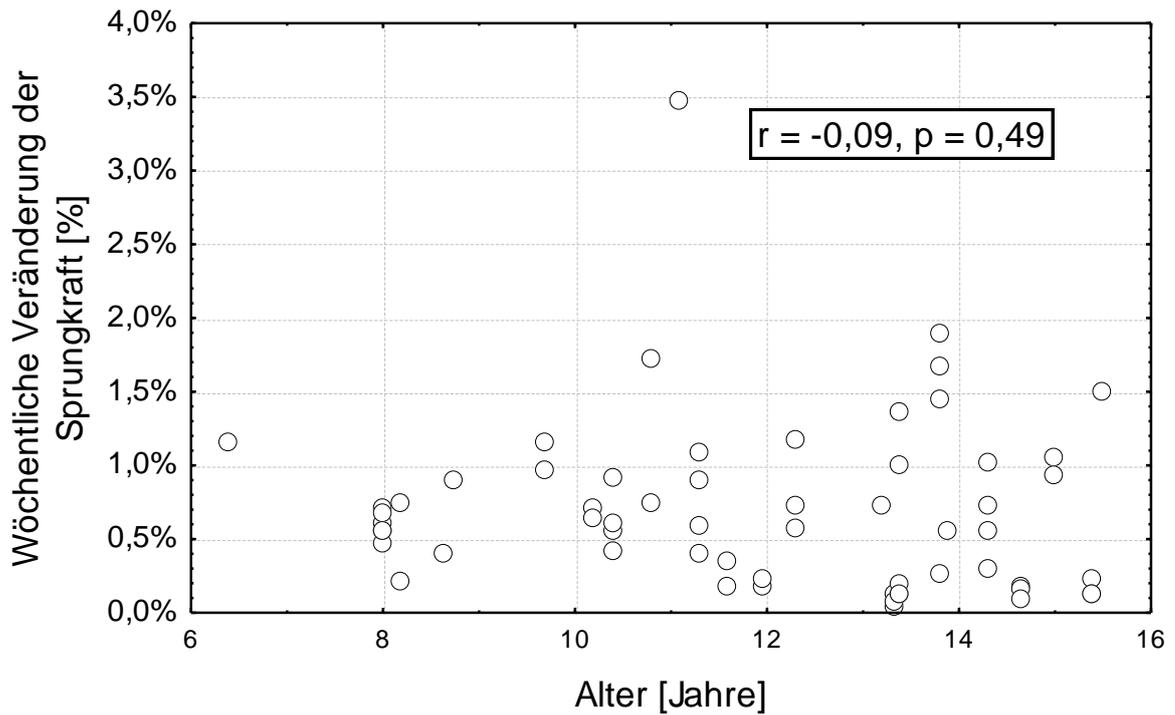


Abb. 31: Wöchentliche Veränderung der Sprungkraft in Prozent (Daten aus (Brown et al., 1986; Christou et al., 2006; Diallo et al., 2001; Diekmann und Letzelter, 1987; Faigenbaum et al., 2007; Faigenbaum et al., 2007; Faigenbaum und Mediate, 2006; Faigenbaum et al., 2005; Faigenbaum et al., 2002; Faigenbaum et al., 1996; Faigenbaum et al., 1993; Falk und Mor, 1996; Flanagan et al., 2002; Hetzler et al., 1997; Kotzamanidis, 2006; Steinmann, 1990; Umbach und Fach, 1990; Weltman et al., 1986; Wiedner und Pfeiffer, 2006)).

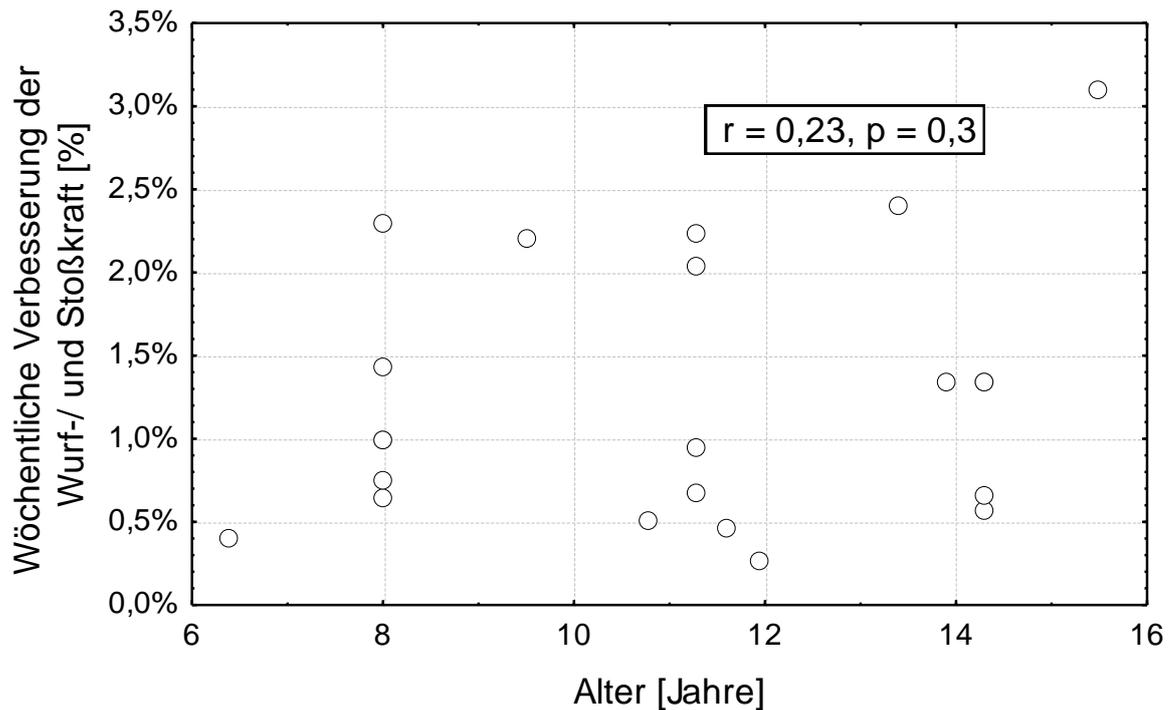


Abb. 32: Wöchentliche Veränderung der Wurf-/ und Stoßkraft in Abhängigkeit vom Alter (Daten aus (Diekmann und Letzelter, 1987; Faigenbaum et al., 2007; Faigenbaum et al., 2007; Faigenbaum und Mediate, 2006; Faigenbaum et al., 1993; Falk und Mor, 1996; Flanagan et al., 2002; Lopes et al., 2001; Steinmann, 1990; Umbach und Fach, 1990).

8.3 Fazit

Im Rahmen der Literaturanalyse konnte gezeigt werden, dass nur wenige Daten veröffentlicht wurden, welche den Einfluss eines Krafttrainings auf die sportartspezifische Leistung überprüften. Die drei zu dem Themenbereich vorliegenden Studien, welche im Fußball und im Schwimmsport durchgeführt wurden, fanden darüber hinaus widersprüchliche Ergebnisse. Da diesem Zusammenhang aber gerade aus Sicht des Nachwuchsleistungssportes eine besondere Bedeutung beigegeben werden sollte, ergibt sich ein dringender Forschungsbedarf. Insbesondere die Berücksichtigung unterschiedlicher Sportarten ist dabei zu fordern.

Die Studienlage für die verschiedenen motorischen Leistungsfähigkeiten ist mit insgesamt 20 Studien zwar deutlich besser untersucht, aber auch hier fehlen Vergleichsstudien, welche Aussagen über die optimalen Belastungsparameter für die Trainingssteuerung ermöglichen. Es ist jedoch anzumerken, dass der vermutete Zusammenhang zwischen erhöhter Kraft und einer verbesserten motorischen Leistungsfähigkeit nicht nur plausibel erscheint, sondern auch durch die angeführ-

te Meta-Analyse gestützt wird (Behringer et al., 2011). Hierbei konnte der Transfer gewonnener Kraftzuwachses auf Bewegungen nachgewiesen werden, welche elementarer Bestandteil vieler Sportarten sind (Schnelligkeit, Sprung- und Wurfkraft).

9 Belastbarkeit

Je mehr Kinder im Nachwuchsleistungssport trainieren, desto größer wird die Nachfrage an kompetenten Trainern auf diesem Spezialgebiet. In den meisten nationalen Lehrbüchern bleibt die Frage nach der Belastbarkeit von Kindern und Jugendlichen jedoch weitgehend unbeantwortet. Dies hat zur Folge, dass bezüglich der Belastbarkeit während der körperlichen Entwicklung noch häufig sehr traditionelle Ansichten vertreten werden.

9.1 Der Passive Bewegungsapparat

Eines der Hauptrisiken, welches oft mit dem Krafttraining in Verbindung gebracht wird, ist die akute oder chronische Schädigung des passiven Bewegungsapparates (Hollmann und Hettinger, 2000; Weineck, 2004). Insbesondere die Wachstumsfugen standen häufig im Mittelpunkt kritischer Diskussionen.

„Gefahren durch das Krafttraining im Kindes- und Jugendalter ergeben sich insbesondere durch die besondere Empfindlichkeit der Epiphysen und der Wirbelsäule, da die Verknöcherung des Skelettsystems erst zwischen dem 17. und 20 Lj. abgeschlossen ist.“ (Hebestreit et al., 2002).

Aus dieser Angst heraus wurden und werden noch heute Empfehlungen ausgesprochen, welche von einem Hanteltraining vor der Pubertät abraten.

„In dieser Phase [der Pubeszenz] ist das Skelettsystem besonders anfällig für Fehlbelastungen. Hohe Zusatzgewichte und Hanteltraining sind in dieser sensitiven Phase nur bedingt und mit großer Zurückhaltung einzusetzen.“ (Hebestreit et al., 2002).

Auch die Veränderung der Hebelverhältnisse in den Wachstumsphasen hat in der Vergangenheit oft zu Unsicherheiten bezüglich der veränderten Belastbarkeit geführt (Menzi et al., 2007; Weineck, 2004). Die aus diesen Überlegungen generierten praktischen Empfehlungen sahen für ein Krafttraining meist erst ab dem späten Schulkindalter mit geringen Zusatzlasten in Form von Medizinbällen und Sandsäcken vor (Hebestreit et al., 2002; Weineck, 2004). Erst mit der zunehmenden Stabilisierung des Skelettsystems in der Adoleszenz sollten demnach die Be-

lastungen bzw. Trainingsmethoden aus dem Erwachsenentraining übernommen werden. Einschränkend sollte jedoch auch in dieser Altersstufe noch die Umfangsarbeit gegenüber Belastungen mit hoher Intensität dominieren (Weineck, 2004).

Die Beschreibung von potentiellen Epiphysenfugenschädigungen durch ein Krafttraining finden sich auch in internationalen Lehrbüchern wieder. Die Bewertung des Risikos und die resultierenden Praxisempfehlungen weichen jedoch stark von denen auf nationaler Ebene ab. So beschreiben beispielsweise Williams et al. in den „Guidelines“ des American College of Sportsmedicine mit der Epiphysitis und der Epiphysenfugenfraktur zwei mit dem Krafttraining verbundene Risiken, ergänzen aber, dass derartige Verletzungen bei angemessener Anleitung und Beaufsichtigung durch geschultes Personal äußerst selten sind (Williams, 2001). Auch die American Academy of Pediatrics kommt zu dem Schluss, dass Berichte über Epiphysenfugenschädigungen infolge eines Krafttrainings kaum vorkommen und durch eine gute Technik sowie eine qualifiziertere Beaufsichtigung vermeidbar gewesen wären (American Academy of Pediatrics, 2001).

Noch prägnanter formuliert findet sich diese Aussage im aktuellen Position Statement der Canadian Society for Exercise Physiology:

„Although this type of injury is possible if proper training guidelines are not followed, an epiphyseal plate fracture has not been reported in any prospective youth RT [resistance training] study that was competently supervised and appropriately progressed.“ (Behm et al., 2008).

Unter Berücksichtigung dieser Richtlinien wird auch hier das Risiko für eine Epiphysenfugenschädigung als minimal eingestuft.

Kinder scheinen im Vergleich zu Jugendlichen stabilere Wachstumsplatten zu besitzen, welche gegen Scherkräfte widerstandsfähiger und damit weniger verletzungsanfällig sind (Micheli, 1988).

In einer systematischen Literaturstudie aus dem Jahr 2006 untersuchten Caine et al. die Häufigkeit und Charakteristik von Schädigungen der Epiphysenfugen, welche bei Kindern und Jugendlichen im Rahmen von organisiertem Sport auftraten (Caine et al., 2006). Die Wissenschaftler kamen unter anderem zu dem Schluss, dass Epiphysenfugenschädigungen abhängig von der Sportart 1 % - 12 % aller Sportverletzungen in dieser Altersgruppe ausmachten und davon 63 %-100 % eine gute Prognose haben (Caine et al., 2006).

„Problematisch ist die Tatsache, dass epidemiologische Daten zur Inzidenz von Schädigungen von Wachstumsfugen im Krafttraining

fehlen. Wenn überhaupt, wird in der Literatur nur über Einzelfälle berichtet.“ (Freiwald, 2005).

Auch wenn der Fokus vieler Diskussionen durch Angst vor den möglichen folgeschweren Wachstumsstörungen auf einer Schädigung der Epiphysenfugen liegt, sollte geklärt werden, welche Verletzungen im Rahmen eines Krafttrainings tatsächlich häufig auftreten und welche Möglichkeiten es gibt, diese zu vermeiden.

Das aktuelle „Position Statement“ der Australian Strength and Conditioning Association gibt anhand der im US National Electronic Injury Surveillance System (NEISS) gespeicherten Daten einen Überblick über die im Krafttraining von 6 – 17jährigen auftretenden Verletzungen (Baker et al., 2007). Dabei fällt auf, dass Unfälle mit den Geräten im Krafraum in dieser Altersklasse besonders häufig auftreten. Darunter fallen Unfallmechanismen wie das Stoßen an einem Gerät, oder Fallenlassen einer Hantel auf den Fuß. Dies erklärt auch, warum Kopf (7 %), Finger (17 %), Zehen (7 %) und Füße (10 %) zu den am häufigsten betroffenen Strukturen gehören. Um das Verletzungsrisiko zu senken, sollten daher entsprechende Sicherheitsvorkehrungen getroffen und auf eine adäquate Betreuung geachtet werden. Auch die Regenerationszeit spielt eine entscheidende Rolle. Liegt die Trainingsfrequenz zu hoch, erhöht sich die Gefahr von Muskelzerrungen (Faigenbaum und Schram, 2004).

Bei der Interpretation der NEISS - Daten muss jedoch darauf geachtet werden, dass viele der in dem genannten System gespeicherten Unfälle zu Hause auftraten, wo das Training in der Regel ohne professionelle Anleitung durchgeführt wurde. Ferner wird bei den dokumentierten Unfällen nicht differenziert, ob die Unfälle beim Krafttraining oder bei wettkampforientiertem Gewichtheben bzw. „Power Lifting“ auftraten, obwohl diese Unterscheidung für eine Risikoeinschätzung wichtig ist.

Betrachtet man hingegen die Verletzungsrate in den veröffentlichten Studien, dann zeigt sich, bei einer guten Betreuung, dass trotz unterschiedlicher Trainingspläne nur bei zwei Studien (Rians et al., 1987; Sadres et al., 2001) Verletzungen auftraten - eine Schulterzerrung und eine nicht näher definierte kleinere Verletzung (Kraemer und Fleck, 2005).

9.2 Beeinträchtigung des Wachstums

Eine andere Befürchtung, welche insbesondere häufig von Eltern geäußert wird, ist die, dass ein Krafttraining das Wachstum ihrer Kinder negativ beeinflussen könnte. Aus Sicht der aktuellen Studienlage ist eine derartige Sorge jedoch unbegründet. Ein Krafttraining im Kindes- und Jugendalter scheint keinen negativen Einfluss auf das Wachstum zu haben (Faigenbaum, 2007; Falk und Eliakim, 2003;

Malina, 2006; Stratton et al., 2004). Ganz im Gegenteil weisen die Studienergebnisse der letzten Jahre darauf hin, dass Gewichtsbelastungen, wie sie neben dem Krafttraining auch in anderen Sportarten auftreten, für das physiologische Knochenwachstum (Bass et al., 1998; Faigenbaum, 2007; Mora et al., 1994; Vicente-Rodriguez, 2006) wichtig sind. Die Tatsache, dass zum Beispiel im Turnen häufig kleinere Kinder anzutreffen sind als in anderen Sportarten, liegt daher eher an einer Selektion und besonderen Förderung dieser Kinder durch die Trainer, als an einem schädigenden Einfluss durch das Training selbst (Baxter-Jones und Mundt, 2007; Rogol et al., 2000).

Eine negative Beeinflussung des Wachstums muss vielmehr durch eine inadäquate Ernährung befürchtet werden (Rogol et al., 2000). Dabei spielt nicht nur die Kalorienmenge eine Rolle sondern auch die Zusammensetzung der einzelnen Nährstoffe ist zu beachten und an den Bedarf des Sportlers anzupassen. Gerade wenn die Zufuhr des Energiegehaltes absichtlich vermindert wird, um das Körpergewicht zu senken, ist es möglich, dass die Ernährung nicht mehr ausreicht um ein gesundes Wachstum zu gewährleisten (Zwiren, 2001). Hinzu kommt, dass ein Energiedefizit auf hormoneller Ebene zu einer Reduktion des Insulin Like Growth Factor I (IGF-I) führt, unabhängig davon, ob dieses Defizit im Rahmen eines Trainings entstanden ist oder durch zu geringe Energiezufuhr (Rowland, 2005). IGF-I ist an der normalen körperlichen Entwicklung beteiligt und wirkt über membranständige Rezeptoren unter anderem auf Osteoblasten, Fibroblasten und Knorpelgewebe (Pschyrembel, 2002) und spielt damit für das Wachstum eine zentrale Rolle.

9.3 Belastbarkeit der Muskulatur

Muskelzerrungen machen im Krafttraining bei unter 21jährigen (laut der NEISS-Datenbank) zusammen mit den Verstauchungen ca. 40 % - 80 % aller auftretenden Verletzungen aus (Kraemer und Fleck, 2005). Ob die Muskulatur von Kindern und Jugendlichen eine geringere Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Belastungen aufweist als bei Erwachsenen, ist bislang jedoch nicht geklärt. Um die Belastbarkeit des Muskelgewebes von Kindern einschätzen zu können, bietet sich neben Verletzungsstatistiken der Kreatin-Kinase Wert an. Dieses Enzym, welches in Gehirn- und Muskelzellen an der Energiebereitstellung beteiligt ist, steigt in seiner Konzentration im Blut an, sobald diese Organe geschädigt werden. Das Isoenzym CK-MM (=Skelettmuskeltyp) ist dabei spezifisch für eine Schädigung des Skelettmuskels. Besonders intensive exzentrische Belastungen verursachen derartige mikroskopische Muskelverletzungen, welche sich neben einem CK Anstieg auch in einem Nachlassen der isometrischen Kraft äußern.

Untersucht man die in der Literatur angegebenen Werte der maximalen CK Konzentration (Warren und Palubinskas, 2008) und setzt diese in Relation zum Verlust

der isometrischen Kraft, so zeigt sich eine Korrelation der beiden Werte von $r = 0,58$ ($p = 0,00004$) (siehe Abb. 33). Daraus lässt sich ableiten, dass der gemessene CK Wert nicht nur Rückschlüsse auf strukturelle Veränderungen in Form von Mikrotraumatisierungen ermöglicht, sondern auch Aussagen über die funktionelle Beeinträchtigung zulässt.

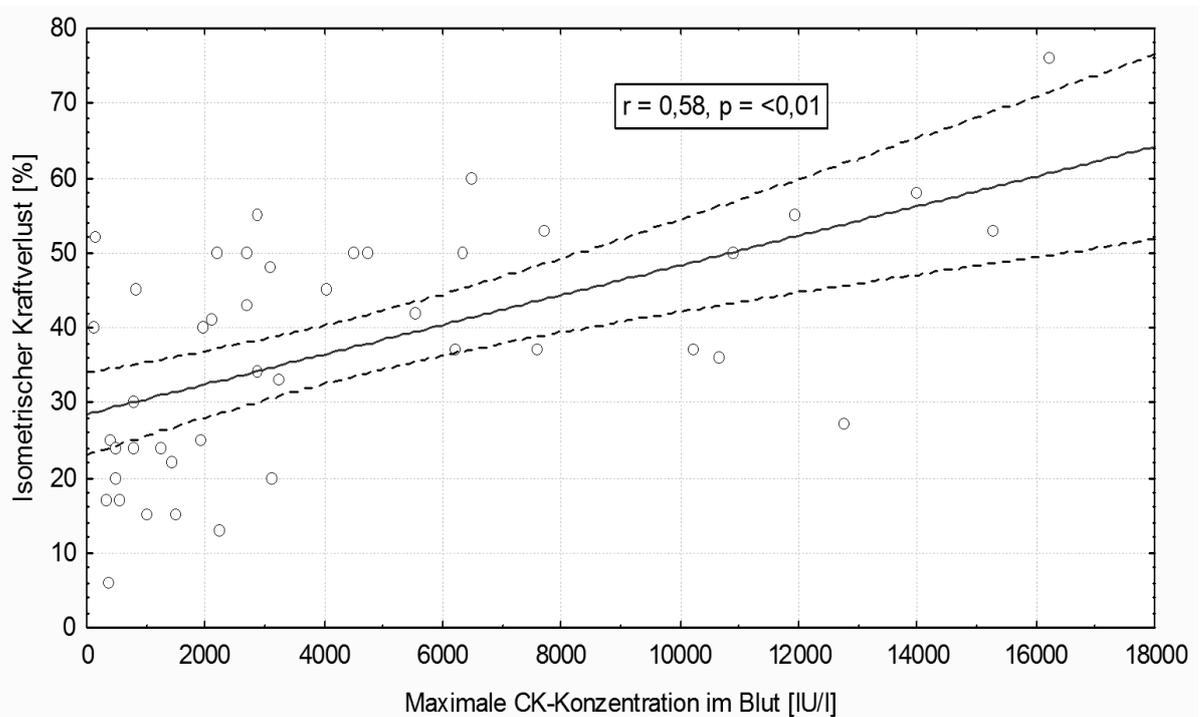


Abb. 33: Isometrischer Kraftverlust in Abhängigkeit von der maximalen Blut-CK-Konzentration (Werte zusammengestellt aus (Warren und Palubinskas, 2008).

Einige Studien, welche die Reaktion dieser Parameter auf intensive Trainingsbelastungen zwischen präpubertären Kindern und Erwachsenen verglichen, kamen zu folgendem Ergebnis: Vorausgesetzt, dass ein Training mit derselben relativen Intensität für alle Testpersonen durchgeführt wird, zeigen Kinder bezogen auf ihre CK-Wert-Veränderung eine geringere Verletzung ihres Muskelgewebes als die Erwachsenen (Duarte et al., 1999; Webber et al., 1989).

Es sollte jedoch bedacht werden, dass einer unterschiedlichen CK-Wert-Auslenkung auch andere Ursachen zugrunde liegen können. So könnte nach Webber et al. die Enzymkonzentration in den kindlichen Muskelzellen niedriger sein, das Anfluten des Enzyms im Blutkreislauf länger dauern oder die CK-Clearance schneller von statten gehen (Webber et al., 1989). Die gleichen Autoren

räumten ein, dass wenn die CK-Veränderungen auf das Körpergewicht bezogen wurden, in ihrer Studie keine Unterschiede zwischen den Kindern und Erwachsenen sichtbar waren.

Zusammenfassend kann jedoch gesagt werden, dass die bisher durchgeführten Studien darauf hinweisen, dass Kinder eine vergleichbare mechanische Belastbarkeit hinsichtlich potentieller Schädigungen der Muskulatur zeigen.

Bezogen auf die Regenerationsfähigkeit der Muskulatur, finden sich in der Literatur wenige und teilweise widersprüchliche Informationen. Die Aussage von Weineck, dass aufgrund eines wachstumsbedingten erhöhten Baustoffwechsels ein erhöhter Energieverbrauch, und somit eine längere Wiederherstellungszeit im Vergleich zum Erwachsenen von Nöten ist (Weineck, 2004), findet sich auch in aktuelleren internationalen Artikeln wieder:

„Because children and adolescents are still growing and developing, it is likely that they may need even more time for rest and recovery between exercise sessions than adults.“ (Faigenbaum und Schram, 2004; Faigenbaum, 2007).

Eine Studie von Falk und Dotan, welche sich mit der Regeneration von Kindern nach hochintensiven Belastungen beschäftigt, zeigte hingegen, dass sich Kinder schneller regenerieren als Erwachsene. Eine Ursache dafür könnte, laut den Autoren, in einer quantitativ geringeren Aktivierung motorischer Einheiten und geringeren Diffusionsstrecken liegen (Falk und Dotan, 2006). Es fehlen jedoch gezielte Interventionsstudien, um die Regeneration nach einem Krafttraining genauer zu beurteilen.

9.4 Übertraining

Neben den akuten Verletzungen des muskuloskeletären Systems sind auch chronische Überlastungsschäden zu berücksichtigen, welche auch im Kindes- und Jugendalter häufig im Rahmen eines Übertrainings zu beobachten sind. Daten aus den USA weisen darauf hin, dass bis zu 50 % der Sportverletzungen, die in der pädiatrischen Sportmedizin gesehen werden, auf Überlastungen zurückzuführen sein sollen (Dalton, 1992). Von diesem Übertraining wird im angloamerikanischen Raum das sogenannte „overreaching“ abgegrenzt, welches sich in eine „functional“ und eine „non-functional“ Form unterteilen lässt (Matos und Winsley, 2007; Meeusen et al., 2006). Während es sich beim „functional overreaching“ um einen gewollten Zustand, mit dem Ziel einer überschießenden Anpassungsreaktion handelt, führen die beiden anderen Zustände zu einer mittel- bis langfristigen Leistungseinbuße. Während für die Wiederherstellung der psychophysischen Leistungsfähigkeit beim „non-functional overreaching“ oft Zeiträume von Wochen bis

Monaten benötigt werden, sind hierfür im Falle einer Übertrainingssituation mehrere Monate bis Jahre erforderlich. Da zwischen den genannten Formen fließende Übergänge existieren und viele Symptome bei allen drei Stadien auftreten können, kann die Zuordnung zu diesen häufig erst retrospektiv erfolgen (Meeusen et al., 2006).

Da ein Krafttraining im Nachwuchsleistungssport als eine Ergänzung zur Primärsportart durchgeführt werden sollte, ist es wichtig, die Gesamtbelastung der Kinder und Jugendlichen dabei nicht aus den Augen zu verlieren. Eine unreflektierte Addition solcher Trainingsinhalte kann leicht das Gleichgewicht von Belastung und Belastbarkeit stören. Die feste Integration von Krafttrainingseinheiten in die verschiedenen Trainingszyklen sollte sich daher an den individuellen Leistungsreserven der Athleten orientieren und in ein strukturiertes Gesamtkonzept der Konditionierung eingebettet sein. Da jedoch bereits im Nachwuchsleistungssport maximale Belastungsintensitäten zur Anwendung kommen, werden Überschreitungen der physiologischen Grenzen immer wieder auftreten.

Hinzu kommen im Leistungssport meist strikte Diätpläne und zum Teil massive Einflüsse auf die soziokulturelle Situation der jungen Sportler; die trainingsbedingte Trennung von der Familie oder auswärtige Wettkämpfe spielen dabei eine ebenso große Rolle, wie die Schwierigkeit einen Freundeskreis aufzubauen (Matos und Winsley, 2007). Beachtet man, dass ein Übertraining nicht allein auf physischen, sondern zu einem großen Teil auch auf psychischen Faktoren beruht (Kreider et al., 1998) wird deutlich, welche Bedeutung die Einschränkung des Privatlebens im Zusammenhang mit dem Übertrainingssyndrom ist. Gerade ein von Eltern und Trainern ausgeübter hoher Leistungsdruck kann sich als begünstigender Faktor für eine Übertrainingssituation auswirken.

Leider wurden bei den bislang durchgeführten Krafttrainingsstudien im Nachwuchsbereich keine Überlastungsparameter erfasst, so dass die Frage nach der Belastungsgrenze für ein Krafttraining im Nachwuchssport weitgehend unbeantwortet bleibt. Schaut man auf die aktuellen Leitlinien der American Academy Of Pediatrics zur Vermeidung von Überlastungsschäden und Übertraining (Small et al., 2007), so finden sich folgende sportartunspezifische Grundsätze, die zum Teil auch auf ein Krafttraining übertragen werden können:

1. Pro Woche sind mindestens ein bis zwei wettkampffreie Tage¹² („competition free“) einzuhalten, an denen auch sportartspezifisches Training zu vermeiden sind, um der psychophysischen Erholung genügend Zeit zu geben.

¹² Diese Angabe bezieht sich vermutlich auf Wettkampfwochen.

2. Die Steigerung des Trainingsumfanges, der Wiederholungszahl oder die Gesamtdistanz sollte innerhalb einer Woche nicht mehr als 10 % gesteigert werden¹³.
3. Es wird empfohlen, über zwei bis drei Monate im Jahr kein sportartspezifisches Training durchzuführen.
4. Bei der Trainingsgestaltung sollten Faktoren wie Spaß, Sicherheit, Fairness und Technik im Vordergrund stehen.
5. Wettkampfmäßig sollte gleichzeitig nur eine Sportart betrieben werden. Zusätzliche Belastungsumfänge in Auswahlmannschaften sind bei der Trainingsgestaltung zu beachten.
6. Bei Muskel- oder Gelenkproblemen, Abgeschlagenheit oder nachlassender Schulleistungen ist ein Überlastungssyndrom zu prüfen. Der motivationale Hintergrund der Kinder ist in solchen Fällen sorgfältig zu prüfen.
7. Die Athleten sollten über Hitze-/ Kälteschädigungen, Übertraining und den damit verbundenen Verletzungen aufgeklärt werden.
8. Den Athleten, Eltern und Trainern sollte die Möglichkeit gegeben werden sich über Themen wie Sporternährung, Flüssigkeitszufuhr und Übertrainingssymptome zu informieren um eine hohe Leistungsfähigkeit gewährleisten und Gesundheitsbeeinträchtigungen vermeiden zu können.
9. Trainer sollten besonders darauf achten, dass die Kinder von ihren Eltern nicht zu einer exzessiven Wettkampfteilnahme gedrängt werden.

Auch wenn es bislang nur wenige Untersuchungen durchgeführt wurden, welche Übertrainingsdaten im Rahmen eines Nachwuchstrainings erfasst haben, so weisen einige Ergebnisse darauf hin, dass die Symptome der jungen Athleten denen der erwachsenen Sportlern gleichen (Matos und Winsley, 2007). Dennoch ist zu beachten, dass es sich bei der Diagnose des Übertrainingssyndroms um eine Ausschlussdiagnose handelt (Meeusen et al., 2006). Es müssen also zunächst alle übrigen potentiellen Ursachen einer Leistungsminderung ausgegrenzt werden, bevor die Diagnose gestellt werden kann. Da bei dieser Krankheitsbestimmung die klinischen Symptome im Vordergrund stehen, ist es wichtig, dass nicht nur Ärzte,

¹³ Diese Empfehlung bezieht sich auf eine einzelne Belastungssteigerung, nicht jedoch auf eine mehrfache Steigerung der Belastung um jeweils 10%.

sondern auch Eltern und Trainer in der Lage sind, häufige Erscheinungsformen eines Übertrainings zu erkennen. Nur so kann gewährleistet werden, dass die jungen Nachwuchssportler rechtzeitig der geeigneten Therapie zugeleitet werden.

Zu den typischen Symptomen gehören neben dem langfristigen Nachlassen der Leistungsfähigkeit, Schlafstörungen, die in 90 % der Fälle zu beobachten sind (Budgett, 1998). Darunter fallen Einschlafstörungen, Alpträume, Durchschlafstörungen, sowie die Müdigkeit und Abgeschlagenheit am darauf folgenden Morgen. Ein Nachlassen des sportlichen Ehrgeizes und des Appetits mit nachfolgendem Gewichtsverlust sind ebenfalls Symptome, die häufig im Rahmen eines Übertrainings auftreten. Auch wiederkehrende Infekte der oberen Luftwege sollten für die betreuenden Personen ein Alarmzeichen darstellen. Standardisierte Fragebögen können dabei helfen, die psychischen Komponenten des Syndroms zu erfassen. Derartige Protokolle finden sich unter anderem bei Maso (Maso et al., 2003), oder Raglin und Morgan (Raglin und Morgan, 1994).

Abgesehen von diesen klinischen Befunden existieren weitere Parameter die für die Diagnosestellung herangezogen werden können. Dabei erstreckt sich das Spektrum von einfach zu erhebenden Daten bis hin zu aufwendigeren Blut- und Haaranalysen (Matos und Winsley, 2007; Meeusen et al., 2006; Wilmore et al., 2008):

1. Erhöhung der Ruheherzfrequenz und des Blutdrucks,
2. Erhöhung der Körpertemperatur,
3. Erhöhte Herzfrequenz,
4. Erhöhte VO_2 bei submaximaler Belastung,
5. Negative Stickstoffbilanz,
6. Verminderte Hämatokrit- und Hämoglobinwerte,
7. Leukopenie,
8. Erhöhte CK-Werte,
9. Verschiebung der Elektrolytwerte,
10. Erhöhte Harnstoffwerte,

11. Verminderte Laktatwerte bei maximaler und submaximaler Belastung,
12. Erhöhte Adrenalin und Noradrenalinwerte in Ruhe,
13. Abnahme des Testosteron-Kortisol-Quotienten,
14. Verminderte Ausschüttung von Hypophysenhormonen (ACTH, HGH, LH, FSH) bei Belastung,
15. Diskutiert werden auch veränderte Sekretionen von peripheren Stoffwechselformonen (Leptin, IL-6, IGF-I).

Da sich der Großteil der Übertrainingsstudien auf adulte Ausdauerathleten bezieht, ist die Bedeutung der oben genannten Parameter für ein Übertraining durch Kraftsport bei Kindern und Jugendlichen nicht sicher abzuschätzen. Aufgrund des vergleichbaren Erscheinungsbildes des Übertrainingsyndroms in allen Altersstufen, kann jedoch mit einer vergleichbaren Auslenkung der oben genannten Messgrößen gerechnet werden. Darüber hinaus ist anzumerken, dass viele der Parameter in Bezug auf ihre Aussagekraft im Rahmen des Übertrainings in der Fachliteratur kritisch diskutiert werden. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass auch nach einem leistungssteigernden Trainingsreiz Veränderungen der gleichen Parameter beobachtet werden können. Ob für diese allgemeingültige Grenzwerte existieren und wenn ja, wie hoch diese liegen, sollte Gegenstand kommender Untersuchungen sein.

Aber auch um die körperliche Beanspruchung einzelner Trainingsregime miteinander vergleichen zu können, wäre es erstrebenswert, zumindest einen Teil dieser Parameter auch im Rahmen von zukünftigen Krafttrainingsstudien zu erfassen.

9.5 Fazit

Generell kann also gesagt werden, dass das Verletzungsrisiko beim Krafttraining im Kindes- und Jugendalter nicht als höher sondern als gleich hoch wie im Erwachsenenalter eingestuft werden kann (Kraemer und Fleck, 2005). Unter der Voraussetzung einer kompetenten Betreuung, der langsamen Progression der Gewichte, einer angemessenen Ernährung und einer genauen Schulung der Bewegungsausführungen, ist ein Krafttraining im Nachwuchsleistungssport daher als effektiv und sicher anzusehen. (Kraemer und Fleck, 1993; Kraemer und Fleck, 2005; Malina et al., 2004; Tolfrey, 2007). Es ist offensichtlich, dass die Vorteile eines Krafttrainings im Kindes- und Jugendalter im Vergleich mit den potentiellen Nebenwirkungen überwiegen:

“The benefits form a properly designed and supervised resistance training program for children outweigh the risk.” (Kraemer und Fleck, 2005).

10 Nutzen aus gesundheitlicher Sicht

Kindern wird seit längerem zur Verbesserung oder Erhaltung der Gesundheit traditionell ein Ausdauertraining empfohlen. Es weisen aber immer mehr Forschungsergebnisse darauf hin, dass auch ein Krafttraining im Kindes- und Jugendalter deutliche gesundheitliche Vorteile bewirken kann (Faigenbaum, 2007). Diese Vorteile sollen im Folgenden näher erläutert werden.

10.1 Krafttraining als Verletzungsprophylaxe

Die Tatsache, dass ein Krafttraining nicht nur risikoarm ist, sondern vielmehr als Schutz vor Verletzungen genutzt werden kann (Stratton et al., 2004), wurde in Deutschland noch nicht hinreichend zu Kenntnis genommen.

„Durch die trainingsbedingten Anpassungen, insbesondere der Bindegewebe und Knochen, werden auch bei Kindern und Jugendlichen äußere Lasten (Belastungen) besser toleriert.“ (Freiwald, 2005).

Smith et al. gehen sogar davon aus, dass ca. 50 % aller durch Überlastung entstehenden Verletzungen durch ein Krafttraining vermieden werden könnten (Smith et al., 1993). Gerade weil die meisten Sportverletzungen neben dem Band- und Sehnenapparat die Muskulatur betreffen, liegt es nahe, durch eine Erhöhung der Größe, Dichte oder Verbesserung der mechanischen Eigenschaften dieser Strukturen Verletzungen vorbeugen zu können (Faigenbaum, 2007).

Während dieser Zusammenhang für Jugendliche als erwiesen gilt, bleibt die Effektivität einer solchen Intervention bei Kindern zu klären (Faigenbaum und Schram, 2004).

Tab. 13: Effekte eines Kraft-/Konditionstrainings auf die Verletzungshäufigkeit heranwachsender Athleten.

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Dauer/ Häufigkeit	Verletzungsrate
(Cahill und Griffith, 1978)	2480	High School Students	5-6 W/ ?	Sign. Verminderung der operativ zu versorgenden Knieverletzungen um 63 % im Vergleich zur KG
(Hejna et al., 1982)	232	13-19	<52 W/ ?	Verminderung der Gesamtverletzungsrate um 46,2 % im Vergleich zur KG
(Hewett et al., 1999)	366	High School Students	6 W/ 3x pro Woche	Sign. Verminderung der Knieverletzungen um 360 % im Vergleich der KG
(Heidt et al., 2000)	42	14-18	7 W/ 2-3x pro Woche	Sign. Verminderung der Gesamtverletzungsrate um 19,4 % im Vergleich zur KG

Sign. = signifikant; *IG* = Interventionsgruppe; *KG* = Kontrollgruppe

In einer frühen Studie von Cahill und Griffith (Cahill und Griffith, 1978) konnte gezeigt werden, dass ein vor der Football-Saison durchgeführtes Konditionstraining bei den Spielern zu einer signifikanten Reduktion der Verletzungen zu Beginn der Saison führte (68 %). Während der achtjährigen Studie konnte darüber hinaus die Rate der Knieoperationen um 63 % (signifikant) gesenkt werden und die Kombination aus einer Ruptur des vorderen Kreuzbandes und inneren Kollateralbandes wurde sogar um 86 % vermindert (siehe Tab. 13).

Auch Hejna et al. konnten eine Reduktion der Verletzungsrate infolge eines Konditionstrainings feststellen (26,2 % in der Interventionsgruppe vs. 72,4 % in der Kontrollgruppe), zeigten darüber hinaus jedoch auch, dass die durchschnittliche Regenerationszeit nach Verletzungen bei der Interventionsgruppe (2,02 Tage) deutlich kürzer war als bei der Kontrollgruppe (4,82 Tage) (Hejna et al., 1982).

Demnach erweist sich ein Krafttraining nicht nur im Sinne einer Primärprävention als sinnvolles Trainingsmittel, sondern scheint auch für eine beschleunigte Rehabilitation dienlich zu sein. Die Gewebe erholen sich schneller von Verletzungen (Kraemer und Fleck, 2005) und ermöglichen es dem Sportler somit, wieder früher am regulären Training teilzunehmen. Dieser Vorteil spielt gerade im Leistungssport Erwachsener eine wichtige Rolle und sollte daher auch im Nachwuchsbereich nicht außer Acht gelassen werden.

Heidt et al., welche in ihrer Studie ebenfalls eine signifikante Reduktion der Verletzungsinzidenzen zeigen konnten, betonen jedoch, dass für eine effektive prophylaktische Wirksamkeit eines prä-saisonalen Konditionstrainings muskelgruppen- und sportartspezifische Belastungen von besonderer Bedeutung sind (Heidt et al., 2000).

Es muss jedoch einschränkend gesagt werden, dass in den meisten der oben genannten Studien ein multifaktorielles Konditionstraining zur Anwendung kam und damit nicht genau gesagt werden kann, wie groß jeweils der Einfluss des Krafttrainings auf das Gesamtergebnis war (Faigenbaum und Schram, 2004).

10.2 Einfluss auf den Knochen

Auch die Mineralisation des Knochens lässt sich durch ein Krafttraining offenbar positiv beeinflussen (Zwiren, 2001). So berichten Morris et al. über eine signifikante Erhöhung des Knochenmineralgehaltes und der Knochendichte in der Lendenwirbelsäule, im proximalen Femur und im Schenkelhals (siehe Tab. 14) nach einem Krafttraining über zehn Monate mit prämenarchalen Mädchen (Morris et al., 1997). Nichols und Sanborn, welche ältere Mädchen (14-17 Jahre) untersuchten, fanden für die Lendenwirbelsäule hingegen keine signifikanten Mineralisationserhöhungen (Nichols et al., 2001). Für den Bereich des Schenkelhalses konnten sie jedoch ebenfalls eine, wenn auch geringere, Steigerung des Mineralgehaltes nach dem Krafttraining feststellen.

Yu et al., welche sich bei ihrer Diagnostik auf den Mineralgehalt des Knochens beschränkten, fanden nach einer sechswöchigen Krafttrainingsintervention sowohl für den Gesamtmineralgehalt des Körpers, als auch für die Mineralisation Lendenwirbelsäule signifikante Verbesserungen (Yu et al., 2005).

Tab. 14: Einfluss von Krafttraining auf Mineralgehalt und Dichte des Knochens.

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Dauer/ Häufigkeit	Mineralgehalt	Knochendichte
(Blimkie et al., 1996)	?	?	26 W/ 3x pro Woche	LS: 5,9 % n.s.	LS: 4,75 % n.s.
(Morris et al., 1997)	38	9-10	10M/ 3x pro Woche	TB: 12,0 %* LS: 7,0 %* PF: 11,9 %* FN: 10,4 %*	TB: 3,5 %* LS: 4,8 %* Leg: 6,8 %* Arm: 3,3 %* Pelvis: 6,4 %* PF: 4,5 %* FN: 12,0 %*
(Nichols et al., 2001)	46	14-17	15 M/ 3x pro Woche	FN: 3,96 % n.s., LS: 4,7 % n.s., TB: 3,2 % n.s., TM: 7,43 % n.s.	FN: 3,67 %*; LS: 2,61 % n.s., TB: 2,81 % n.s., TM: 2,09 % n.s.
(Yu et al., 2005)	41	8-11	6 W/ 3x pro Woche	TB: 3,9 %* Hip: 1,57 % n.s. LS: 8,62 %*	-

n.s. = nicht signifikant; * = signifikant; FN = Femoral neck; PF = proximal femur; LS = Lumbar spine; TB = Total Body; TM = Trochanter major

Besonders der kortikale Knochen scheint auf Gewichtsbelastungen biopositiv zu reagieren, während der spongiöse Knochen der Wirbelsäule eher unter hormonellen und metabolischen Einflüssen zu stehen scheint (Mora et al., 1994). Die meisten Studien auf diesem Gebiet zeigen, dass eine Erhöhung der Knochendichte in jungen Jahren für eine lebenslange Unversehrtheit des Knochensystems und der

damit verbundenen Mobilität bedeutend ist (Courteix et al., 1998; Grimston et al., 1993; Groothausen et al., 1997; Slemenda et al., 1991). Bislang existieren jedoch keine genauen Empfehlungen, wie hoch die Belastung gewählt werden sollte, um optimale Verbesserungsraten der Knochendichte zu erreichen (Stratton et al., 2004). Die bisherigen Studien lassen jedoch erkennen, dass gewichtsorientierte Belastungen effektiver sind als solche ohne oder mit einer nur geringen mechanischen Beanspruchung des Skelettsystems (Stratton et al., 2004). Gerade die fettfreie Körpermasse spielt im Kindes- und Jugendalter offenbar eine entscheidende Rolle für die Entwicklung der Knochendichte. Es scheint, dass die parallel zum Muskelwachstum steigende Kraft über höhere Spannungen am Knochen positiv auf den Mineralgehalt des Knochens einwirkt und besonders das Heben von schweren Lasten einen potenten osteogenen Reiz darstellt (Faigenbaum, 2007).

Um den positiven Effekt auf die Knochendichte zu erhöhen, ist es darüber hinaus sinnvoll, parallel zu einem Krafttraining den Milchkonsum aufgrund ihres hohen Kalziumgehaltes der Kinder zu erhöhen. Diesen Zusammenhang deckten Volek et al. bei einer im Jahr 2003 durchgeführten Studie auf (Volek et al. 2003). Von den insgesamt 28 untersuchten Jungen im Alter von 13-17 Jahren zeigte die Gruppe, welche zusätzlich zu ihrer normalen Ernährung dreimal am Tag Milch trank, signifikant höhere Zuwächse der Knochendichte auf als die Kontrollgruppe.

10.3 Einfluss von Krafttraining auf die Körperzusammensetzung

Die Zahl der übergewichtigen Kinder und Jugendlichen hat in den letzten Jahren dramatisch zugenommen. Aktuelle Daten von 17.000 repräsentativ ausgewählten Kindern und Jugendlichen zeigen, dass ca. 1,9 Millionen Heranwachsende (3 - 17 Jahre) in Deutschland übergewichtig sind (BMI > 90. Perzentil). Damit erhöhte sich die Zahl der Übergewichtigen um 50 % gegenüber den 1985-1999 erhobenen Referenzdaten von Kromeyer-Hauschild (Korsten-Reck, 2008). Diese alarmierenden Zahlen resultieren aus einem vielschichtigen Wandel im Lebensstil der Kinder und Jugendlichen. Das über viele Stunden lange Sitzen in der Schule wird oft durch ein passives Freizeitverhalten weiter potenziert. In Kombination mit einer fehlerhaften Ernährung sind dadurch Übergewichtsprobleme fast unvermeidbar. Insbesondere vor dem Hintergrund von Folgeerscheinungen, die bei erhöhter viszeraler Fettverteilung bereits im Kindesalter auftreten, kommt der Prävention besondere Bedeutung zu (Korsten-Reck, 2008).

Im Kampf gegen das Übergewicht steht neben einer gesunden Ernährung bekanntermaßen die Bewegung an oberster Stelle. Doch welche Rolle das Krafttraining in diesem Rahmen einnehmen kann, soll im Weiteren geklärt werden.

Die Auswahl der richtigen Sportart für übergewichtige Kinder sollte sich an drei wesentlichen Punkten orientieren. Ist es auf der einen Seite essentiell, dass bei der ausgeübten Aktivität ein möglichst hoher Energieumsatz erzielt wird, spielt auf der anderen Seite auch der Spaßfaktor eine wichtige Rolle. Drittens sind orthopädische Gesichtspunkte im Sinne von Gelenkbelastungen zu berücksichtigen. Auch wenn übergewichtigen Kindern traditionellerweise aerobe Aktivitäten empfohlen werden, so darf nicht vergessen werden, dass gerade Sportarten wie Joggen bei Übergewichtigen mit einer erhöhten Gefahr für Überlastungsschäden am Bewegungsapparat einhergehen (Faigenbaum, 2007). Andere Ausdauersportarten, bei denen das Körpergewicht nicht komplett getragen werden muss (Schwimmen, Radfahren), sind dagegen durchaus zu empfehlen. Die Effektivität dieser aeroben Belastungsformen ist in der Literatur gut belegt (Gutin et al., 2002; Owens et al., 1999). Aber auch für einen positiven Effekt eines Krafttrainings auf die Körperzusammensetzung existieren einige Untersuchungsergebnisse (Shaibi et al., 2006; Yu et al., 2005).

Um einen solchen Zusammenhang richtig interpretieren zu können, ist es jedoch unerlässlich, die in den Studien verwendeten Messmethoden miteinander zu vergleichen. Die am häufigsten angewandten Methoden zur Überprüfung einer Veränderung des Übergewichts sind neben der Messung des Körpergewichtes eine Bioimpedanzanalyse, die Errechnung des Body Mass Index (BMI) und die Messung der Hautfaltendicke an definierten Körperpunkten. Alle diese Verfahren sind einfach und vor allem kostengünstig in ihrer Durchführung. Aber soll der Einfluss eines Krafttrainings auf das Übergewicht untersucht werden, sind nicht alle der genannten Methoden gleich gut geeignet, insbesondere wenn der Zusammenhang zwischen körperlicher Aktivität und Körperfettgehalt überprüft werden soll (Twisk, 2007). Da bei der reinen Messung des Körpergewichtes und der BMI-Berechnung keine Aussage über die einzelnen Gewebe getroffen werden können, sollten diese Methoden nicht zur Interpretation einer Veränderung der Körperzusammensetzung herangezogen werden. Dies gilt insbesondere für Kinder, bei denen die gemessenen Größen zusätzlich durch wachstumsbedingte Veränderungen beeinflusst werden.

Besser geeignet ist hingegen die Bioimpedanzanalyse, welche sich die unterschiedliche Leitfähigkeit von verschiedenen Geweben zunutze macht. Eine hohe Korrelation mit der Densitometrie (s.u.) von $r = 0,9$ bis $0,94$ (Wilmore et al., 2008), bei einfacher Durchführung, machen diese Methode für den Einsatz in der Praxis besonders interessant. Einbußen in Bezug auf die Genauigkeit ergeben sich jedoch aus Schwankungen im Flüssigkeitshaushalt (Graves et al., 2006). Eine weitere Einschränkung zeigt sich bei der Messung des Körperfettes von Athleten mit geringem Körperfettanteil. Hier liegt der gemessene Wert meist über dem wahren Wert.

Als besonders genaue Messverfahren zur Erfassung von Veränderungen des Fettgewebes gelten nach wie vor Labormethoden wie die Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA) und die Densitometrie (Wilmore et al., 2008). Dabei galt die Densitometrie über viele Jahre als Goldstandard an dem auch heute noch andere Methoden gemessen werden (Graves et al., 2006). Leider existieren bei dem vorliegenden Kenntnisstand keine Studien, in welchen dieses Verfahren im Zusammenhang mit einer Krafttrainingsintervention bei Kindern zur Anwendung kam. Im Folgenden soll auf vier aktuellere Studien genauer eingegangen werden, welche mittels der DXA-Messung Veränderungen des Körpergewichtes bei übergewichtigen Kindern überprüft haben. Bei dieser Methode werden gleichzeitig zwei energetisch leicht unterschiedliche Röntgenquellen eingesetzt und anhand der verschieden stark ausgeprägten Schwächungscharakteristiken der einzelnen Gewebe auf den Körperfettanteil geschlossen.

Tab. 15: Veränderung der Körperzusammensetzung bei übergewichtigen Kindern und Jugendlichen.

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Dauer/Häufigkeit	MM	Körperfett	FFM
(Treuth et al., 1998)	11	7-10	20 W/ 3x pro Woche	DXA	N.s. Zunahme des Körperfettanteils (0,77 %)	Sign. Steigerung der FFM (7,74 %)
(Watts et al., 2004)	19	14,3 +/-1,5	8 W/ 3x pro Woche	DXA	Sign. Verminderung der Fettmasse am Rumpf (3,68 %) und abdominal (6,97 %). N.s. Veränderungen in den übrigen Messungen.	N.s. Steigerung der FFM (1,1 %)
(Yu et al., 2005)	22	10,3 +/-1,0	36 W/ 3x pro Woche	DXA	Sign. Verminderung des Körperfettanteils um 3 %	Sign. Steigerung der FFM (2,4 %)

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Dauer/Häufigkeit	MM	Körperfett	FFM
(Shaibi et al., 2006)	22	15,1 +/-0,5	16 W/ 2x pro Woche	DXA	Sign. Verminderung des Körperfettanteils um 6,7 %	Sign. Steigerung der FFM (7,4 %)

MM = Messmethode; DXA = Dual-Röntgen-Absorptiometrie; n.s. = nicht signifikant; sign. = signifikant; FFM = fettfreie Körpermasse

Treuth et al. untersuchten in diesem Zusammenhang den Einfluss eines fünfmonatigen Krafttrainings auf den Energiehaushalt und die Körperzusammensetzung von 11 präpubertären übergewichtigen Mädchen (Treuth et al., 1998). Die Muskel-, Knochen- und Fettanteile der Kinder wurden mit Hilfe der oben genannten Dual-Röntgen-Absorptiometrie erfasst. Bei der Messung der einzelnen Faktoren des Energiehaushaltes kamen unterschiedliche Methoden zum Einsatz. Doppelt markiertes Wasser (DLW) wurde zur Messung des absoluten Energieumsatzes verwendet und mit Hilfe der direkten Kalorimetrie (Raumkalorimetrie) wurden neben dem Ruheumsatz, der 24-Stunden-Energieumsatz bei geringer Aktivität (Sitzen) und beim Schlafen ermittelt. Alle genannten Parameter wurden sowohl vor, als auch nach der Krafttrainingsintervention erhoben und auf Veränderungen analysiert.

Im Untersuchungszeitraum von 20 Wochen zeigte sich jedoch, statt der gewünschten Fettreduktion, dass das Krafttraining keinen Einfluss auf den Körperfettgehalt genommen hatte. Auch die anderen Werte konnten durch das Krafttraining nicht verbessert werden. Eine genauere Betrachtung der übrigen Parameter zeigt jedoch, dass die Ursache für dieses Ergebnis in einem verminderten Gesamtenergieumsatz (8573 kJ auf 8330 kJ) und einer erhöhten Energiezufuhr der Mädchen zu suchen ist (8966 kJ/d auf 10088 kJ/d). Fasst man diese Ergebnisse zusammen, so zeigt sich eine weitere Zunahme der bereits vor der Studie bestehenden positiven Energiebilanz (427 kJ/d auf 1971 kJ/d). Soll der Einfluss eines Krafttrainings auf die Körperzusammensetzung untersucht werden, so ist, um derartige Ergebnisse zu vermeiden, die Kontrolle der Energiezufuhr unabdingbar. Die Autoren leiten aus den von ihnen gefundenen Werten ab, dass ein Krafttraining mit einem geringen Belastungsumfang nicht ausreicht um den Energieumsatz zu steigern. Dies bedeutet nicht, dass umfangreichere und intensivere Krafttrainingsbelastungen zu keiner Veränderung führen können.

Eine andere Studie aus dem Jahr 2005 von Yu et al. untersuchte die Auswirkung einer Kombination aus Krafttraining und hypokalorischer Diät auf 22 vor- und früh-

pubertäre Kinder (Tannerstadien eins und zwei) (Yu et al., 2005). Dabei konnte nach 36 Wochen eine signifikante Verminderung des Körperfettanteils um 2,2 % festgestellt werden. Auch hier zeigt die Analyse der Energiezufuhr, dass die Kinder die hypokalorische Ernährung zum Zweck der Gewichtsreduktion nicht einhalten konnten. Anhand dieser Tatsache lässt sich vermuten, dass größere Erfolge diesbezüglich möglich gewesen wären. Eine intensivere Diätkontrolle ist demnach aus Sicht der Autoren für zukünftige Studien dringend erforderlich.

Die genannten Untersuchungen von Yu et al. (Yu et al., 2005) und von Treuth et al. (Treuth et al., 1998) weisen eindeutig auf die zentrale Bedeutung der Energiebilanz hin. So ist nur bei einer negativen Energiebilanz mit einer Verminderung des Körperfettanteiles zu rechnen. Da der aktivitätsabhängige Energieverbrauch den variabelsten Anteil des täglichen Energieverbrauches darstellt und damit eine Schlüsselrolle in der Regulierung der Energiebilanz einnimmt (Goran, 1995; Goran und Sun, 1998), ist eine positive Beeinflussung auch durch regelmäßiges Krafttraining zu erwarten. Studien mit erwachsenen Probanden (Alter: $26,7 \pm 3,8$ Jahre) kamen jedoch zu dem Ergebnis, dass der Energieverbrauch durch ein Krafttraining (Einsatztraining nach den Richtlinien des American College of Sportsmedicine) im Mittel unter 150kcal liegt ($135,20 \pm 16,6$ kcal bei Männern und $81,7 \pm 11,1$ kcal bei Frauen (Phillips und Ziuraitis, 2003). Deutlich höhere Werte von $6,21 \pm 1,01$ kcal/min für Männer und $4,04 \pm 1,45$ kcal/min für Frauen fanden sich hingegen in einer Studie von Beckham und Earnest, welche den Energieverbrauch von 30 Probanden während einem Kraft-Circuit-Training untersuchten (Beckham und Earnest, 2000). Ein einstündiges Krafttraining nach diesem Protokoll würde demzufolge mit einem Energieverbrauch von über 300kcal einhergehen, welches die Körperzusammensetzung bei konstanter Ernährung auf Dauer vermutlich positiv beeinflussen würde.

Die meisten Studien zu dem Energieverbrauch während einer Krafttrainingseinheit wurden mit Nichtsportlern durchgeführt, wodurch die möglichen Trainingsintensitäten unter denen lagen, welche bei erfahrenen Athleten zum Einsatz kommen. Doch auch bei Untersuchungen mit olympischen Gewichthebern lag der mittlere Energieverbrauch einer durchschnittlichen Trainingseinheit bei 392 kcal (11kcal/min) (Mello Meirelles und Gomes, 2004). Bisher fehlen vergleichbare Untersuchungen für Kinder und Jugendliche.

Shaibi et al. zeigten in einer aktuellen Studie aus dem Jahr 2006 neben einer Verbesserung der Körperzusammensetzung (siehe Tab. 15) eine signifikante Steigerung der Insulinsensitivität um 45,1 % (Shaibi et al., 2006). Diese Veränderung konnte bei der untersuchten Kontrollgruppe nicht nachgewiesen werden (-0,9 %). Da eine Insulinresistenz nicht nur bei Erwachsenen, sondern auch bei Kindern ein wichtiger pathogenetischer Faktor bei der Entstehung von Typ II Diabetes mellitus darstellt (Cruz et al., 2004), ist die Identifizierung von potentiellen Präventionsmög-

lichkeiten von besonderer Bedeutung. Die Ergebnisse von Shaibi et al. darauf hin, dass ein Krafttraining in diesem Zusammenhang eine geeignete Methode darstellt (Shaibi et al., 2006).

Bei einer positiven Veränderung der Körperzusammensetzung spielt neben der Reduktion des Körperfettanteils auch die Vergrößerung der fettfreien Körpermasse eine entscheidende Rolle. Die Begründung hierfür ist in der damit verbundenen Erhöhung des Energieumsatzes zu suchen, da die Muskulatur das größte Stoffwechselorgan des Menschen darstellt. Untersucht man die vier oben genannten Studien auf die Veränderung dieses Parameters, so zeigt sich auch hier, dass sich ein positiver Zusammenhang zwischen dem Krafttraining und der fettfreien Körpermasse abzeichnet.

10.4 Einfluss auf das kardiovaskuläre System

Die wichtigste und häufigste pathologische Veränderung der Arterien stellt die Arteriosklerose, mit ihren zum Teil tödlichen Folgeerkrankungen, wie dem Herzinfarkt oder Schlaganfall dar (Pschyrembel, 2002). Da diese Volkskrankheit ihren Ursprung bereits früh in der Jugend hat (Andersen et al., 2006), stellt sich die Frage, ob ein Training möglicherweise auch auf diesen Aspekt positive Einflüsse zeigt.

Insbesondere übergewichtige Kinder scheinen oft vorzeitig an einer derartigen Gefäßveränderung zu erkranken ((Mcgill et al., 2002) in (Meyer et al., 2006)). Nachweisbare Verdickungen einzelner Gefäßwandschichten (Intima und Media), weisen darauf hin, dass bei diesen Kindern bereits vor Manifestation einer Arteriosklerose Gefäßveränderungen stattfinden. Eine Kombination aus Ernährungs-, Verhaltens- und Bewegungstherapie mit resultierender Gewichtsreduktion ist jedoch in der Lage, diese Gefäßwandveränderung rückgängig machen. Dies konnte in einer Studie von Wunsch et al. gezeigt werden (Wunsch et al., 2006), was für eine Reversibilität früher Arteriosklerosestadien spricht. Aus diesem Grunde sollte die Langzeitprävention der Arteriosklerose bereits in der Kindheit oder in der frühen Jugend angegangen werden (Mcgill et al., 2000).

Eine weitere aktuelle Studie, die mit einer Reduktion des BMI einherging, deutet darauf hin, dass durch ein Ausdauertraining neben einer Veränderung der Wanddicke auch die „Flow-Mediated-Vasodilatation“ (FMD) verbessert werden konnte (Meyer et al., 2006). Aber auch ohne Gewichtsverlust scheinen sich Trainingsreize positiv auf die Gefäßfunktion auszuwirken (Green et al., 2003).

Nach dem vorliegenden Kenntnisstand ist die einzige Studie, die derartige Zusammenhänge im Rahmen einer Krafttrainingsintervention untersucht hat, diejenige von Watts et al. aus dem Jahre 2004 (Watts et al., 2004). Watts et al. überprüf-

ten darin die Auswirkungen eines achtwöchigen Circuit-Trainings auf vaskuläre Parameter von 19 übergewichtigen pubertären Kindern (14,3 Jahre). Vor dem Krafttraining wiesen die übergewichtigen Kinder signifikant schlechtere FMD-Werte auf, als ihre Kontrollgruppe. Die Intervention führte neben einer Kraftverbesserung zu einer Normalisierung der pathologischen Werte (Watts et al., 2004).

Neben der Arteriosklerose stellt die arterielle Hypertonie einen weiteren kardiovaskulären Risikofaktor dar, der immer häufiger auch bei Kindern beobachtet werden kann (Bocelli und Ballo, 2008). Auch wenn Studien existieren, welche den positiven Einfluss eines Ausdauertrainings auf einen erhöhten Blutdruck bei Kindern belegen, (Hansen et al., 1991; McMurray et al., 2002) sind vergleichbare Ergebnisse für das Krafttraining selten. Lediglich eine Studie aus den 80er Jahren weist bislang auf eine blutdrucksenkende Wirkung eines Krafttrainings im Nachwuchsbereich hin (Hagberg et al., 1984). Dabei stehen Krafttraining und Ausdauertraining nicht in Konkurrenz zueinander. Vielmehr scheint die Kombination beider Trainingsformen die besten Ergebnisse liefern zu können (Ewart et al., 1998; Hagberg et al., 1984).

Unabhängig davon, ob ein Krafttraining einen positiven Einfluss auf den Blutdruck bei Kindern hat, so sollten Kinder und Jugendliche mit einer vorliegenden Hypertonie vor dem Aufnehmen eines Krafttrainings gegebenenfalls medikamentös eingestellt werden, um die, während des Trainings auftretenden Blutdruckspitzen besser abfangen zu können (Small et al., 2008). So ist bekannt, dass der Blutdruck während einer Kraftbelastung in Abhängigkeit von der Zahl der durchgeführten Wiederholungen und der Höhe des relativen Widerstandes ansteigt. Nau et al. konnten dabei mit Hilfe intraaortaler Messungen zeigen, dass Blutdruckspitzen bei Kindern und Jugendlichen (8 – 16 Jahre) zum Zeitpunkt der willkürlichen Ermüdung auftreten – unabhängig von der verwendeten Kombination aus Widerstand und Wiederholungszahl (Nau et al., 1990). Als Ursache vermuten die Autoren eine mit der Rekrutierung motorischer Einheiten zunehmende mechanische Kompression peripherer Gefäße und durch Auslösung des Metaboreflexes, welcher die muskuläre Durchblutung auch unter erhöhtem intramuskulären Druck aufrechterhalten soll.

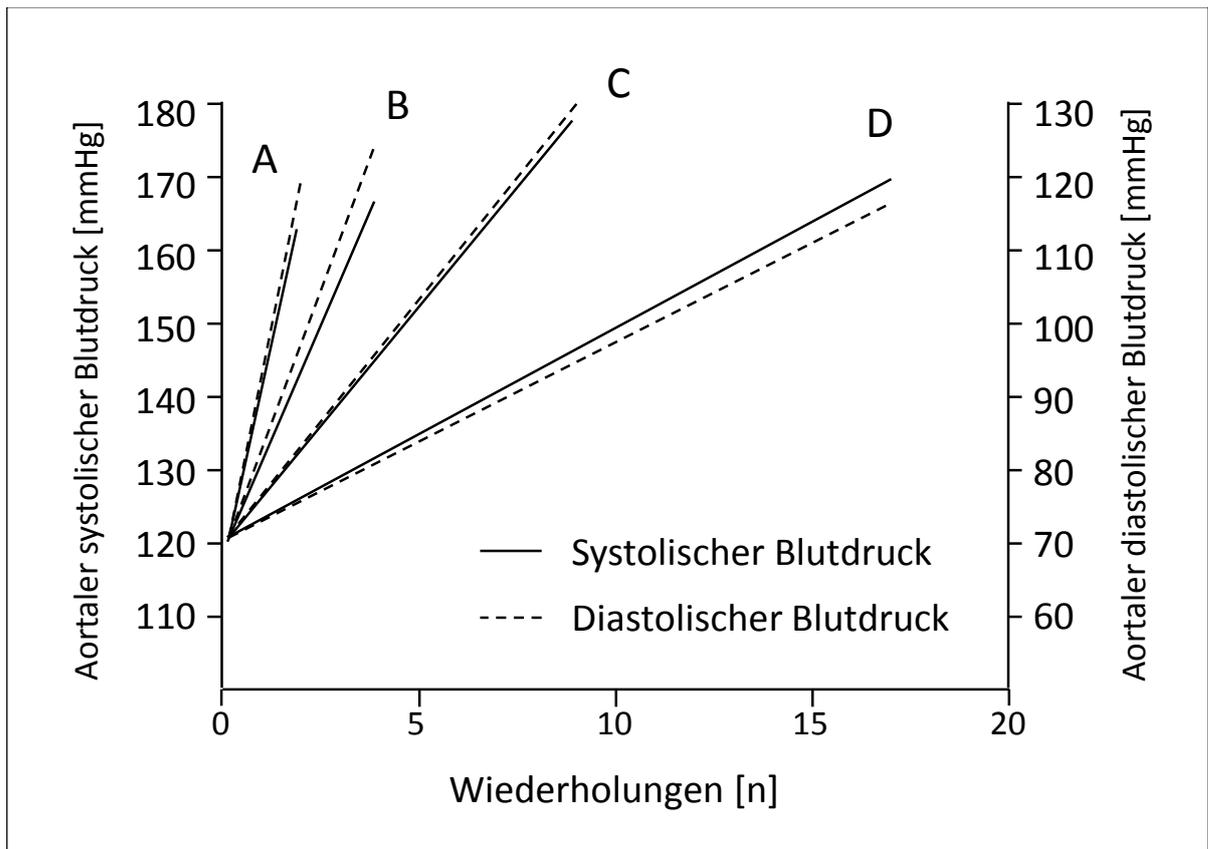


Abb. 34: Veränderungsrate des systolischen und diastolischen intraaortalen Druckes von 11 Kindern im Alter von $12,9 \pm 0,9$ Jahren, als Funktion der durchgeführten Wiederholungen beim Bankdrücken mit 100% 1RM (A), 90% 1RM (B), 75% 1RM (C), 60% 1RM (D). Abbildung modifiziert nach (Nau et al., 1990). Siehe Tab. 16 für Korrelationskoeffizienten und Steigung der jeweiligen Regressionsgraden.

Tab. 16: Veränderung des systolischen und diastolischen Blutdrucks in Abhängigkeit von der Intensität und der Wiederholungszahl beim Bankdrücken. Daten aus (Nau et al., 1990).

	Intensität	Steigung	Korrelationskoeffizient
Systolisch			
A	100% 1RM	16,2 mmHg/ Wdh.	r = 0,92
B	90% 1RM	13,2 mmHg/ Wdh.	r = 0,94
C	75% 1RM	5,8 mmHg/ Wdh.	r = 0,90
D	60% 1RM	2,4 mmHg/ Wdh.	r = 0,83
Diastolisch			
A	100% 1RM	16,7 mmHg/ Wdh.	r = 0,92
B	90% 1RM	14,0 mmHg/ Wdh.	r = 0,91
C	75% 1RM	5,0 mmHg/ Wdh.	r = 0,89
D	60% 1RM	1,7 mmHg/ Wdh.	r = 0,79

Aus diesen Daten lässt sich ableiten, dass Kinder mit pathologisch erhöhtem Blutdruck, maximale Ausbelastungen im Krafttraining meiden sollten um das Risiko von Gefäßwandschädigungen zu vermindern. Wenngleich diese Empfehlung plausibel klingt, steht demgegenüber die Beobachtung, dass Blutdruckanstiege unter Belastung den über den Tagesverlauf ambulant gemessenen Blutdruck senkt:

„Another potential effect of exercise on blood pressure that is less well studied is the fact that although participation in exercise raises blood pressure during the activity, ambulatory blood pressure monitored throughout the day suggests that those participation in sports have lower average daily blood pressure.”(Gidding, 2007).

In wieweit sich diese Beobachtung auch auf die krafttrainingassoziierten Blutdruckanstiege übertragen lassen, bleibt bislang unklar. Dennoch empfehlen Alpert und Wilmore, welche eine umfangreiche Übersichtsarbeit zu dem blutdrucksen-

kenden Effekt verschiedener Belastungsformen veröffentlichten, zu dem Schluss, dass Krafttraining Teil eines ganzheitlichen Hypertonie-Prophylaxekonzeptes sein sollte (Alpert und Wilmore, 1994).

10.5 Einfluss auf die aerobe Kapazität

Positive krafttrainingsbedingte Einflüsse auf die aerobe Leistungsfähigkeit sind aus theoretischer Sicht auf vielen verschiedenen Ebenen möglich. Kardiopulmonale Veränderungen sind ebenso denkbar, wie eine günstige Modifikation auf muskelzellulärer Ebene. Zum Teil finden sich in der Literatur Hinweise auf derartige Veränderungen für ein Krafttraining im Erwachsenenalter. Grimby et al. berichteten beispielsweise Anfang der 70er Jahre über eine erhöhte Aktivität von Enzymen des aeroben Stoffwechsels nach einem isometrischen Krafttraining (Grimby et al., 1973) und Costill et al. bestätigten dies sechs Jahre später für ein isokinetisches Training, wobei letztere jedoch darauf hinwies, dass solche Veränderungen stark von der Dauer der einzelnen Trainingsbelastung abhängt (Costill et al., 1979). Dieser Zusammenhang wird auch von der Beobachtung unterstützt, dass Gewichtheber eine niedrigere Zitratsynthaseaktivität aufweisen als Bodybuilder, welche hochvolumige Trainingspläne verwenden.

Bereits in frühen Untersuchungen ging man auch der Frage nach, welchen Einfluss ein Krafttraining auf die muskelinternen Energiereserven hat. Neben der zu erwartenden Erhöhung der intramuskulären Phosphatspeicher, konnte MacDougall 1977 nach einem fünfmonatigen Krafttraining eine Steigerung der Glycogenspeicher um 66 % feststellen. Tesch fand 1992 bei Bodybuildern eine 50 % höhere Glycogenkonzentration als bei untrainierten Personen.

McCall et al. untersuchten mit der Kapillarisation ebenfalls eine ausdauerrelevante Größe und fanden nach einem zwölfwöchigen Training eine signifikante Zunahme der Kapillaren pro Muskelfaser (McCall et al., 1996). Die gleichzeitige Hypertrophie führte jedoch dazu, dass die Kapillardichte pro Muskelquerschnitt gleich blieb. Hather et al. konnten dagegen genau diese Dichtezunahme nach einem hoch intensiven Krafttraining messen (Hather et al., 1991).

Da auch beim Krafttraining eine Steigerung der Herzaktivität zu beobachten ist, liegen Adaptationen des Herzmuskels nahe, die möglicherweise auch der Ausdauerleistungsfähigkeit des Organismus zugutekommen könnten. Hier wären insbesondere Veränderungen des Schlagvolumens und damit verknüpfte Anpassung der Herzfrequenz in Ruhe und unter Belastung denkbar. Aufgrund entscheidender Unterschiede in der Belastungsform, unterscheiden sich jedoch auch die Adaptationsphänomene maßgeblich. So muss das Herz beim Krafttraining ein relativ geringes Blutvolumen bei relativ hohem Druck pumpen, während es unter

Ausdauerbelastung ein großes Volumen bei relativ niedrigem Druck pumpen muss (Fleck und Kraemer, 2004). Dieser entscheidende Unterschied führt dazu, dass die beiden oben genannten Faktoren, Schlagvolumen und Herzfrequenz, durch ein Krafttraining nicht dauerhaft verändert werden.

Gegenteilige Befunde finden sich in der Literatur jedoch auch in Bezug auf die weiter oben beschriebenen aeroben Enzymsysteme (Chilibeck et al., 1999), die Glycogenspeicher (Goreham et al., 1999) und die Kapillarisation (Green et al., 1999). Hinzu kommen Berichte über abnehmende Myoglobingehalt (Tesch und Alkner, 2005) und eine Reduzierung der Mitochondriendichte (Fleck und Kraemer, 2004), die einer Steigerung der aeroben Kapazität durch ein Krafttraining eher widersprechen würden.

Wie für den Erwachsenensport, so erweist sich die Literaturlage auch in Bezug auf die Wirkung eines Krafttrainings auf die aerobe Leistungsfähigkeit bei Kindern und Jugendlichen als sehr lückenhaft und widersprüchlich (siehe Tab. 17). In einer frühen Studie von Weltmann et al., bewirkte ein 14wöchiges Krafttraining mit präpubertären Jungen (8,2 +/-1,3 Jahre) deutliche Veränderungen der maximalen Sauerstoffaufnahme (Weltman et al., 1986). Die Kinder in der Interventionsgruppe, die dreimal wöchentlich an hydraulischen Kraftmaschinen arbeiteten, konnten Ihre maximale Sauerstoffaufnahme im Rahmen der Studie signifikant um 19,4 % steigern, während die Kontrollgruppe eine Verschlechterung des selben Parameters um 2,7 % aufzeigte. Vergleichbar verhielt sich die Veränderung der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme, die in der Interventionsgruppe einer Verbesserung von 13,8 % und in der Kontrollgruppe einer Verschlechterung um 5,4 % entsprach.

Im Gegensatz dazu fanden sowohl Fripp und Hodginson, als auch Treuth et al. keine signifikanten Verbesserungen in der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme bei den von ihnen untersuchten Kindern und Jugendlichen (Fripp und Hodgson, 1987) (Treuth et al., 1998). Signifikante Veränderungen traten in der von Treuth et al. durchgeführten Studie lediglich in der absoluten VO₂max auf. Erst in einer aktuelleren Untersuchung von Suman et al. (Suman et al., 2001) aus dem Jahr 2001, konnten bezüglich der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme koncordante Ergebnisse zu der Untersuchung von Weltmann gefunden werden. Einschränkung bleibt jedoch zu sagen, dass es sich bei der hier untersuchten Probandengruppe um Kinder mit Verbrennungsverletzungen handelte, wodurch nicht abschätzbar ist, wie groß der Einfluss des posttraumatischen Aggressionsstoffwechsels auf die Baseline Parameter war.

Tab. 17: Einfluss von Krafttraining auf die aerobe Kapazität heranwachsender Sportler.

Autor, Jahr	N	Alter [Jahre]	Dauer/ Häufigkeit	VO _{2max}	rel.VO _{2max}
(Weltman et al., 1986)	16	8,2 +/- 1,3	14 W / 3x pro Woche	19,4 %*	13,8 %*
(Fripp und Hodgson, 1987)	14	15,7 +/- 1,2	9 W / 3x pro Woche	-	-2,47 %
(Treuth et al., 1998)	11	7-10	20 W / 3x pro Woche	14,4 %*	n.s.
(Suman et al., 2001)	19	7-17	12 W / 1-2x pro Woche	-	22,7 %*
(Shaibi et al., 2006)	22	15,1 +/- 0,5	16W / 2x pro Woche	-4,5 %	-

*= signifikante Veränderung; n.s.= nicht signifikant

Auch wenn die Ergebnisse einzelner Studien die eingangs beschriebenen theoretischen Überlegungen zur Verbesserung der aeroben Kapazität zu bestätigen scheinen, so bleibt festzuhalten, dass die aktuelle Datenlage keinen klaren Effekt von Krafttraining auf die aerobe Kapazität bei Kindern und Jugendlichen erkennen lässt.

10.6 Einflüsse auf die Psyche

Das wohl am häufigsten übersehene Potential eines Krafttrainings könnte ein positiver Einfluss auf die Psyche sein (Faigenbaum, 2007). In diesem Zusammenhang ist besonders an das Selbstvertrauen, die Selbsteinschätzung und das Selbstwertgefühl zu denken, welche insbesondere in der Phase der Pubertät eine große Rolle spielen. Aufgrund der engen Verzahnung der genannten psychischen Teilbereiche ist eine vollständige Abgrenzung untereinander allerdings nicht möglich.

Soll es hier zu positiven Veränderungen kommen, müssen sich die gewählten Belastungen an den individuellen Fähigkeiten und Fertigkeiten der Kinder und Jugendlichen orientieren, um Misserfolge zu vermeiden. Diese könnten sich sonst über Versagensängste kontraproduktiv auf die emotionale Stabilität auswirken. Aber gerade in der genauen Dosierbarkeit der Belastung erweist sich das Krafttraining im Gegensatz zu vielen anderen Sportarten als besonders geeignet.

Faigenbaum kommentierte diesen Zusammenhang in dem Artikel "Psychosocial Benefits of Prepubescent Strength Training" mit den Worten:

„Unlike some other sports and activities, strength training provides an opportunity for virtually all participants to be continually challenged and to feel good about their success.” (Faigenbaum et al., 1995).

Dass ein angemessenes Krafttraining mit wünschenswerten Veränderungen der Psyche einhergehen kann, wurde bereits in einigen Studien an jungen Erwachsenen gezeigt (James, ; Tucker, 1983). Aber auch für den Bereich des Kinder und Jugendtrainings sind diesbezüglich Daten verfügbar, die im Folgenden erörtert werden.

In einer früheren Studie aus dem Jahr 1988 von Holloway und Beuter untersuchten die Autoren den Einfluss eines zwölfwöchigen Krafttrainings auf psychische Faktoren untrainierter Mädchen (Holloway et al., 1988). Die Interventionsgruppe verbesserte sich im Prä-/Posttestvergleich neben einer 40 %igen Kraftsteigerung in allen psychischen Parametern, während die Kontrollgruppe keine Veränderung diesbezüglich erkennen ließ. Holloway und Beuter schlossen daraus, dass sich ein Krafttraining möglicherweise auch als Therapieform bei niedrigem Selbstwertgefühl eignen würde.

Rians et al. berichteten in ihrer 1985 veröffentlichten Studie, über positive Auswirkungen eines 14wöchigen Krafttrainings auf die von ihnen untersuchten achtjährigen Kinder (Rians et al., 1987). Dabei handelte es sich im Einzelnen um eine verbesserte soziale Kompetenz, eine erhöhte motorische Lernfähigkeit und die gestärkte mentale Disziplin (nicht genauer beschrieben). Es ist jedoch einschränkend zu sagen, dass diese Parameter mit keinem speziellen Verfahren erhoben wurden, sondern lediglich die subjektive Beobachtung der einzelnen Wissenschaftler widerspiegeln. Eine im gleichen Jahr veröffentlichte Studie von Weltmann et al. berichtet über ähnlich positive Veränderungen (Weltman et al., 1986). Hier berichteten die Eltern der 26 präpubertären Probanden (8,2 +/- 1,3 Jahre) über eine gesteigerte Aufmerksamkeit bei den Hausaufgaben oder anderen Aktivitäten unmittelbar nach dem Krafttraining; an Tagen ohne Krafttraining konnte dieses Verhalten hingegen nicht beobachtet werden.

In einer neueren Studie beobachteten Annesi et al. nach einem zwölfwöchigen Training (Kraft- Ausdauer- und Verhaltenstraining) signifikante Verbesserungen des Selbstvertrauens in der Gruppe der neun bis elf und elf bis zwölfjährigen Mädchen (Annesi et al., 2005). In den anderen Altersgruppen der fünf bis sechs, bzw. der sieben bis achtjährigen zeigten sich keine signifikanten Verbesserungen. In dieser Untersuchung war der Begriff des Selbstvertrauens, jedoch in weitestem

Sinne zu verstehen und bezog sich auf die Fähigkeit trotz subjektiver Hindernisse (Motivation) zum Training zu gehen. Über signifikant positive Einflüsse auf das Selbstwertgefühl, die psychische Anspannung und die Vitalität berichtet Annesi in einer aktuellen Untersuchung aus dem Jahr 2008 (Annesi et al., 2005). In dieser Studie wurden insgesamt 269 afroamerikanische Kinder im Alter von zehn Jahren im Hinblick auf die oben genannten Parameter untersucht. Die 12wöchige Intervention sah auch hier neben einem Krafttraining eine Ausdauer- und Verhaltenskomponente vor. Durch diese Vermischung unterschiedlicher Interventionsanteile ist es nicht möglich, den Einfluss des Krafttrainings zu separieren.

Nicht alle Untersuchungen konnten diese positiven Ergebnisse bestätigen. Faigenbaum et al. versuchten beispielsweise den Einfluss eines achtwöchigen Krafttrainings auf das Selbstvertrauen und die Selbsteinschätzung von elf Jungen und vier Mädchen (7-12 Jahre) aufzudecken, fanden dabei jedoch keine signifikanten Verbesserungen im angewendeten Punktesystem (MZSCS¹⁴) (Faigenbaum et al., 1995). Dennoch berichteten die Eltern der untersuchten Probanden davon, dass sie nach Beendigung der Studie bei ihren Kindern ein gesteigertes Wohlbefinden beobachten konnten. Auch die Kinder selbst berichteten darüber, dass sie komplexe Kraftanforderungen besser bewältigen konnten und dazu geneigt waren im Anschluss an die Studie auch andere Sportarten auszuprobieren. Als Ursache für die nichtsignifikanten Werte im Psychologischen Test vermuteten die Autoren zu hohe Ausgangswerte, wodurch eine weitere Steigerung kaum möglich war („ceiling effect“). Den Autoren zufolge sind weitere Untersuchungen mithilfe sensitiverer Messmethoden wünschenswert.

Eine Studie von Sadres et al. aus dem Jahre 2001, welche über 21 Monate die Effekte eines Krafttrainings bei 27 Kindern (9,2 +/- 0,3 Jahre) beobachteten, fanden vergleichbare Ergebnisse:

„Initial scores of self-concept were high in both groups, with no training effect.“ (Sadres et al., 2001).

Auch wenn das angewandte Verfahren (PPCS¹⁵) von dem zuvor genannten unterschied, so ist das negative Ergebnis vermutlich auf dieselben Zusammenhänge zurückzuführen. Die PPCS Scores lagen während der gesamten Trainingsphase bei 4,2 auf einer Skala von eins bis fünf. Hinzu kam, dass auch die Kontrollgruppe regelmäßig Sport trieb, was sich vermutlich auch positiv auf die Psyche auswirkte.

Es ist leicht zu erkennen, dass dieser Teilbereich noch weitgehend unerforscht ist.

¹⁴ MZSCS = Martinek-Zaichkowskiy Self Concept Scale for Children (Zaichkowsky et al., 1975)

¹⁵ PPCS = Perceived Physical Competence Scale. Dieser Test besteht aus zehn Items mit jeweils fünf Ausprägungsstufen, welche die körperliche Selbsteinschätzung in Bezug auf die körperliche Fitness und das körperliche Erscheinungsbild erfassen sollen.

“We are just starting to learn about the many benefits beyond the physical that occur with proper implementation of conditioning programs for both boys and girls.” (Kraemer und Fleck, 2005).

10.7 Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein Krafttraining für Kinder und Jugendliche aus medizinischer Sicht zu empfehlen ist. So zeigten alle Untersuchungen, welche den Stellenwert eines Krafttrainings im Sinne einer Verletzungsprophylaxe untersuchten, positive Ergebnisse im Sinne einer verminderten Verletzungsinzidenz. Da Krafttraining bislang nur in Kombination mit anderen Formen des Konditionstrainings untersucht wurde, bleibt der spezifische Einfluss des Widerstandstrainings zu klären. Auch in Bezug auf eine Steigerung der Knochenmineralisation, Verbesserung der Körperzusammensetzung und der aeroben Kapazität zeigten positive Einflüsse durch ein Krafttraining.

Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die Durchführung eines Krafttrainings an sich noch keine Vorteile für die Gesundheit aufweist, solange der Trainingsreiz die individuelle Kraftschwelle nicht überschreitet (Faigenbaum, 2007).

11 Beurteilung der Studienlage

11.1 Bewertungskriterien

Für die Bewertung der methodischen und inhaltlichen Qualität von trainingswissenschaftlichen Untersuchungen können unterschiedliche Beurteilungskriterien herangezogen werden. Eine übliche Vorgehensweise ist es, die einzelnen Untersuchungen an der Qualität der Zeitschrift zu messen, in der die jeweilige Studie publiziert wurde. Die Wertigkeit der Zeitschrift wird ihrerseits meist mit dem sogenannten „Impact Factor“ bewertet. Eine Bewertung der Studien nach diesem Kriterium findet sich in Kapitel 11.2.

Um die Qualität der bisher veröffentlichten Studien detaillierter beurteilen zu können, bedarf es jedoch einer noch genaueren Analyse. Ein detaillierter Abgleich der Untersuchungen mit Richtlinien für die Planung und Durchführung qualitativ hochwertiger Studien und mit Empfehlungen für die Art und Weise der Veröffentlichung, erscheint zielführend. Als Beispiel für derartige Leitlinien ist die „Guideline for Good Clinical Practice“ der European Medicines Agency (European Medicines

Agency, 08) und das „CONSORT-Statement“¹⁶ (Altman et al., 2001) zu nennen. Es gilt jedoch zu beachten,

„dass die dort beschriebenen Anforderungen so hoch sind, dass selbst gute Publikationen von Studien nur ca. 50 % der Anforderungen des CONSORT-Statements erfüllen.“ (Selbmann und Meisner, 2000).

Der Lancet berichtet jedoch in einem Artikel von 2001, dass unter Verwendung des CONSORT-Statements die Qualität der Beschreibung von randomisierten und kontrollierten Studien deutlich steigt (Moher et al., 2001). Vor diesem Hintergrund sollten zukünftige Studien auch in der Trainingswissenschaft an diese Gütekriterien angelehnt sein.

Als grundlegende Kriterien für das Studiendesign sind insbesondere die Randomisierung der Probanden, eine ausreichend große Stichprobe und eine geeignete Kontrollgruppe zu nennen. Hinzu kommen für die vorliegende Arbeit themenspezifische Gütekriterien die für Studien im Krafttraining von Kindern und Jugendlichen ebenfalls erfüllt sein sollten. Dazu gehören neben einer Reifeinteilung und der Berücksichtigung von Mädchen und Jungen, die genaue Beschreibung der Input-Parameter (siehe Kapitel 11.3). Eine Analyse der ausgewählten Untersuchungen in Bezug auf diese Gütekriterien ergab die in *Abb. 35* dargestellten Ergebnisse.

¹⁶ CONSORT = Consolidated Standards of Reporting Trials.

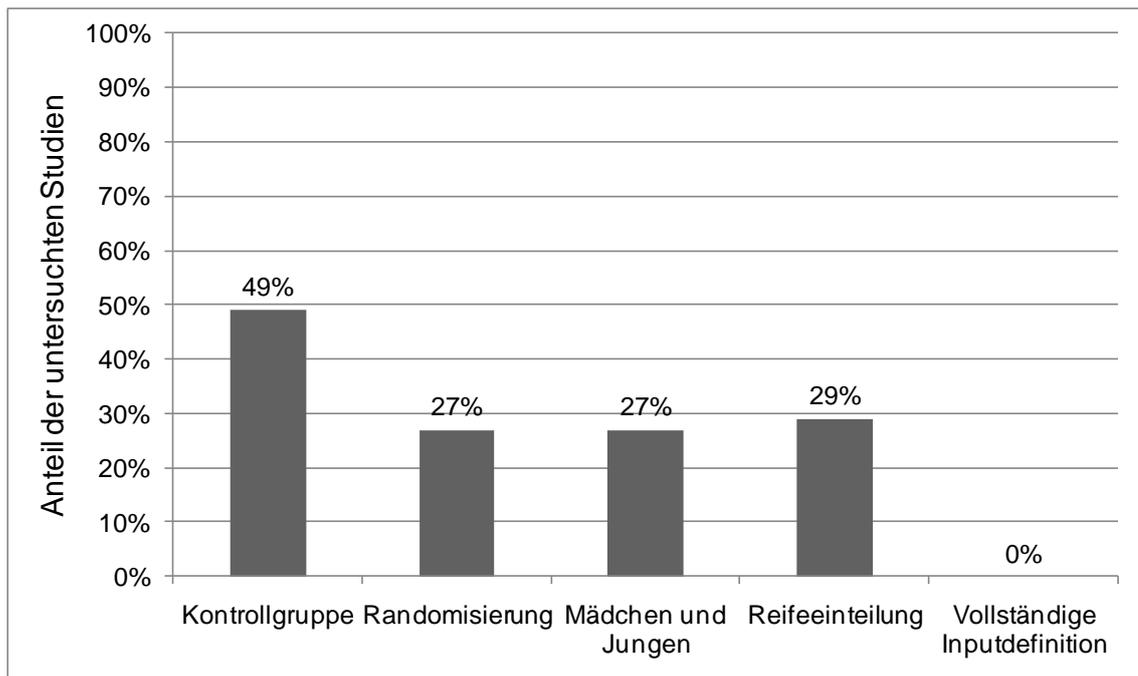


Abb. 35: Allgemeine und themenspezifische Bewertungskriterien der ausgewerteten Studien.

Die durchschnittliche Stichprobengröße lag bei 20,6 Probanden (SD: 28,51), 49 der 69 Studien wiesen eine Kontrollgruppe auf und nur in 27 Fällen wurde randomisiert. Die themenspezifisch besonders relevanten Gütekriterien erfüllten in Bezug auf die Untersuchung von Jungen und Mädchen nur 27 Studien, wobei zu berücksichtigen gilt, dass nur sieben dieser Studien die Ergebnisse für beide Geschlechter getrennt angegeben haben (siehe Kapitel 7.2). Eine Reifeinteilung wurde, wie in Kapitel 5 beschrieben, nur in 29 Studien vorgenommen und keine der 69 Studien erfüllte alle Kriterien zur genauen Beschreibung der Krafttrainingsintervention (siehe Kapitel 11.3).

11.2 Internationaler Vergleich

In den in dieser Arbeit untersuchten 69 Studien zum Thema Krafttraining im Nachwuchssport zeigt sich, dass neben den englischsprachigen Ländern USA, Kanada und Australien, auch Griechenland in vergleichsweise vielen internationalen Journals publizierte (n=4). Sieben weitere Staaten waren in diesem Zeitraum mit jeweils einer international veröffentlichten Studie vertreten, darunter auch Deutschland (siehe

Abb. 36).

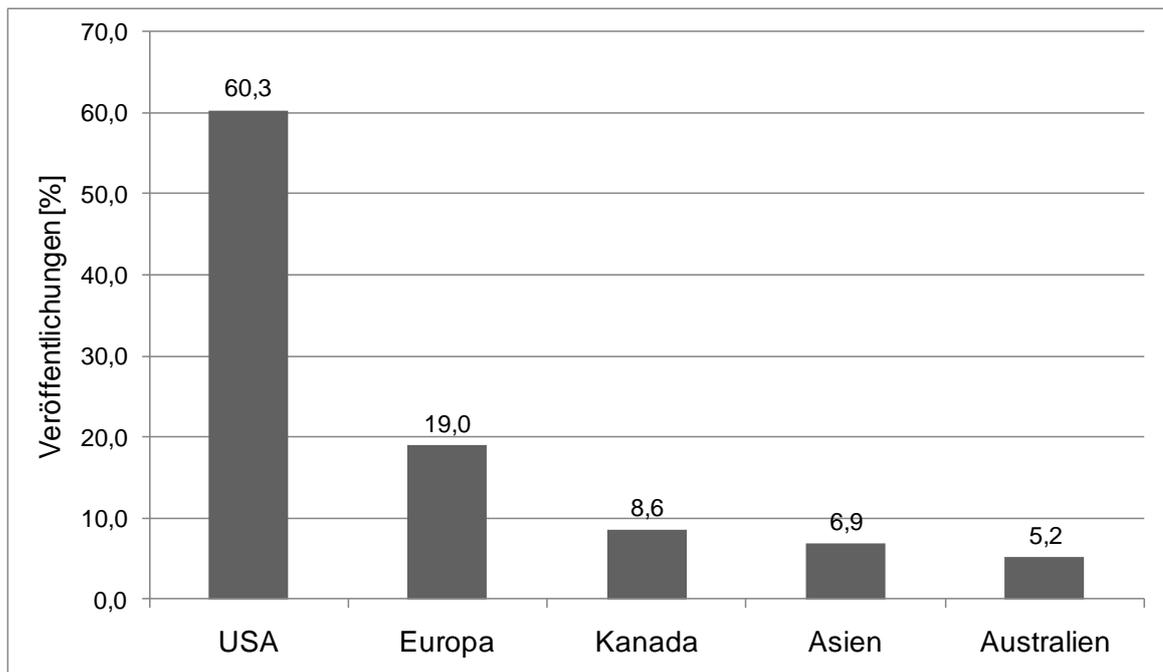


Abb. 36: Veröffentlichungen englischsprachiger Studien zum Thema „Krafttraining im Kindes und Jugendalter“.

Wählt man den so genannten „Impact Factor“ (IF) als Gütekriterium für die bislang publizierten Studien, so zeigt sich, dass die meisten Untersuchungen in Journals mit geringem oder solchen ohne IF veröffentlicht wurden (siehe Abb. 37). Daraus lässt sich ableiten, dass es offensichtlich schwierig ist, Publikationen über das Thema Krafttraining im Kindes- und Jugendalter in international hochrangigen Zeitschriften anzusiedeln. Das wiederum liegt mit großer Wahrscheinlichkeit an der bislang zu geringen Berücksichtigung wissenschaftlicher und methodischer Standards.

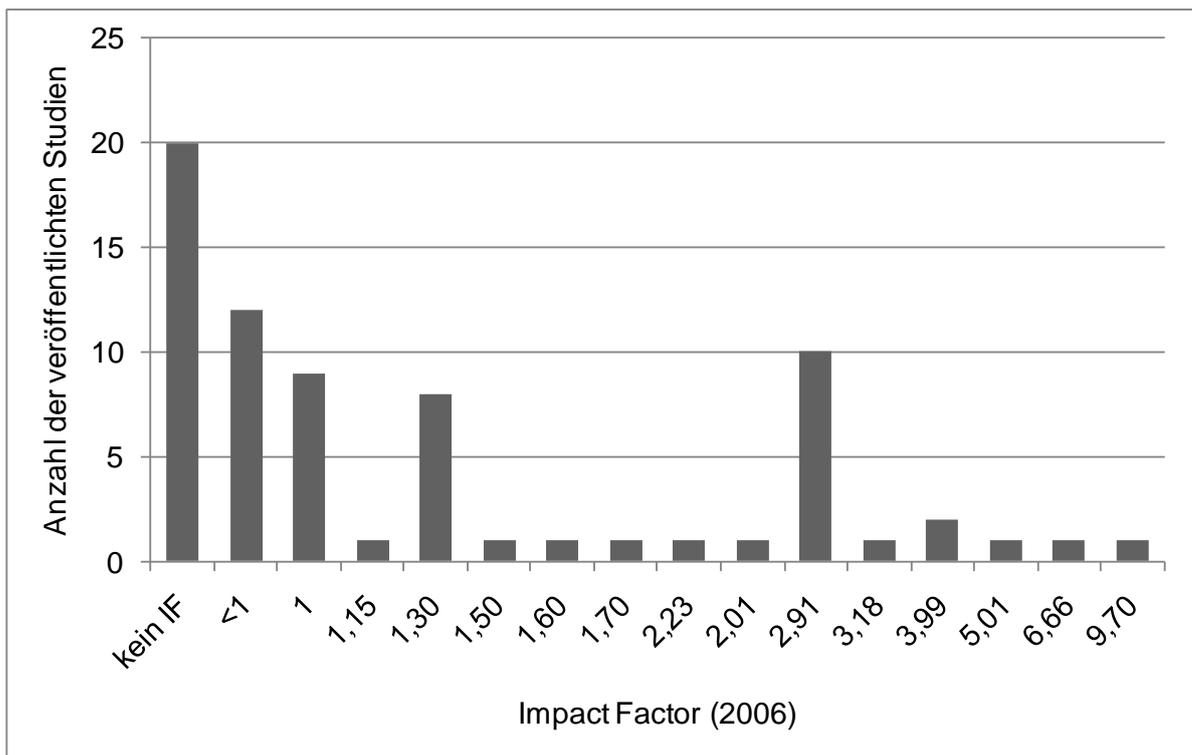


Abb. 37: „Impact Factors“ deutsch- und englischsprachiger Studien.

11.3 Input Definition

Wie bereits in Kapitel 11.1 angedeutet, ist eine genaue Beschreibung der Trainingsreize nicht einfach und wird deshalb auch in vielen Studien vernachlässigt. Mit diesem Thema beschäftigt sich auch eine Übersichtsarbeit von Toigo und Boutellier (Toigo und Boutellier, 2006). Die Autoren bemängeln darin besonders die unpräzise Definition der durchgeführten Interventionen in einem Großteil der bislang veröffentlichten Krafttrainingsstudien. Diese unzulängliche „Input - Definition“ führt dazu, dass viele der erhobenen Daten nicht ausreichend interpretierbar und vergleichbar sind. Auch Falk und Tenenbaum sehen in der von ihnen durchgeführten Metaanalyse gerade hier einen Schwachpunkt der Untersuchungen zum Krafttraining im Kindesalter und fordern für zukünftige Studien eine vollständigere Beschreibung des angewandten Trainings und der entsprechenden Reize (Falk und Tenenbaum, 1996).

Während Angaben zur Dauer des Trainings und der Anzahl der Trainingseinheiten pro Woche fast immer angegeben werden, so sind Daten zur Pause zwischen den einzelnen Wiederholungszahlen nur äußerst selten dokumentiert. Traditionell sind die Angaben auf die Belastungsintensität, die Wiederholungszahl und Sätze, Trainingseinheiten pro Woche, Pausenzeit zwischen den einzelnen Sätzen und die Gesamttrainingsdauer beschränkt (Toigo und Boutellier, 2006).

In dem von Toigo und Boutellier verfassten Artikel werden insgesamt 13 Faktoren gefordert, um einen Trainingsreiz präzise zu definieren (Toigo und Boutellier, 2006). Legt man dieses Kriterium an die 69 von uns analysierten nationalen und internationalen Studien an, so erfüllt nicht eine davon alle 13 Kriterien. Bei den geforderten Parametern handelt es sich um:

1. Belastungsintensität,
2. Wiederholungszahl,
3. Anzahl der Sätze,
4. Pause zwischen den Sätzen,
5. Anzahl der Trainingseinheiten pro Zeiteinheit (Tag/ Woche),
6. Interventionsdauer (Wochen),
7. Zeitliche und inhaltliche (Kontraktionsform) Gliederung einer Wiederholung,
8. Pause zwischen den Wiederholungen,
9. Spannungsdauer (Sekunden/ Minuten),
10. Muskeler schöpfung,
11. Bewegungsumfang,
12. Erholungszeit zwischen den Trainingseinheiten (Stunden/ Tage),
13. Anatomische Definition der Übungen (Übungsform).

Auch wenn diese Faktoren bereits einen Großteil des Trainingsreizes definieren, sollten drei weitere Parameter in diese Liste aufgenommen werden:

14. Organisationsform (Stationsbetrieb/ Circuittraining)
15. Gesamtdauer einer Trainingseinheit
16. Anzahl der durchgeführten Übungen.

Abgesehen von der nicht hinreichenden „Input-Definition“ finden sich meist weitere Ungenauigkeiten bei der Beschreibung der Untersuchungsgruppen. Dazu gehört unter anderem die in der Einleitung angesprochene Beschreibung des Reifestatus der untersuchten Probanden. Finden sich in vielen Studien außer dem chronologischen Alter gar keine Angaben, so teilen andere Autoren die Testpersonen lediglich in prae-, intra- und postpubertär ein (s.o.). Neben dem Reifestatus sollten

aber auch andere kennzeichnenden Merkmale der untersuchten Probandengruppe möglichst genau beschrieben werden, welche einen Einfluss auf die Testergebnisse haben könnten. Dazu gehört insbesondere die Ausgangsleistung der Kinder und Jugendlichen, die sicherlich eng mit sportlichen Freizeitaktivitäten verknüpft sind. Um abzuschätzen, wie der Spontanverlauf über die Zeit hin oder die Entwicklung unter einer anderen Intervention gewesen wäre, ist eine Kontrollgruppe unerlässlich. Auch wenn eine solche Kontrollgruppe eine weitere Mindestanforderung an eine wissenschaftliche Studie darstellen sollte, fehlte sie in mehr als 27 % in den von uns untersuchten Studien. Ein weiteres Problem stellt die Definition der unterschiedlichen Messmethoden dar, welche bei der Erfassung der trainingsbedingten Veränderungen zur Anwendung kamen. Obwohl für deren Beschreibung die gleiche Präzision angesetzt werden sollte, wie bei der „Input Definition“, finden sich in einigen frühen Studien gar keine Angaben über die angewandten Testverfahren (Diekmann und Letzelter, 1987; Hettinger, 1978).

12 Forschungsbedarf

Die oben dargestellten Ergebnisse der durchgeführten Literaturanalyse auf Fachbuch- und Journalebene lassen erkennen, dass vielen Fragen für das Krafttraining im Nachwuchsbereich bislang ungeklärt sind. Aufgrund der schlechten Vergleichbarkeit der Daten kann gegenwärtig nur gesagt werden, dass verschiedenartige Trainingsdesigns bei Kindern und Jugendlichen auf allen Reifungsstufen durchaus die Kraftleistungsfähigkeit steigern konnten. Viele der darüber hinaus erfassten Marker biologischer Anpassungsprozesse zeigten zum Teil deutliche Auslenkungen im Rahmen der Krafttrainingsinterventionen, deren kurz- und langfristige Bedeutung für den Nachwuchssport sind jedoch noch unbekannt. Die schlechte Vergleichbarkeit und die geringe Anzahl an Vergleichsstudien belegt die Wichtigkeit solcher Untersuchungsformen für die zukünftige Forschung auf diesem Gebiet. Für ein besseres Verständnis von biologischen und physiologischen Anpassungsprozessen durch Krafttraining im Kindes- und Jugendalter sind die in Tab. 18 dargestellten Forschungsfragen in zukünftigen Untersuchungen zu überprüfen.

Neben den in der Tabelle aufgelisteten Besonderheiten im Studiendesign, gilt es in zukünftigen Untersuchungen die unten folgenden allgemeinen Voraussetzungen zu erfüllen, um ein Mindestmaß an Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Eine Orientierung an den in Kapitel 11.1 genannten Richtlinien für die Planung, Durchführung (European Medicines Agency, 08) und Publikation von Studien (Altman et al., 2001) ist dabei zu empfehlen. Aus trainingswissenschaftlicher Sicht und vor dem Hintergrund der Mängel bisher durchgeführter Studien, lassen sich in

Bezug auf das Krafttraining im Kindes- und Jugendalter daraus folgende wesentlichen Gesichtspunkte entwickeln:

1. Konsequente Beachtung von Kriterien zur Stichprobengewinnung (Randomisierung, Parallelisierung),
2. Genaue Beschreibung der Inputdefinition,
3. Körpermassennormierte Beschreibung der relevanten Kenngrößen auf der Grundlage allometrischer Verfahren,
4. Verteilung der Geschlechter in den Stichproben,
5. Erfassung des Reifestatus möglichst anhand des Skeletalters,
6. Berücksichtigung des Fehlers 1. und 2. Art mit Justierung der Stichprobengröße,
7. Verringerung des Einflusses von Lerneffekten bezüglich der Bewegungskoordination durch ein vorgeschaltetes Techniktraining,
8. Justierung der Studiendauer an die Anpassungskinetik der untersuchten Zielparameter,
9. Erfassung des Ernährungsstatus,
10. Erfassung allgemeiner sportlicher Aktivitäten,
11. Erfassung motivationaler Komponenten,
12. Besondere Berücksichtigung der Reizintensität.

Tab. 18: Mögliche Forschungsthemen und –ziele.

Thema	Ziel
Leistungsentwicklung	
Erarbeitung und Evaluierung von sportartbezogenen Kraft-Anforderungsprofilen	Identifizierung sportartrelevanter Muskelgruppen, Kontraktionsgeschwindigkeiten, -dauer, gelenkspezifischer Bewegungsumfang (ROM) , Höhe der Kraftanforderung, metabolische Anforderungen, Belastungsdauer, Belastungsdichte, verletzungsanfällige Muskelgruppen
Vergleich von traditionellen Krafttests im Feld mit Laborverfahren	Überprüfung der Korrelationen zwischen herkömmlichen Krafttestverfahren, den „motor-performance-tests“ und der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit
	Überprüfung der Korrelationen zwischen neuerer Krafttestparameter, den „motor-performance-tests“ und der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit
Allgemeines vs. sportartspezifisches Krafttraining	Vergleich von sportartspezifischem und allgemeinem Krafttraining in Bezug auf die Leistungsverbesserung in der Primärsportart
Kontrollierte Effekte einzelner Trainingsparameter	Besseres Verständnis bezogen auf den Einfluss einzelner Trainingsparameter (Wiederholungen, Satzzahl, Belastungsintensität, etc.) auf die einzelnen Kraftfähigkeiten unter bio-physiologischen/ biochemischen und neurologischen Gesichtspunkten
Bedeutung der Ausbelastung im Krafttraining	Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Ausbelastungsgrad und den Trainingseffekten unter bio-physiologischen/ biochemischen und neurologischen Gesichtspunkten
Spezielle Krafttrainingsmittel/-methoden	
Mögliche Gefahren und Effekte von Vibrationstraining	Untersuchung der Einflüsse eines Vibrationstrainings auf die verschiedenen Kraftfähigkeiten (akut und/ oder chronisch) unter Berücksichtigung bio-physiologischer/ biochemischer und neurologischer Gesichtspunkte

Thema	Ziel
Mögliche Gefahren und Effekte eines EMS Trainings (Elektromyostimulation)	Untersuchung der Einflüsse eines EMS-Trainings auf die verschiedenen Krafftfähigkeiten (akut und/ oder chronisch) unter Berücksichtigung bio-physiologischer/ biochemischer und neurologischer Gesichtspunkte
Zeitpunkt für den Beginn die spezieller Krafttrainingsmethoden	Klärung, ob der frühe Beginn spezieller Krafttrainingsmethoden sich schlechter auf die Leistungsentwicklung auswirken als die späte Aufnahme solcher Trainingsmethoden.
Genetik	
Bedeutung genetischer Komponenten für die Krafttrainierbarkeit	Untersuchung des genetischen Einflusses auf die Trainierbarkeit der Kraft, zur Optimierung der Trainingssteuerung und der Prognose des individuellen Leistungspotentials.
Strukturelle Anpassung	
Muskelarchitektonische Eigenschaften	Überprüfung struktureller intramuskulärer Veränderungen (Fiederungswinkel) vor dem Hintergrund biomechanischer Leistungseinflüsse
Muskelfasertypen	Untersuchung von krafttrainingsbedingten Modifikationen im Bereich der Muskelfaserzusammensetzung
Hypertrophie	Nachweis hypertrophischer Muskelveränderungen für das präpubertäre Alter nach einem langdauernden (>20W) und intensiven Krafttraining (70-85 % 1RM)
Neurologische Anpassung	
Willkürliche und reflektorische Muskelaktivierung	Überprüfung von Unterschieden in der muskelgruppenspezifischen % MUA und deren Trainierbarkeit

Thema	Ziel
Rekrutierung und Frequenzierung und Synchronisierung	Einfluss eines Krafttrainings auf die Synchronisationsfähigkeit bei der Aktivierung von Synergisten und die verminderte Kokontraktion von Antagonisten; Klärung der Bedeutung dieser Fähigkeit für die einzelnen Kraftfähigkeiten
Hormonelle Veränderungen	
Verhältnis von anabolen und katabolen Hormonen	Untersuchung der kurz und mittelfristigen Reaktionen des Testosteron- / Cortisolquotienten auf ein Krafttraining und Untersuchung seiner Bedeutung für Kraftveränderungen
Wachstumshormon und IGF-1	Klärung der Bedeutung der krafttrainingsbedingten IGF-1- und Wachstumshormonausschüttung für die Krafttrainierbarkeit
Androgensensitivität	Untersuchung auf Veränderungen der Androgensensitivität der Muskelzellen und erhöhte Androgenaufnahme in die Zelle
Ernährung und Hormone	Klärung des Einflusses der Ernährung auf die krafttrainingsbedingten Hormonauslenkungen
Nutzen aus gesundheitlicher Sicht	
Verletzungsprophylaxe	Vergleich von saisonbegleitendem und präseasonalem Krafttraining in Bezug auf seine verletzungsprophylaktische Wirksamkeit
Rehabilitationszeit	Überprüfung ob ein regelmäßiges Krafttraining die Rehabilitationszeit nach Sportverletzungen positiv beeinflussen kann
Knochenmineralisation	Überprüfung ob ein regelmäßiges Krafttraining sich über eine gesteigerte Knochenmineralisation positiv auf die Stabilität des wachsenden Knochenskeletts auswirkt und über diesen Weg mit einer verminderten Frakturgefahr einhergeht

Thema	Ziel
Sehnenapparat	Klärung von Einflüssen eines Krafttrainings auf die mechanische Belastbarkeit des Sehnenapparates
Gelenkstabilisierung	Evaluierung eines potentiell positiven Einflusses eines Krafttrainings auf die Gelenkstabilisierung mit Minderung der in vielen Sportarten auftretenden Distorsionstraumata
Körperzusammensetzung	Untersuchung der Krafttrainingseinflüsse auf die Körperzusammensetzung
Blutfettwerte	Untersuchung der Krafttrainingseinflüsse auf die Blutfettwerte
Psyche	Klärung der Frage ob ein Krafttraining sich positiv auf psychische Parameter wie das Selbstbewusstsein, Selbstbild und allgemeines Wohlbefinden auswirkt
Blutdruck	Überprüfung, ob sich die im Krafttraining auftretenden Blutdruckspitzen langfristig negativ auf das Gefäßsystem auswirkt
Belastung und Beanspruchung	
Mechanik	Berechnung der biomechanischen Beanspruchung des Bewegungsapparates bei verschiedenen Krafttrainingsformen/ -übungen im Vergleich zu Erwachsenen
Metabolismus	Messung biochemischer und physiologischer Marker zur Quantifizierung mechanischer und energetischer Belastungsintensitäten
Kardiopulmonale Belastung	Erfassung von Blutdruckspitzen bei unterschiedlichen Trainingsformen/ -übungen; Messung von Herzfrequenzauslenkungen
Regenerationszeit	Messung biochemischer und physiologischer Marker zur Quantifizierung benötigter Regenerationszeiten und Evaluierung von Verhaltensweisen, welche die Regenerationszeit verkürzen
Immunabwehr	Überprüfung von Einflüssen eines Krafttrainings auf die Immunabwehr

Thema	Ziel
Ernährung	Überprüfung von Anforderungen an die Qualität und Quantität der Ernährung zur Vermeidung von negativen Einflüssen auf das Wachstum von Kindern und Jugendlichen

Zur Erfassung der in Tab. 18 dargestellten Zielparameter werden im Folgenden Verfahren aufgelistet, die sich in verschiedene Methodengruppen gliedern lassen. Die Unterteilung orientiert sich dabei an den jeweils übergeordneten Anpassungsformen des menschlichen Organismus im Kontext eines Krafttrainings und soll dabei einen Überblick über mögliche Diagnostikmittel geben, erhebt jedoch nicht den Anspruch auf Vollständigkeit:

Berücksichtigt wurden insbesondere Verfahren die in der themenrelevanten Literatur für die Diagnostik im Kindes- und Jugendalter als geeignet oder bedingt geeignet beschrieben wurden.

1. Strukturelle Veränderungen

- a. MRT (z. B. Faserverlauf, MCSA)
- b. DXA (z. B. Skelettreife)
- c. Sonographie (z. B. Fiederungswinkel, MCSA)
- d. Muskel-Feinnadelbiopsien (z. B. Muskelfaserspektrum)
- e. Haaranalyse (Stickstoffisotopie) (Huelsemann et al., 2008)
- f. Blutanalyse (z. B. Kreatin-Kinase, Myoglobin)
- g. Anthropometrie (z. B. Körperumfänge)
- h. BIA (z. B. Körperfettanteil)
- i. Densitometrie (Körperfettanteil)

2. Metabolische Veränderungen

- a. Kalorimetrie (z. B. Grundumsatz)
- b. Sense-Wear®-Manschette (z. B. Energieverbrauch)
- c. Double-Labeled-Water (z. B. Energieverbrauch)
- d. Blutanalyse (z. B. Laktatdiagnostik)
- e. Haaranalyse (Stickstoffbilanz)
- f. Vital-Sense® Kapsel (zentrale Körpertemperatur)

3. Enzymkonzentrationen (z. B. Phosphofruktokinase)

4. Hormonelle Veränderungen (akute und chronische Veränderungen der Serumkonzentration) (z. B. Testosteron-Cortisol-Quotient)
5. Funktionelle Veränderungen
 - a. Kraftdiagnostik (z. B. isometrische Maximalkraft)
 - b. Sportmotorische Testbatterien (z. B. jump and reach test)
 - c. Standardisierte sportartspezifische Leistungstests (z. B. Schwimmzeit)
 - d. Bewegungsanalyse (z. B. Gelenkbelastungen)
 - e. Ausdauerdiagnostik (z. B. VO₂max)
6. Nervale Veränderungen
 - a. EMG (z. B. Rekrutierungsmuster)
 - b. Elektrisch evozierte Muskelaktivierung (z. B. willkürliche Aktivierbarkeit der motorischen Einheiten)
7. Psychische Parameter
 - a. PPCS (=Perceived Physical Competence Scale) (z. B. Selbsteinschätzung)
 - b. Strukturierte Interviews (z. B. Diagnostik leistungsrelevanter Persönlichkeitsmerkmale)
 - c. The questionnaire of overtraining (Maso et al., 2003) (psychische Komponenten eines Übertrainings)
8. Kardiovaskuläre Veränderungen
 - a. Blutdruckmessung
 - b. Herzfrequenzmessung (z. B. Herzfrequenzvariabilität)
 - c. Echokardiographie (z. B. Schlagvolumen)

13 Zusammenfassung und Ausblick

Während im Erwachsenensport mittlerweile fast in allen Sportarten Krafftelemente in das Training integriert werden (Guy & Micheli, 2001), stehen dieser Entwicklung auf nationaler Ebene im Nachwuchssport noch viele mit dem Krafttraining verknüpfte Missverständnisse und traditionelle Vorstellungen im Wege. Führende internationale Institutionen veröffentlichen hingegen seit mehreren Jahren Positionspapiere, welche ein Krafttraining im Kindes- und Jugendalter einheitlich als sicher und effektiv bezeichnen (Small u.a., 2008; Behm u.a., 2008). Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, die internationale Erkenntnislage auf Studien- und Lehrbuchebebene aufzuarbeiten und den nationalen Lehrmeinungen gegenüberzustellen.

Neben der Analyse aktueller nationaler und internationaler Lehrbücher war die Auswertung aller verfügbaren themenrelevanten Publikationen Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Zur Erfassung dieser wurde eine Internetrecherche mit Hilfe der einschlägigen medizinischen und sportwissenschaftlichen Datenbanken durchgeführt. Darüber hinaus wurden Quellenangaben aus den gesichteten Originalarbeiten und den einschlägigen Lehrbüchern in die Recherche mit einbezogen. Voraussetzung für die Aufnahme der Studien in die Arbeit war, dass das Studiendesign ein Krafttraining beinhaltete und ein Bezug zum Nachwuchstraining vorhanden war. Insgesamt 69 Studien erfüllten diese Kriterien und wurden hinsichtlich ihres Untersuchungsdesigns und der jeweiligen Studienergebnisse analysiert.

Um dabei den während der biologischen Entwicklung der Kinder und Jugendlichen stattfindenden Veränderungen Rechnung zu tragen, ist aus wissenschaftlicher Sicht eine genaue Reifeeinteilung notwendig. Je feiner das dabei gewählte Raster, desto eher ist es möglich, zwischen Effekten der Reifung und trainingsabhängigen Anpassungsprozessen zu unterscheiden. Auch ermöglicht es Ergebnisse unterschiedlicher Studien miteinander zu vergleichen. Die Auswertung der Studien ergab jedoch, dass in 55% der Untersuchungen keine Reifeeinteilung vorgenommen wurde. Andere Studien beschränkten sich auf weniger präzise Einteilungstechniken, wie das deskriptive Verfahren von Tanner oder die Menstruationsanamnese bei Mädchen. Demgegenüber kamen hochsensitive Einteilungsverfahren, wie die Messung von Hormonspiegeln und die Bestimmung der Skelettreife, in nur vier Prozent aller Fälle zur Anwendung.

Betrachtet man die während der Reifeentwicklung auftretenden hohen Zuwachsraten in der Absolutkraft, so lassen sich diese zum Teil naturgemäß auf die physiologischen Veränderungen in der Körpermasse und -zusammensetzung zurückführen. Die „klassischen“ Korrelate Alter, Geschlecht, Größe und Gewicht konnten je-

doch nur 40-70% der Varianzen der Kraftentwicklung erklären (De Ste Croix, 2007). Selbst nach Normierung auf die Muskelquerschnittsfläche reduzierten sich altersbezogene Veränderungen, verschwanden aber nicht vollständig, so dass in der Literatur die Rolle verschiedener qualitativer Faktoren diskutiert wird. Neben neuromuskulären und biomechanischen Einflussfaktoren werden hierfür auch Veränderungen in der muskulären Enzymaktivität (Neu u.a., 2002), von Stoffwechselfparametern allgemein (Rowland, 2005; Armstrong & Welsman, 2007), von Kontraktionsmerkmalen (Blimkie, 1989) sowie der Einfluss von körperlicher Aktivität (Sunnegardh u.a., 1988) angeführt. Die Bedeutung der genannten Einzelaspekte für die physiologische Kraftentwicklung ist bislang jedoch unbekannt.

Irrtümlicherweise wurde über viele Jahre von der beschriebenen Wachstumsfunktion auf die Trainierbarkeit der Kinder geschlossen und man glaubte, dass erst mit einsetzender Sexualhormonbildung in der Pubertät nennenswerte Effekte durch ein Krafttraining zu erzielen seien (z.B. American Academy of Pediatrics, 1983). Die Analyse der 69 national und international veröffentlichten Studien konnte hingegen zeigen, dass die trainingsbedingten Zugewinne der Muskelkraft im Kindes- und Jugendalter prozentual vergleichbare Werte aufweisen wie bei Erwachsenen und sich sogar eine leichte Tendenz der besseren Trainierbarkeit im präpubertären Alter abzeichnet. Die Zuwächse für die isometrische Muskelkraft lag bei 26,3% (17 Studien), die für isokinetische bei 20,1% (6 Studien) und die für auxotonische Kraft bei 31,6% (23 Studien).

Da sich der Großteil der Untersuchungen zur Trainierbarkeit im Nachwuchstraining auf rein männliche oder gemischte Probandengruppen bezieht, kann der Einfluss des Geschlechts auf die Trainierbarkeit der Kraft nur unzureichend beurteilt werden (Falk & Tenenbaum, 1996; Matos & Winsley, 2007). Nur sieben der 69 untersuchten Studien gaben die Trainingseffekte geschlechtsspezifisch an. Auch wenn die wenigen verfügbaren Daten geringe Unterschiede zwischen Jungen und Mädchen vermuten lassen (Falk & Tenenbaum, 1996), wird deutlich, wie wichtig weitere Untersuchungen zur Krafttrainierbarkeit von Mädchen, insbesondere während der Pubertät sind (Malina u.a., 2004).

Welche Mechanismen für die trainingsbedingten Kraftzuwächse bei Kindern und Jugendlichen verantwortlich sind und ob sie sich von denen der Erwachsenen unterscheiden, wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Weitestgehend konkordant sind die Quellen jedoch bezüglich der Ansicht, dass sich präpubertal hormonbedingt keine Hypertrophieeffekte einstellen können (Tolfrey, 2007). Eine eingehende Analyse der veröffentlichten Studien konnte jedoch zeigen, dass die wenigen Untersuchungen, welche präzise Messverfahren, wie die Magnetresonanztomographie und die Computertomographie, eingesetzt haben durchaus signifikante Zuwächse im Muskelquerschnitt von präpubertären Kindern zeigen konnten (z.B. Funato u.a., 1987; Ramsay u.a., 1990).

Neben der Zunahme der Muskelfasergröße könnten auch Modifikationen der Muskelfaserzusammensetzung einen Teil der Krafttrainierbarkeit erklären. Derartige Umbauprozesse im Rahmen eines Krafttrainings sind für Erwachsene in der Literatur vergleichsweise gut dokumentiert (z.B. Fleck & Kraemer, 2004). Da muskelpoptische Untersuchungen mit der traditionellen Stanzmethode jedoch sehr schmerzhaft sein können, sind direkte Nachweise trainingsinduzierter Transformationen der Muskelfasertypen aus ethischen Gründen im Kindes- und Jugendalter nicht vertretbar (Menzi u.a., 2007). Obwohl in den vergangenen Jahren gezeigt werden konnte, dass die in Oberflächen-EMGs gemessenen Werte sehr gut mit denen der histochemischen Aufbereitung der Muskelfasern korrelieren, kam dieses Verfahren bislang nicht hinreichend zur Anwendung (Kupa u.a., 1995).

Die oft auf Lehrbuchebeine zu findende Aussage, dass die präpuberale Krafttrainierbarkeit größtenteils auf neurologische Anpassungsprozesse zurückzuführen sei, lässt sich durch die bislang veröffentlichten Studien nur unzureichend stützen (Rowland, 2005; Tolfrey, 2007). Von den 69 gesichteten Studien kontrollierten fünf neurophysiologische Veränderungen, von denen nur zwei signifikante Ergebnisse präsentieren konnten (Komi u.a., 1978; Ozmun u.a., 1994). Auch wenn eine Beteiligung neurologischer Adaptationen an hypertrophieunabhängigen Kraftzuwächsen wahrscheinlich ist, bleibt deren Ausmaß und Form in weiteren Studien zu klären. Gleiches gilt für die theoretisch denkbaren muskelarchitektonischen Veränderungen im Sinne einer Verlagerung der Muskelsehnenansatzstelle oder der Modifikation von Muskelfaserinsertionswinkeln, zu denen bislang belastbare Daten fehlen (De Ste Croix, 2007).

Für hormonelle Anpassungsprozesse ist zu sagen, dass selbst bei präpuberalen Kindern post interventionem zwar Auslenkungen der Sexualhormonspiegel beobachtet werden konnten (Tsolakis u.a., 2000), die Bedeutung dieser Anstiege für die Trainierbarkeit der Kraft und der oben erwähnten Hypertrophie allerdings bislang ungeklärt ist. Die ebenfalls präpuberal durch körperliche Aktivität auslenkbaren Hormone, wie das IGF-1 oder das HGH, welche sich auf die Kraftentwicklung auswirken könnten, wurden bisher nicht im Zusammenhang mit der Trainierbarkeit der Muskelkraft von Kindern und Jugendlichen untersucht (Rowland, 2005).

Die Literaturanalyse konnte weiterhin zeigen, dass nur wenige Daten veröffentlicht wurden, welche den Einfluss eines Krafttrainings auf die sportartspezifische Leistung überprüften. Die drei zu dem Themenbereich vorliegenden Studien, welche im Fußball und im Schwimmsport durchgeführt wurden, fanden darüber hinaus widersprüchliche Ergebnisse (Blanksby & Gregor, 1981; Wiedner & Pfeiffer, 2006; Christou u.a., 2006). Da diesem Zusammenhang aber gerade aus Sicht des Nachwuchssportleisters eine besondere Bedeutung beigemessen werden sollte, ergibt sich ein dringender Forschungsbedarf. Insbesondere die Berücksichtigung unterschiedlicher Sportarten ist dabei zu fordern.

Die Studienlage bezüglich des Einflusses von Krafttraining auf die motorische Leistungsfähigkeit ist mit insgesamt 20 Studien deutlich besser untersucht. In den Untersuchungen konnten signifikante Verbesserungen für Sprung-, Wurf- und Stoßkraft sowie für die Sprintschnelligkeit nachgewiesen werden (z.B. Faigenbaum u.a., 2007). Diese Ergebnisse werden durch eine kürzlich veröffentlichte Meta-Analyse gestützt.

Vor dem Hintergrund, dass auch bei Nachwuchsathleten aus unterschiedlichen Gründen davon ausgegangen werden muss, dass ein Krafttraining nicht ganzjährig praktiziert werden kann, ist die Frage nach der Stabilität von Kraftzuwächsen von hohem Stellenwert (Blimkie & Bar-Or, 2008). Der Großteil der vorhandenen Untersuchungsergebnisse legt nahe, dass Kraftreize in engmaschig regelmäßigen Abständen gesetzt werden müssen, um ein einmal erreichtes Niveau halten oder verbessern zu können. Hierzu scheint ein ein- bis zweimal pro Woche durchgeführtes allgemeines Krafttraining ausreichend zu sein (Fleck & Kraemer, 2004).

Eines der Hauptrisiken, welches oft mit dem Krafttraining im Nachwuchssport in Verbindung gebracht wird, ist die akute oder chronische Schädigung des passiven Bewegungsapparates (Hollmann & Hettinger, 2000). Insbesondere die Wachstumsfugen standen häufig im Mittelpunkt kritischer Diskussionen. Institutionen wie die American Academy of Pediatrics stufen das Risiko einer Epiphysenverletzung jedoch als äußerst gering ein (Small u.a., 2008). In keiner einzigen belastbaren prospektiven Studie, so die Canadian Society for Exercise Physiology, ist jemals eine solche Verletzung beobachtet worden (Behm u.a., 2008). Auch eine negative Beeinträchtigung des Wachstums durch ein regelmäßig durchgeführtes Krafttraining wird in der aktuellen Literatur verneint (Malina, 2006; Faigenbaum, 2007).

Neben den akuten Verletzungen des muskuloskeletären Systems sind auch chronische Schäden denkbar, welche im Zuge eines Übertrainings auftreten. Jedoch wurden bei den bislang durchgeführten Krafttrainingsstudien im Nachwuchsbe- reich keine Überlastungsparameter erfasst, so dass die Frage nach der Belastungsgrenze für ein Krafttraining im Nachwuchssport weitgehend unbeantwortet bleibt und man diesbezüglich auf allgemeine Leitlinien zur Vermeidung von Überlastungsschäden und Übertraining zurückgreifen muss (Small u.a., 2007).

Die aus einem Krafttraining resultierenden Vorteile für die Gesundheit wurden hingegen mehrfach dokumentiert. So zeigten alle Untersuchungen, welche den Stellenwert eines Krafttrainings im Sinne einer Verletzungsprophylaxe untersuchten, positive Ergebnisse bezüglich einer verminderten Verletzungsinzidenz (z.B. Heidt u.a., 2000). Da Krafttraining hierbei bislang nur in Kombination mit anderen Formen des Konditionstrainings untersucht wurde, bleibt der spezifische Einfluss des Widerstandstrainings zu klären. Auch in Bezug auf eine Steigerung der Knochenmineralisation, Verbesserung der Körperzusammensetzung und der aeroben Ka-

pazität zeigten Krafttrainingsinterventionen positive Einflüsse (zusammenfassend Faigenbaum, 2007).

Für den Nachwuchssport stellt sich jedoch gerade das Problem, dass ein Krafttraining oft vor dem Hintergrund eines breitflächig angelegten gesundheits- und fitnessorientierten Basistrainings mit eingegrenzten Belastungsgrößen mittlerer Intensität und moderaten Umfangs thematisiert wurde, seltener jedoch im Kontext des Nachwuchsleistungssportes. Insbesondere die Bedeutung einzelner Belastungsnormative für die Kraftsteigerung ist aufgrund fehlender Vergleichsstudien bislang ungeklärt.

Versucht man dennoch, aus den bislang publizierten Studien Richtlinien für die Gestaltung eines Krafttrainings im Nachwuchssport zu generieren, so erhält man die in *Tab. 19* wiedergegebenen Werte. Diese unterscheiden sich nur unwesentlich von den Empfehlungen für den Erwachsenensport (Fleck & Kraemer, 2004). Um ein hohes Ausprägungsniveau der Krafftfähigkeiten zu erreichen, ist innerhalb der angegebenen Belastungsgrenzen eine systematische Variation von Belastungsintensität und –umfang im Sinne einer wellenförmigen oder linearen Periodisierung anzustreben.

Tab. 19: Orientierungswerte zur Gestaltung eines Krafttrainings mit Nachwuchssportlern.

Trainingsparameter	Richtwerte
Intensität	60% - 85% des 1 RM
Belastungsdauer	6-15 Wiederholungen
Belastungsumfang	1-5 Übungssätze bei 8-10 Übungen
Belastungsdichte	1-2 min. Pause zw. den Sätzen
Trainingshäufigkeit	2-3x pro Woche
Trainingsmittel	Primär Kraftgeräte und Freihanteln

RM = Repetition Maximum (Wiederholungsmaximum)

Beurteilt man abschließend die Studienlage in Bezug auf ein Krafttraining im Kindes- und Jugendalter, so lässt sich sagen, dass noch weite Bereiche zu diesem Themenkomplex gänzlich unerforscht sind. Dazu zählen eine Vielzahl von grundlagenorientierten Forschungsfragen aus den Bereichen struktureller, neuronaler und hormoneller Adaptationen, aber auch zur akuten und chronischen Belastung

des Organismus fehlen belastbare Daten. Wie ein Krafttraining langfristig in das nachwuchssportliche Training zu integrieren ist, und welche Gestaltungskriterien ein sportartbezogenes Krafttraining aufzuweisen hat, gilt es in weiteren Untersuchungen zu klären.

14 Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: PROZENTUALE VERTEILUNG DER ANGEWANDTEN VERFAHREN ZUR REIFEEINTEILUNG IN DEN KRAFTTRAININGSSTUDIEN.	15
ABB. 2: GESCHLECHTSSPEZIFISCHE VERÄNDERUNGEN DER ISOMETRISCHEN KRAFT DES M. QUADRICEPS FEMORIS MIT ZUNEHMENDEM ALTER. ERGEBNISSE EINER LONGITUDINALEN STUDIE MIT 50 MÄDCHEN UND 50 JUNGEN. ABBILDUNG NACH (ROUND ET AL., 1999).....	17
ABB. 3: TYPISCHE KÖRPERGEWICHTSZUNAHME VON JUNGEN UND MÄDCHEN IN DEN ERSTEN BEIDEN LEBENSDEKADEN. ABBILDUNG MODIFIZIERT NACH (TANNER ET AL., 1966).	19
ABB. 4: TYPISCHE WACHSTUMSGESCHWINDIGKEIT (KÖRPERGRÖßE) VON JUNGEN UND MÄDCHEN IN DEN ERSTEN BEIDEN LEBENSDEKADEN. ABBILDUNG MODIFIZIERT NACH (TANNER ET AL., 1966).....	20
ABB. 5: VERHÄLTNIS ZWISCHEN APPENDICULÄRER MAGERER KÖRPERMASSE (ALST = APPENDICULAR LEAN SOFT TISSUE) UND DER GESAMTEN SKELETTMUSKELMASSE (SMM = SKELETTALE MUSKELMASSE). ALST IST DIE SUMME DER MAGEREN KÖRPERMASSE BEIDER ARME UND BEINE. ABBILDUNG NACH (KIM ET AL., 2002).	24
ABB. 6: LINEARE REGRESSIONSANALYSE DES ZUSAMMENHANGES ZWISCHEN FETTFREIER KÖRPERMASSE (FFM) GEMESSEN MIT BIOELEKTRISCHER IMPEDANZ-ANALYSE (BIA) UND DUALER RÖNTGENABSORBTIOMETRIE (DUAL ENERGY X-RAY ABSORBTIOMETRY = DEXA). $DXA\ FFM = 1,01 (BIA\ FFM) + 0,55; R^2 = 0,99; STANDARDFEHLER (SEE) = 1.16\ KG$. ABBILDUNG AUS (LIM ET AL., 2009).	29
ABB. 7: MUSKELFASERWACHSTUM – TRANSVERSALE SCHNITTE DURCH BIOPSATE DES M. QUADRICEPS FEMORIS EINES ACHT MONATE ALTEN SÄUGLINGS, EINES FÜNF JAHRE ALTEN KINDES, EINES 14 JAHRE ALTEN JUNGEN UND EINES 23 JAHRE ALTEN MANNES. EINE EINZELNE FASER WURDE IN JEDEM BILD MARKIERT UM DIE ZUNAHME DER FASERGRÖßE DURCH WACHSTUM UND REIFUNG HERVORZUHEBEN. ABBILDUNG AUS (JONES UND ROUND, 2008).	33
ABB. 8: AUF MRT-MESSUNGEN BASIERENDE MUSKELQUERSCHNITTSFLÄCHENBERECHNUNG DER ELLBOGENBEUGER (A) UND –STRECKER (B) VON INSGESAMT 95 AKTIVEN KINDERN UND JUGENDLICHEN (BESTEHEND AUS 18 MÄNNLICHEN UND 19 WEIBLICHEN PRÄPUBERTÄREN KINDERN, 15 MÄNNLICHE UND 14 WEIBLICHE JUGENDLICHE SOWIE 15 MÄNNER UND 14 FRAUEN IM ALTER VON >21 JAHREN). ABBILDUNG AUS (DEIGHAN ET AL., 2006).....	35
ABB. 9: BEISPIELE FÜR AXIALE MRT-AUFNAHMEN DER OBERSCHENKELMUSKULATUR AUF HÖHE DER MITTLEREN FEMURLÄNGE IM VERGLEICH ZWISCHEN KINDERN UND ERWACHSENEN (OHNE GENAUE ALTERSANGABE). DIE EINZELNEN KOMPONENTEN DES M. QUADRICEPS FEMORIS (RF = RECTUS FEMORIS, VL = VASTUS LATERALIS, VM = VASTUS MEDIALIS, VI = VASTUS INTERMEDIUS) SIND FARBLICH HERVORGEHOBBEN. ABBILDUNG AUS (O'BRIEN ET AL., 2010).....	36
ABB. 10: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VON ZWEI MUSKELN MIT ZWEI VERSCHIEDENEN FASERLÄNGEN BEI IDENTISCHER PCSA. VERGLEICH DER ISOMETRISCHEN LÄNGEN-SPANNUNGS EIGENSCHAFTEN. ABBILDUNG AUS (LIEBER UND FRIDEN, 2000).	39
ABB. 11: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VON ZWEI MUSKELN MIT ZWEI VERSCHIEDENEN FASERLÄNGEN BEI IDENTISCHER PCSA. VERGLEICH DER ISOTONISCHEN KRAFT-GESCHWINDIGKEITS- EIGENSCHAFTEN. ABBILDUNG AUS (LIEBER UND FRIDEN, 2000).	39
ABB. 12: SKELETTALE MUSKELMASSE (SMM) ALS FUNKTION DES ALTERS FÜR KINDER UND JUGENDLICHE (\blacktriangle ; $R = 0,79, P < 0,001$) UND ERWACHSENE (\circ ; $R = -0,24, P < 0,001$). GEMESSEN MIT EINEM 1,5- TESLA SCANNER. ABBILDUNG AUS (KIM ET AL., 2006).	42
ABB. 13: PROTEINBEDARF IN GRAMM PRO KG KÖRPERGEWICHT (NACH ALTER UND GESCHLECHT) IN DEN ERSTEN BEIDEN LEBENSDEKADEN. DATEN VON (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1985).	46
ABB. 14: VERÄNDERUNG DES FIEDERUNGSWINKELS DES M. GASTROCNEMIUS MEDIALIS IN ABHÄNGIGKEIT ALTER (\triangle = WEIBLICH, \blacksquare = MÄNNLICH). ABBILDUNG NACH (BINZONI ET AL., 2001).	48

ABB. 15: VERÄNDERUNG DES FIEDERUNGSWINKELS DES M. GASTROCNEMIUS MEDIALIS IN ABHÄNGIGKEIT DER MUSKELDICKE (Δ = WEIBLICH, \blacksquare = MÄNNLICH). ABBILDUNG NACH (BINZONI ET AL., 2001).....	48
ABB. 16: DARSTELLUNG DER ELEKTRISCH EVOZIERTEN KONTRAKTIONSKRAFT DES M. TRICEPS SURAE IM VERHÄLTNIS ZUR PHYSIOLOGISCHEN QUERSCHNITTSFLÄCHE DES M. TRICEPS SURAE. (● = MÄNNLICH, 11 JAHRE; ○ = WEIBLICH, 11 JAHRE; ▲ = MÄNNLICH, 14 JAHRE; △ = WEIBLICH, 14 JAHRE; ■ = MÄNNLICH, ERWACHSEN; □ = WEIBLICH, ERWACHSEN). ABBILDUNG NACH (DAVIES, 1985).	51
ABB. 17: ANTEIL DER TYP-I FASERN IM M. DELTOIDEUS VON 113 INDIVIDUEN IM ALTER VON 0 BIS 20 JAHREN. ABBILDUNG MODIFIZIERT NACH (OERTEL, 1988).....	54
ABB. 18: STEIGENDE BICEPSKRAFT UND TESTOSTERONKONZENTRATION IN JUNGEN IN EINEM ZEITRAUM VON DREI JAHREN VOR UND VIER JAHREN NACH DER MAXIMALEN WACHSTUMSGESCHWINDIGKEIT (PEAK HEIGHT VELOCITY = PHV). DIE KRAFT DES BICEPS IST DARGESTELLT IN PROZENT DER WEIBLICHEN VERGLEICHSGRUPPE. ABBILDUNG NACH (JONES UND ROUND, 2008) UND (ROUND ET AL., 1999).	57
ABB. 19: STEIGENDE PLASMA – IGF-1 - KONZENTRATIONEN BEI JUNGEN UND MÄDCHEN IN EINEM ZEITRAUM VON DREI JAHREN VOR UND VIER JAHREN NACH DER MAXIMALEN WACHSTUMSGESCHWINDIGKEIT (PHV = PEAK HEIGHT VELOCITY). ABBILDUNG NACH (JONES UND ROUND, 2008).	61
ABB. 20: WACHSTUMSHORMONAUSCHÜTTUNG IN FÜNF VERSCHIEDENEN ALTERSGRUPPEN (PRÄPUBERTÄR, FRÜHPUBERTÄR, SPÄTPUBERTÄR, POSTPUBERTÄR UND ERWACHSEN). ① MITTLERE ANZAHL ERFASSTER HGH PULSE IM ZEITRAUM VON 24 STUNDEN; ② MITTLERE FLÄCHE UNTER DER HGH-BLUTKONZENTRATIONSKURVE; ③ MITTLERE 24-STUNDEN HGH KONZENTRATION. DATEN VON 60 MÄNNLICHEN PROBANDEN IM ALTER VON 7 – 27 JAHREN. ABBILDUNG MODIFIZIERT NACH (MARTHA, JR. ET AL., 1989).....	62
ABB. 21: VERSUCHSAUFBAU FÜR DIE ERFASSUNG DER MAXIMALEN ELEKTRISCH EVOZIERTEN MUSKELKONTRAKTION AM BEISPIEL DES BEINSTRECKERS. DARGESTELLT SIND DAS STIMULATIONSGERÄT MIT DEN ENTSPRECHENDEN ELEKTRODEN AM OBERSCHENKEL SOWIE DIE GRAPHISCHE ABLEITUNG DER GEMESSENEN DREHMOMENTE. ABBILDUNG AUS (BLIMKIE ET AL., 1989).	67
ABB. 22: VERHÄLTNIS ZWISCHEN DER KOAKTIVIERUNG DES M. TIBIALIS ANTERIOR BEI PLANTARFLEXION UND DEM ALTER. DER KOAKTIVIERUNGSINDEX IST DEFINIERT ALS VERHÄLTNIS ZWISCHEN DER EMG-AKTIVITÄT DES M. TIBIALIS ANTERIOR UND DEM M. TRICEPS SURAE (■ = PRÄPUBERTÄRE KINDER; □ = ERWACHSENE; * = SIGNIFIKANT NIEDRIGERER KOAKTIVIERUNGSINDEX IN DER GRUPPE DER ERWACHSENEN IM VERGLEICH ZU DEN PRÄPUBERTÄREN KINDERN) (GROSSET ET AL., 2008).	69
ABB. 23: DIFFERENZIAL-INTERFERENZ-KONTRAST-FOTOMIKROGRAPHIE VON MOTONEURON-HYBRIDZELLEN MIT TRANSFIZIERTEN ANDROGENREZEPTOREN, WELCHE ÜBER 48H MIT 100 NM DIHYDROTESTOSTERON (= DHT) BEHANDELT WURDEN IM VERGLEICH ZUR KONTROLLGRUPPE. IN DER DHT-BEHANDELTEN GRUPPE ZEIGEN SICH DEUTLICH LÄNGERE NEURITEN (PFEILE). ABBILDUNG AUS (FARGO ET AL., 2008).	71
ABB. 24: KRAFTTRAINIERBARKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON ALTER UND GESCHLECHT. ABBILDUNG NACH (HETTINGER, 1958).....	74
ABB. 25: WÖCHENTLICHE VERBESSERUNG DER ISOKINETISCHEN KRAFT IN ABHÄNGIGKEIT VOM ALTER (DATEN VGL. TAB. 5).	85
ABB. 26: WÖCHENTLICHE VERBESSERUNG DER ISOMETRISCHEN KRAFT IN ABHÄNGIGKEIT VOM ALTER (DATEN VGL. TAB. 6).	86
ABB. 27: WÖCHENTLICHE VERBESSERUNG DER AUXOTONISCHEN KRAFT IN ABHÄNGIGKEIT VOM ALTER (DATEN SIEHE TAB. 7).	86

ABB. 28: ÜBERSICHT ÜBER DIE PROZENTUALE VERTEILUNG VERSCHIEDENER EINFLUSSFAKTOREN AUF DAS GRÖßENVERHÄLTNIß DER TYP-1 FASERN IM MENSCHLICHEN MUSKEL. ABBILDUNG NACH (SIMONEAU UND BOUCHARD, 1995).....	104
ABB. 29: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER KRAFTZUWÄCHSE UND -VERLUSTE IM RAHMEN DER LONGITUDINALEN STUDIE VON DIEKMANN UND LETZELTER (DIEKMANN UND LETZELTER, 1987). GESAMTZEITRAUM DER STUDIE LAG BEI DREI JAHREN. □ = TRAININGSGRUPPE; ○ = KONTROLLGRUPPE; GESTRICHELTE LINIE = NETTOKRAFTZUWACHS; RECHTECKE = ZEITRAUM DER TRAININGSINTERVENTION (12 WOCHEN).....	112
ABB. 30: WÖCHENTLICHE VERÄNDERUNG DER SCHNELLIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VOM ALTER (DATEN AUS (CHRISTOU ET AL., 2006; DIALLO ET AL., 2001; DIEKMANN UND LETZELTER, 1987; FAIGENBAUM ET AL., 2007; FAIGENBAUM UND MEDIATE, 2006; FALK UND MOR, 1996; FLANAGAN ET AL., 2002; KOTZAMANIDIS, 2006; STEINMANN, 1990; WIEDNER UND PFEIFFER, 2006)).	117
ABB. 31: WÖCHENTLICHE VERÄNDERUNG DER SPRUNGFRAFT IN PROZENT (DATEN AUS (BROWN ET AL., 1986; CHRISTOU ET AL., 2006; DIALLO ET AL., 2001; DIEKMANN UND LETZELTER, 1987; FAIGENBAUM ET AL., 2007; FAIGENBAUM ET AL., 2007; FAIGENBAUM UND MEDIATE, 2006; FAIGENBAUM ET AL., 2005; FAIGENBAUM ET AL., 2002; FAIGENBAUM ET AL., 1996; FAIGENBAUM ET AL., 1993; FALK UND MOR, 1996; FLANAGAN ET AL., 2002; HETZLER ET AL., 1997; KOTZAMANIDIS, 2006; STEINMANN, 1990; UMBACH UND FACH, 1990; WELTMAN ET AL., 1986; WIEDNER UND PFEIFFER, 2006)).	118
ABB. 32: WÖCHENTLICHE VERÄNDERUNG DER WURF-/ UND STOßKRAFT IN ABHÄNGIGKEIT VOM ALTER (DATEN AUS (DIEKMANN UND LETZELTER, 1987; FAIGENBAUM ET AL., 2007; FAIGENBAUM ET AL., 2007; FAIGENBAUM UND MEDIATE, 2006; FAIGENBAUM ET AL., 1993; FALK UND MOR, 1996; FLANAGAN ET AL., 2002; LOPES ET AL., 2001; STEINMANN, 1990; UMBACH UND FACH, 1990).	119
ABB. 33: ISOMETRISCHER KRAFTVERLUST IN ABHÄNGIGKEIT VON DER MAXIMALEN BLUT-CK-KONZENTRATION (WERTE ZUSAMMENGESTELLT AUS (WARREN UND PALUBINSKAS, 2008).	124
ABB. 34: VERÄNDERUNGSRATE DES SYSTOLISCHEN UND DIASTOLISCHEN INTRAAORTALEN DRUCKES VON 11 KINDERN IM ALTER VON $12,9 \pm 0,9$ JAHREN, ALS FUNKTION DER DURCHFÜHRTEN WIEDERHOLUNGEN BEIM BANKDRÜCKEN MIT 100% 1RM (A), 90% 1RM (B), 75% 1RM (C), 60% 1RM (D). ABBILDUNG MODIFIZIERT NACH (NAU ET AL., 1990). SIEHE TAB. 16 FÜR KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN UND STEIGUNG DER JEWEILIGEN REGRESSIONSGRADEN.	141
ABB. 35: ALLGEMEINE UND THEMENSPEZIFISCHE BEWERTUNGSKRITERIEN DER AUSGEWERTETEN STUDIEN.	150
ABB. 36: VERÖFFENTLICHUNGEN ENGLISCHSPRACHIGER STUDIEN ZUM THEMA „KRAFTTRAINING IM KINDES UND JUGENDALTER“.....	151
ABB. 37: „IMPACT FACTORS“ DEUTSCH- UND ENGLISCHSPRACHIGER STUDIEN.....	152

15 Tabellenverzeichnis

TAB. 1: GLIEDERUNG DER UNSYSTEMATISCHEN LITERATURRECHERCHE.....	7
TAB. 2: STUFEN DER LITERATURRECHERCHE.	11
TAB. 3: KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN VON SMM-PRÄDIKTOREN MIT DER VIA MAGNETRESONANZTOMOGRAPHIE (MRT) GEMESSENEN GESAMTMUSKELMASSE BASIEREND AUF EINEM DATENSATZ VON 244 NICHTADIPÖSEN PROBANDEN. PARTIELLE KORRELATIONEN NACH NORMIERUNG AUF DAS ALTER DER PROBANDEN SIND EBENFALLS ANGEZEIGT. CAG (= CORRECTED ARM GIRTH), CTG (= CORRECTED THIGH GIRTH) UND CCG (= CORRECTED CALF GIRTH) STEHEN FÜR HAUTFALTEN-KORRIGIERTE UMFANGSMESSUNGEN DES OBERARMS, DES OBERSCHENKELS UND DER WADE (DATEN AUS (LEE ET AL., 2000)).	30
TAB. 4: ALTERSABHÄNGIGE ZUSAMMENSETZUNG DER FETTFREIEN KÖRPERMASSE IN DEN ERSTEN BEIDEN LEBENSDEKADEN BEI JUNGEN UND MÄDCHEN (DATEN VON (FOMON ET AL., 1982))	44
TAB. 5: PROZENTUALE VERÄNDERUNGEN DER ISOKINETISCHEN KRAFT IM RAHMEN EINES KRAFTTRAININGS.	77
TAB. 6: PROZENTUALE VERÄNDERUNGEN DER ISOMETRISCHEN KRAFT IM RAHMEN EINES KRAFTTRAININGS.	79
TAB. 7: PROZENTUALE VERÄNDERUNGEN DER AUXOTONISCHEN KRAFT IM RAHMEN EINES KRAFTTRAININGS.	82
TAB. 8: EINFLUSS VON KRAFTTRAINING AUF HYPERTROPHISCHE PROZESSE	93
TAB. 9: NEUROLOGISCHE ANPASSUNGERSCHEINUNGEN IM KRAFTTRAINING MIT KINDERN UND JUGENDLICHEN.	100
TAB. 10: HORMONELLE VERÄNDERUNGEN IM RAHMEN EINES KRAFTTRAININGS.....	105
TAB. 11: WÖCHENTLICHER KRAFTVERLUST NACH UNTERSCHIEDLICHEN BELASTUNGSPAUSEN IM ANSCHLUSS AN VERSCHIEDENE KRAFTTRAININGSINTERVENTIONEN.	109
TAB. 12: AUSWIRKUNGEN VON KRAFTTRAINING AUF DIE SPORTARTSPEZIFISCHE LEISTUNGSFÄHIGKEIT..	114
TAB. 13: EFFEKTE EINES KRAFT-/KONDITIONSTRAININGS AUF DIE VERLETZUNGSHÄUFIGKEIT HERANWACHSENDE ATHLETEN.	131
TAB. 14: EINFLUSS VON KRAFTTRAINING AUF MINERALGehALT UND DICHTHE DES KNOCHENS.....	133
TAB. 15: VERÄNDERUNG DER KÖRPERZUSAMMENSETZUNG BEI ÜBERGEWICHTIGEN KINDERN UND JUGENDLICHEN.	136
TAB. 16: VERÄNDERUNG DES SYSTOLISCHEN UND DIASTOLISCHEN BLUTDRUCKS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER INTENSITÄT UND DER WIEDERHOLUNGSZAHL BEIM BANKDRÜCKEN. DATEN AUS (NAU ET AL., 1990).	142
TAB. 17: EINFLUSS VON KRAFTTRAINING AUF DIE AEROBE KAPAZITÄT HERANWACHSENDE SPORTLER..	145
TAB. 18: MÖGLICHE FORSCHUNGSTHEMEN UND –ZIELE.	156
TAB. 19: ORIENTIERUNGSWERTE ZUR GESTALTUNG EINES KRAFTTRAININGS MIT NACHWUCHSSPORTLERN.	166
TAB. 20: POSITIONSPAPIERE UND RICHTLINIEN VERSCHIEDENER INTERNATIONALER ORGANISATIONEN. .	209

16 Literaturverzeichnis

1. Adams, G. R., Hather, B. M., Baldwin, K. M. & Dudley, G. A. (1993). *Skeletal-Muscle Myosin Heavy-Chain Composition and Resistance Training*. *Journal of Applied Physiology* 74 (2), 911-915.
2. Aherne, W., Ayyar, D. R., Clarke, P. A. & Walton, J. N. (1971). *Muscle fibre size in normal infants, children and adolescents. An autopsy study*. *J.Neurol.Sci* 14 (2), 171-182.
3. Allen, D. G., Lamb, G. D. & Westerblad, H. (2008). *Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms*. *Physiol Rev.* 88 (1), 287-332.
4. Allen, D. L., Roy, R. R. & Edgerton, V. R. (1999). *Myonuclear domains in muscle adaptation and disease*. *Muscle and Nerve* 22 (10), 1350-1360.
5. Alpert, B. S. & Wilmore, J. H. (1994). *Physical Activity and Blood Pressure in Adolescents*. *Pediatric Exercise Science* 6, 361-380.
6. Altman, D. G., Schulz, K. F., Moher, D., Egger, M., Davidoff, F., Elbourne, D., Gotzsche, P. C. & Lang, T. (2001). *The revised CONSORT statement for reporting randomized trials: Explanation and elaboration*. *Annals of Internal Medicine* 134 (8), 663-694.
7. American Academy of Pediatrics (1983). *Weight training and weight lifting: information for the pediatrician*. *Physician Sports Med* 11, 157-161.
8. American Academy of Pediatrics (2001). *Strength Training by Children and Adolescents*. *Pediatrics* 107 (6), 1470-1472.
9. American College of Sports Medicine (2006). *ACSMs Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Philadelphia u.a.:Lippincott Williams & Wilkins.
10. Andersen, L. B., Harro, M., Sardinha, L. B., Froberg, K., Ekelund, U., Brage, S. & Anderssen, S. A. (2006). *Physical activity and clustered cardiovascular risk in children: a cross-sectional study (The European Youth Heart Study)*. *Lancet* 368 (9532), 299-304.
11. Annesi, J. J., Westcott, W. L., Faigenbaum, A. D. & Unruh, J. L. (2005). *Effects of a 12-week physical activity protocol delivered by YMCA after-school counselors (youth fit for life) on fitness and self-efficacy changes in 5-12-year-old boys and girls*. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 76 (4), 468-476.

12. Arampatzis, A., Karamanidis, K., Mademli, L. & Albracht, K. (2009). *Plasticity of the human tendon to short- and long-term mechanical loading*. *Exerc Sport Sci Rev.* 37 (2), 66-72.
13. Arampatzis, A., Karamanidis, K., Morey-Klapsing, G., De Monte, G. & Stafilidis, S. (2007). *Mechanical properties of the triceps surae tendon and aponeurosis in relation to intensity of sport activity*. *Journal of Biomechanics* 40 (9), 1946-1952.
14. Armstrong, N., Spurway, N. & MacLaren, D. (2007). *Paediatric Exercise Physiology*.
15. Baechle, T. R., Earle, R. W. & Wathen, D. (2008). *Essentials of strength training and conditioning*. Champaign: Human Kinetics.
16. Baker, D., Mitchell, J., Boyle, D., Currell, S., Currell, P., Wilson, G., Bird, S. P., O'Connor, D., und Jones, J. (2007). *Resistance Training for Children and Youth: A Position Statement from the Australian Strength and Conditioning Association (ASCA)*. Zugriff am 12.11.2007 unter www.strengthandconditioning.org.
17. Ballabriga, A. (2000). *Morphological and physiological changes during growth: an update*. *European Journal of Clinical Nutrition* 54 Suppl 1, S1-S6.
18. Bass, S., Pearce, G., Bradney, M., Hendrich, E., Delmas, P. D., Harding, A. & Seeman, E. (1998). *Exercise before puberty may confer residual benefits in bone density in adulthood: studies in active prepubertal and retired female gymnasts*. *J. Bone Miner. Res.* 13 (3), 500-507.
19. Bassa, E., Kotzamanidis, C., Patikas, D. & Paraschos, I. (2001). *The effect of age on isokinetic concentric and eccentric moment of knee extensors*. *Isokinetics and Exercise Science* 9 (4), 155-161.
20. Baumgartner, R. N., Heymsfield, S. B., Lichtman, S., Wang, J. & Pierson, R. N. (1991). *Body-Composition in Elderly People - Effect of Criterion Estimates on Predictive Equations*. *American Journal of Clinical Nutrition* 53 (6), 1345-1353.
21. Baumgartner, T. A. & Wood, S. S. (1984). *Development of Shoulder-Girdle Strength-Endurance in Elementary Children*. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 55 (2), 169-171.
22. Baxter-Jones, A. D. G. und Mundt, C. A. (2007). *The young athlete*. In Armstrong, N. (Hrsg.), *Paediatric Exercise Physiology* (299-324). Elsevier: Churchill Livingstone.
23. Baxter-Jones, A. D. G. und Sherar, L. B. (2007). *Growth and maturation*. In Armstrong, N. (Hrsg.), *Paediatric Exercise Physiology* (1-26). Elsevier: Churchill, Livingston.

24. Beckham, S. G. & Earnest, C. P. (2000). *Metabolic cost of free weight circuit weight training*. J.Sports Med Phys.Fitness 40 (2), 118-125.
25. Behm, D. G., Faigenbaum, A. D., Falk, B. & Klentrou, P. (2008). *Canadian Society for Exercise Physiology position paper: resistance training in children and adolescents*. Applied Physiology, Nutrition and Metabolism 33, 547-561.
26. Behringer, M., vom Heede, A. & Mester, J. (2010). *Krafttraining im Nachwuchsleistungssport unter besonderer Berücksichtigung von Diagnostik, Trainierbarkeit und Trainingsmethodik - Wissenschaftliche Expertise des BISP*. Köln:Sportverlag Strauß.
27. Behringer, M., Vom, H. A., Matthews, M. & Mester, J. (2011). *Effects of strength training on motor performance skills in children and adolescents: a meta-analysis*. Pediatr Exerc Sci 23 (2), 186-206.
28. Behringer, M., Vom, H. A., Yue, Z. & Mester, J. (2010). *Effects of resistance training in children and adolescents: a meta-analysis*. Pediatrics 126 (5), e1199-e1210.
29. Bell, R. D., MacDougall, J. D., Billeter, R. & Howald, H. (1980). *Muscle-Fiber Types and Morphometric Analysis of Skeletal-Muscle in 6-Year-Old Children*. Medicine and Science in Sports and Exercise 12 (1), 28-31.
30. Bemben, M. G., Sato, Y. & Abe, T. (2005). *The use of anthropometry for assessing muscle size*. International Journal of Kaatsu Training Research 1, 33-36.
31. Beunen, G., Thomis, M., Peeters, M., Maes, H. H., Claessens, A. L. & Vlietinck, R. (2003). *Genetics of strength and power characteristics in children and adolescents*. Pediatric Exercise Science 15 (2), 128-138.
32. Bhasin, S., Storer, T. W., Berman, N., Yarasheski, K. E., Clevenger, B., Phillips, J., Lee, W. P., Bunnell, T. J. & Casaburi, R. (1997). *Testosterone replacement increases fat-free mass and muscle size in hypogonadal men*. J.Clin.Endocrinol.Metab 82 (2), 407-413.
33. Bhasin, S., Taylor, W. E., Singh, R., Artaza, J., Sinha-Hikim, I., Jasuja, R., Choi, H. & Gonzalez-Cadavid, N. F. (2003). *The mechanisms of androgen effects on body composition: mesenchymal pluripotent cell as the target of androgen action*. J.Gerontol.A Biol.Sci Med Sci 58 (12), M1103-M1110.
34. Binkovitz, L. A. & Henwood, M. J. (2007). *Pediatric DXA: technique and interpretation*. Pediatr Radiol. 37 (1), 21-31.
35. Binzoni, T., Bianchi, S., Hanquinet, S., Kaelin, A., Sayegh, Y., Dumont, M. & Jequier, S. (2001). *Human gastrocnemius medialis pennation angle as a function of age: from newborn to the elderly*. J.Physiol Anthropol.Appl.Human Sci 20 (5), 293-298.

36. Blake, G. M., Naeem, M. & Boutros, M. (2006). *Comparison of effective dose to children and adults from dual X-ray absorptiometry examinations*. Bone 38 (6), 935-942.
37. Blanksby, B. & Gregor, J. (1981). *Anthropometric, strength and physiological changes in male and female swimmers with progressive resistance training*. The Australian Journal of Sport Sciences 1 (1), 3-6.
38. Blimkie, C. J. (1993). *Resistance training during preadolescence. Issues and controversies*. Sports Medicine 15 (6), 389-407.
39. Blimkie, C. J., Ramsay, J. A., Sale, D. und Macdougall, D. (1989). Effects of 10 Weeks of resistance training on strength development in prepubertal boys. In Children and exercise XIII (183-197). Human Kinetics: Champaign.
40. Blimkie, C. J., Ramsay, J. A., Sale, D. & Macdougall, D. (1989). *The effects of detraining and maintenance weight training on strength development in prepubertal boys*. Canadian Journal of Sports Sciences 14, 102P-102P.
41. Blimkie, C. J. und Sale, D. G. (1998). Strength Development and Trainability During Childhood. In Van Praagh, E. (Hrsg.), Pediatric Anaerobic Performance (193-224). Human Kinetics: Champaign.
42. Blimkie, C. J. R., Ebbesen, B., Macdougall, D., Baror, O. & Sale, D. (1989). *Voluntary and Electrically Evoked Strength Characteristics of Obese and Nonobese Preadolescent Boys*. Human Biology 61 (4), 515-532.
43. Blimkie, C. J. R., Rice, S., Webber, C. E., Martin, J., Levy, D. & Gordon, C. L. (1996). *Effects of resistance training on bone mineral content and density in adolescent females*. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology 74 (9), 1025-1033.
44. Bocelli, A. & Ballo, P. (2008). *Hypertension in children and adolescents*. Canadian Medical Association Journal 179 (4), 343-344.
45. Bojesen, A., Kristensen, K., Birkebaek, N. H., Fedder, J., Mosekilde, L., Bennett, P., Laurberg, P., Frystyk, J., Flyvbjerg, A., Christiansen, J. S. & Gravholt, C. H. (2006). *The metabolic syndrome is frequent in Klinefelter's syndrome and is associated with abdominal obesity and hypogonadism*. Diabetes Care 29 (7), 1591-1598.
46. Bouchant, A., Martin, V., Maffiuletti, N. A. & Ratel, S. (2011). *Can muscle size fully account for strength differences between children and adults?* J.Appl.Physiol
47. Brown, M. E., Mayhew, J. L. & Boleach, L. W. (1986). *Effect of Plyometric Training on Vertical Jump Performance in High-School Basketball Players*. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness 26 (1), 1-4.

48. Budgett, R. (1998). *Fatigue and underperformance in athletes: the overtraining syndrome*. British Journal of Sports Medicine 32 (2), 107-110.
49. Bunc, V. (2001). Prediction Equations for the Determination of Body Composition in Children Using Bioimpedance Analysis. In Jürimäe, T. et al. (Hrsg.), *Body Composition Assessment in Children and Adolescents* (46-52). Karger: Basel.
50. Butte, N. F., Hopkinson, J. M., Wong, W. W., Smith, E. O. & Ellis, K. J. (2000). *Body composition during the first 2 years of life: An updated reference*. Pediatric Research 47 (5), 578-585.
51. Cahill, B. R. & Griffith, E. H. (1978). *Effect of preseason conditioning on the incidence and severity of high school football knee injuries*. The American journal of sports medicine 6, 180-184.
52. Caine, D., DiFiori, J. & Maffulli, N. (2006). *Physical injuries in children's and youth sports: reasons for concern?* British Journal of Sports Medicine 40 (9), 749-760.
53. Casazza, K., Hanks, L. J. & Alvarez, J. A. (2010). *Role of various cytokines and growth factors in pubertal development*. Med Sport Sci 55, 14-31.
54. Castro, M. J., McCann, D. J., Shaffrath, J. D. & Adams, W. C. (1995). *Peak torque per unit cross-sectional area differs between strength-trained and untrained young adults*. Med Sci Sports Exerc 27 (3), 397-403.
55. Chan, N. P. T., Sung, R. Y. T., Kong, A. P. S., Goggins, W. B., So, H. K. & Nelson, E. A. S. (2008). *Reliability of pubertal self-assessment in Hong Kong Chinese children*. Journal of Paediatrics and Child Health 44 (6), 353-358.
56. Chesley, A., MacDougall, J. D., Tarnopolsky, M. A., Atkinson, S. A. & Smith, K. (1992). *Changes in Human Muscle Protein-Synthesis After Resistance Exercise*. Journal of Applied Physiology 73 (4), 1383-1388.
57. Chilibeck, P. D., Syrotuik, D. G. & Bell, G. J. (1999). *The effect of strength training on estimates of mitochondrial density and distribution throughout muscle fibres*. European Journal of Applied Physiology 80 (6), 604-609.
58. Christoforidis, A., Maniadaki, I. & Stanhope, R. (2005). *Growth hormone / insulin-like growth factor-1 axis during puberty*. Pediatr Endocrinol.Rev. 3 (1), 5-10.
59. Christou, M., Smilios, I., Sotiropoulos, K., Volaklis, K., Piliandis, T. & Tokmakidis, S. P. (2006). *Effects of resistance training on the physical capacities of adolescent soccer players*. Journal of Strength and Conditioning Research 20 (4), 783-791.

-
60. Clamann, H. P. (1970). *Activity of Single Motor Units During Isometric Tension*. *Neurology* 20 (3), 254-&.
 61. Clarys, J. P., Martin, A. D. & Drinkwater, D. T. (1984). *Gross tissue weights in the human body by cadaver dissection*. *Human Biology* 56 (3), 459-473.
 62. Clement, K., Viguerie, N., Diehn, M., Alizadeh, A., Barbe, P., Thalamas, C., Storey, J. D., Brown, P. O., Barsh, G. S. & Langin, D. (2002). *In vivo regulation of human skeletal muscle gene expression by thyroid hormone*. *Genome Research* 12 (2), 281-291.
 63. Conlisk, E. A., Haas, J. D., Martinez, E. J., Flores, R., Rivera, J. D. & Martorell, R. (1992). *Predicting body composition from anthropometry and bioimpedance in marginally undernourished adolescents and young adults*. *American Journal of Clinical Nutrition* 55 (6), 1051-1060.
 64. Cordain, L., Whicker, R. E. & Johnson, J. E. (1988). *Body composition determination in children using bioelectrical impedance*. *Growth Dev.Aging* 52 (1), 37-40.
 65. Costill, D. L., Coyle, E. F., Fink, W. F., Lesmes, G. R. & Witzmann, F. A. (1979). *Adaptations in Skeletal-Muscle Following Strength Training*. *Journal of Applied Physiology* 46 (1), 96-99.
 66. Courant, F., Aksglaede, L., Antignac, J. P., Monteau, F., Sorensen, K., Andersson, A. M., Skakkebaek, N. E., Juul, A. & Bizec, B. L. (2010). *Assessment of circulating sex steroid levels in prepubertal and pubertal boys and girls by a novel ultrasensitive gas chromatography-tandem mass spectrometry method*. *J.Clin.Endocrinol.Metab* 95 (1), 82-92.
 67. Courteix, D., Lespessailles, E., Peres, S. L., Obert, P., Germain, P. & Benhamou, C. L. (1998). *Effect of physical training on bone mineral density in prepubertal girls: A comparative study between impact-loading and non-impact-loading sports*. *Osteoporosis International* 8 (2), 152-158.
 68. Cruz Martinez, A. & Lopez Terradas, J. M. (1990). *Conduction velocity along muscle fibers in situ in healthy infants*. *Electromyography and Clinical Neurophysiology* 30 (7), 443-448.
 69. Cruz, M. L., Weigensberg, M. J., Huang, T. T. K., Ball, G., Shaibi, G. Q. & Goran, M. I. (2004). *The metabolic syndrome in overweight Hispanic youth and the role of insulin sensitivity*. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 89 (1), 108-113.
 70. da Fontoura, A. S., Schneider, P. & Meyer, F. (2004). *Effect of the muscular strength detraining in prepubertal boys*. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte* 10 (4), 285-288.
 71. Dalton, S. E. (1992). *Overuse Injuries in Adolescent Athletes*. *Sports Medicine* 13 (1), 58-70.

-
72. Damon, B. M., Ding, Z. H., Anderson, A. W., Freyer, A. S. & Gore, J. C. (2002). *Validation of diffusion tensor MRI-based muscle fiber tracking*. *Magnetic Resonance in Medicine* 48 (1), 97-104.
 73. Davies, C. T., White, M. J. & Young, K. (1983). *Muscle function in children*. *Eur.J.Appl.Physiol Occup.Physiol* 52 (1), 111-114.
 74. Davies, C. T. M. (1985). *Strength and mechanical properties of muscle in children and young adults*. *Scandinavian Journal of Sport Sciences* (7), 11-15.
 75. De Ste Croix, M. B. A. (2007). *Advances in paediatric strength assessment: changing our perspective on strength development*. *Journal of Sports Science and Medicine* 6 (3), 292-304.
 76. De Ste Croix, M. B. A. (2007). *Muscle strength*. In Armstrong, N. (Hrsg.), *Paediatric Exercise Physiology* (47-69). Elsevier: Churchill, Livingstone, Philadelphia.
 77. De Ste Croix, M. B. A., Armstrong, N., Welsman, J. R. & Sharp, P. (2002). *Longitudinal changes in isokinetic leg strength in 10-14-year-olds*. *Annals of Human Biology* 29 (1), 50-62.
 78. Deighan, M., Ste Croix, M., Grant, C. & Armstrong, N. (2006). *Measurement of maximal muscle cross-sectional area of the elbow extensors and flexors in children, teenagers and adults*. *Journal of Sports Sciences* 24 (5), 543-546.
 79. Demura, S., Sato, S. & Kitabayashi, T. (2004). *Percentage of total body fat as estimated by three automatic bioelectrical impedance analyzers*. *J.Physiol Anthropol.Appl.Human Sci* 23 (3), 93-99.
 80. DeRenne, C., Hetzler, R. K., Buxton, B. P. & Ho, K. W. (1996). *Effects of Training Frequency on Strength Maintenance in Pubescent Baseball Players*. *Journal of Strength and Conditioning Research* 10 (1), 8-14.
 81. Deschenes, M. R., Judelson, D. A., Kraemer, W. J., Meskaitis, V. J., Volek, J. S., Nindl, B. C., Harman, F. S. & Deaver, D. R. (2000). *Effects of resistance training on neuromuscular junction morphology*. *Muscle & Nerve* 23 (10), 1576-1581.
 82. Deurenberg, P., Kusters, C. S. L. & Smit, H. E. (1990). *Assessment of Body-Composition by Bioelectrical Impedance in Children and Young-Adults Is Strongly Age-Dependent*. *European Journal of Clinical Nutrition* 44 (4), 261-268.
 83. Deurenberg, P., van der Kooy, K., Paling, A. & Withagen, P. (1989). *Assessment of body composition in 8-11 year old children by bioelectrical impedance*. *European Journal of Clinical Nutrition* 43 (9), 623-629.

84. Deurenberg, P., Vanderkooij, K., Evers, P. & Hulshof, T. (1990). *Assessment of Body-Composition by Bioelectrical Impedance in A Population Aged Greater-Than-60-y*. American Journal of Clinical Nutrition 51 (1), 3-6.
85. Deurenberg, P., Vanderkooy, K., Leenen, R., Weststrate, J. A. & Seidell, J. C. (1991). *Sex and Age Specific Prediction Formulas for Estimating Body-Composition from Bioelectrical Impedance - A Cross-Validation Study*. International Journal of Obesity 15 (1), 17-25.
86. Deurenberg, P., Westerterp, K. R. & Velthuis-Te Wierik, E. J. (1994). *Between-laboratory comparison of densitometry and bio-electrical impedance measurements*. British Journal of Nutrition 71 (3), 309-316.
87. Deutscher Olympischer Sportbund Bereich Leistungssport (2006). *Nachwuchsleistungssport-Konzept 2012*. Zugriff am 28.7.2008 unter Internet.
88. Dey, D. K., Bosaeus, I., Lissner, L. & Steen, B. (2003). *Body composition estimated by bioelectrical impedance in the Swedish elderly. Development of population-based prediction equation and reference values of fat-free mass and body fat for 70-and 75-y olds*. European Journal of Clinical Nutrition 57 (8), 909-916.
89. Diallo, O., Dore, E., Duche, P. & Van Praagh, E. (2001). *Effects of plyometric training followed by a reduced training programme on physical performance in prepubescent soccer players*. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness 41 (3), 342-348.
90. Diekmann, W. & Letzelter, M. (1987). *Stabilität und Wiederholbarkeit von Trainingszuwachs durch Schnellkrafttraining im Grundschulalter (Stability and reproducibility of strength training induced improvements during elementary school age)*. Sportwissenschaft 17 (3), 280-293.
91. Docherty, D., Wenger, H. A. & Collis, M. L. (1987). *The effects of resistance training on aerobic and anaerobic power of young boys*. Medicine and Science in Sports and Exercise 19 (4), 389-392.
92. Dodd, K. J., Taylor, N. F. & Graham, H. K. (2003). *A randomized clinical trial of strength training in young people with cerebral palsy*. Developmental Medicine and Child Neurology 45 (10), 652-657.
93. Doupe, M. B., Martin, A. D., Searle, M. S., Kriellaars, D. J. & Giesbrecht, G. G. (1997). *A new formula for population-based estimation of whole body muscle mass in males*. Can.J.Appl.Physiol 22 (6), 598-608.
94. Duarte, J. A., Magalhaes, J. F., Monteiro, L., Almeida-Dias, A., Soares, J. M. C. & Appell, H. J. (1999). *Exercise-induced signs of muscle overuse in children*. International Journal of Sports Medicine 20 (2), 103-108.

-
95. Dubois, E. (1897). *Sur le rapport de l'encéphale avec la grandeur du corps chez les Mammifères*. Bull.Soc.anthropl.Paris 8 (4), 337-374.
 96. Duchateau, J., Semmler, J. G. & Enoka, R. M. (2006). *Training adaptations in the behavior of human motor units*. J.Appl.Physiol 101 (6), 1766-1775.
 97. EBSCO Publishing (2011). SPORTDiscus.
<http://web.ebscohost.com/ehost/selectdb?hid=11&sid=723b8b28-d541-477d-9970-00efe513acc4%40sessionmgr12&vid=1>.
 98. Edman, K. A., Reggiani, C. & te, K. G. (1985). *Differences in maximum velocity of shortening along single muscle fibres of the frog*. J.Physiol 365, 147-163.
 99. Education Resources Information Center (ERIC) (2010). About the ERIC Collection.
http://www.eric.ed.gov/ERICWebPortal/resources/html/collection/about_collection.html.
 100. Eisenmann, J. C., Heelan, K. A. & Welk, G. J. (2004). *Assessing body composition among 3- to 8-year-old children: anthropometry, BIA, and DXA*. Obesity Research 12 (10), 1633-1640.
 101. Eliakim, A., Brasel, J. A., Mohan, S., Barstow, T. J., Berman, N. & Cooper, D. M. (1996). *Physical fitness, endurance training, and the growth hormone insulin-like growth factor I system in adolescent females*. Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism 81 (11), 3986-3992.
 102. Eliakim, A., Scheett, T. P., Newcomb, R., Mohan, S. & Cooper, D. M. (2001). *Fitness, training, and the growth hormone -> insulin-like growth factor I axis in prepubertal girls*. Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism 86 (6), 2797-2802.
 103. Ellis, K. J. (1996). *Measuring body fatness in children and young adults: comparison of bioelectric impedance analysis, total body electrical conductivity, and dual-energy X-ray absorptiometry*. Int.J.Obes.Relat Metab Disord. 20 (9), 866-873.
 104. Elmlinger, M. W., Kuhnel, W., Wormstall, H. & Doller, P. C. (2005). *Reference intervals for testosterone, androstenedione and SHBG levels in healthy females and males from birth until old age*. Clin.Lab 51 (11-12), 625-632.
 105. Engstrom, L. M. & Fischbein, S. (1977). *Physical Capacity in Twins*. Acta Geneticae Medicae et Gemellologiae 26 (2), 159-165.
 106. Eriksson, B. O., Gollnick, P. D. & Saltin, B. (1973). *Muscle Metabolism and Enzyme-Activities After Training in Boys 11-13 Years Old*. Acta Physiologica Scandinavica 87 (4), 485-497.

-
107. European Medicines Agency (2002). Guideline for Good Clinical Practice. Zugriff am 23.1.2008 unter <http://www.emea.europa.eu/pdfs/human/ich/013595en.pdf>.
 108. Ewart, C. K., Young, D. R. & Hagberg, J. M. (1998). *Effects of school-based aerobic exercise on blood pressure in adolescent girls at risk for hypertension*. American Journal of Public Health 88 (6), 949-951.
 109. Faigenbaum, A., Zaichkowsky, L. D., Westcott, W. & Micheli, L. (1995). *Psychological Effects of Strength Training on Children*. Journal of Sport Behavior 20 (2), 164-174.
 110. Faigenbaum, A. D., Kraemer, W. J., Cahill, B. R., Chandler, J., Dziados, J., Efrink, E., Forman, A., Gaudiose, M., Micheli, L., Nitka, M. & Roberts, S. (1996). *Youth resistance training: Position statement paper and literature review*. Strength and Conditioning 18 (6), 62-75.
 111. Faigenbaum, A. D., McFarland, J. E., Johnson, L., Kang, J., Bloom, J., Ratamess, N. A. & Hoffman, J. R. (2007). *Preliminary evaluation of an after-school resistance training program for improving physical fitness in middle school-age boys*. Perceptual and Motor Skills 104 (2), 407-415.
 112. Faigenbaum, A. D., McFarland, J. E., Keiper, F. B., Tevlin, W., Ratamess, N. A., Kang, J. & Hoffman, J. R. (2007). *Effects of a short-term plyometric and resistance training program on fitness performance in boys age 12 to 15 years*. Journal of Sports Science and Medicine 6 (4), 519-525.
 113. Faigenbaum, A. D. & Mediate, P. (2006). *Effects of medicine ball training on fitness performance of high-school physical education students*. Physical Educator 63 (3), 160-167.
 114. Faigenbaum, A. D., Milliken, L., Moulton, L. & Westcott, W. L. (2005). *Early muscular fitness adaptations in children in response to two different resistance training regimens*. Pediatric Exercise Science 17 (3), 237-248.
 115. Faigenbaum, A. D., Milliken, L. A., Loud, R. L., Burak, B. T., Doherty, C. L. & Westcott, W. L. (2002). *Comparison of 1 and 2 days per week of strength training in children*. Research Quarterly for Exercise and Sport 73 (4), 416-424.
 116. Faigenbaum, A. D. & Schram, J. (2004). *Can resistance training reduce injuries in youth sports?* Strength and Conditioning Journal 26 (3), 16-21.
 117. Faigenbaum, A. D., Westcott, W. L., Loud, R. L. & Long, C. (1999). *The effects of different resistance training protocols on muscular strength and endurance development in children*. Pediatrics 104 (1)
 118. Faigenbaum, A. D., Westcott, W. L. & Micheli, L. (1996). *The effects of strength training and detraining on children*. Journal of Strength and Conditioning Research 10 (2), 109-114.

-
119. Faigenbaum, A. D., Zaichkowsky, L. D., Westcott, W. L., Micheli, L. & Fernandez-Garcia, J. M. (1993). *The effects of twice-a-week strength training program on children*. *Pediatric Exercise Science* (5), 339-346.
 120. Faigenbaum, A. D. (2007). *State of the Art Reviews: Resistance Training for Children and Adolescents: Are There Health Outcomes?* *American Journal of Lifestyle Medicine* 1 (3), 190-200.
 121. Falk, B. & Dotan, R. (2006). *Child-adult differences in the recovery from high-intensity exercise*. *Exercise and Sport Sciences Reviews* 34 (3), 107-112.
 122. Falk, B. & Eliakim, A. (2003). *Resistance training, skeletal muscle and growth*. *Pediatr.Endocrinol.Rev.* 1 (2), 120-127.
 123. Falk, B. & Mor, G. (1996). *The effects of resistance and martial arts training in 6 to 8 year old boys*. *Pediatric Exercise Science* (8), 48-56.
 124. Falk, B. & Tenenbaum, G. (1996). *The effectiveness of resistance training in children. A meta-analysis*. *Sports Medicine* 22 (3), 176-186.
 125. Falk, B., Usselman, C., Dotan, R., Brunton, L., Klentrou, P., Shaw, J. & Gabriel, D. (2009). *Child-adult differences in muscle strength and activation pattern during isometric elbow flexion and extension*. *Appl.Physiol Nutr.Metab* 34 (4), 609-615.
 126. Fargo, K. N., Galbiati, M., Foecking, E. M., Poletti, A. & Jones, K. J. (2008). *Androgen regulation of axon growth and neurite extension in motoneurons*. *Hormones and Behavior* 53 (5), 716-728.
 127. Fietzek, U. M., Heinen, F., Berweck, S., Maute, S., Hufschmidt, A., Schulte-Monting, J., Lucking, C. H. & Korinthenberg, R. (2000). *Development of the corticospinal system and hand motor function: central conduction times and motor performance tests*. *Dev.Med Child Neurol.* 42 (4), 220-227.
 128. Flanagan, S. P., Laubach, L. L., De Marco, G. M., Alvarez, C., Borchers, S., Dressman, E., Gorka, C., Lauer, M., McKelvy, A., Metzler, M., Poepelman, J., Redmond, C., Riggerbach, M., Tichar, S., Wallis, K. & Weseli, D. (2002). *Effects of two different strength training modes on motor performance in children*. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 73 (3), 340-344.
 129. Fleck, S. J. & Kraemer, W. J. (2004). *Designing Resistance Training Programs*. Champaign:Human Kinetics.
 130. Florini, J. R. (1987). *Hormonal control of muscle growth*. *Muscle and Nerve* 10 (7), 577-598.

-
131. Florini, J. R., Ewton, D. Z. & Coolican, S. A. (1996). *Growth hormone and the insulin-like growth factor system in myogenesis*. Endocrine Reviews 17 (5), 481-517.
 132. Fomon, S. J., Haschke, F., Ziegler, E. E. & Nelson, S. E. (1982). *Body composition of reference children from birth to age 10 years*. American Journal of Clinical Nutrition 35 (5 Suppl), 1169-1175.
 133. Fomon, S. J. & Nelson, S. E. (2002). *Body composition of the male and female reference infants*. Annual Review of Nutrition 22, 1-17.
 134. FORBES, R. M., COOPER, A. R. & MITCHELL, H. H. (1953). *The composition of the adult human body as determined by chemical analysis*. Journal of Biological Chemistry 203 (1), 359-366.
 135. Freiwald, J. (2005). *Krafttraining mit Kindern und Jugendlichen*. Sportorthopädie Sporttraumatologie, 269-275.
 136. Fripp, R. R. & Hodgson, J. L. (1987). *Effect of Resistive Training on Plasma-Lipid and Lipoprotein Levels in Male-Adolescents*. Journal of Pediatrics 111 (6), 926-931.
 137. Froberg, K. und Lammert, O. (1996). Development of muscle strength during childhood. In Bar-Or, O. (Hrsg.), *The Child and Adolescent Athlete (25-41)*. Blackwell Scientific Publications LTD: Malden, Oxford, Victoria.
 138. Frost, G., Dowling, J., Dyson, K. & Bar-Or, O. (1997). *Cocontraction in three age groups of children during treadmill locomotion*. Journal of Electromyography and Kinesiology 7 (3), 179-186.
 139. Fukunaga, T. (1976). *Die absolute Muskelkraft und das Krafttraining*. Sportarzt + Sportmedizin 27, 255-266.
 140. Fukunaga, T., Funato, K. & Ikegawa, S. (1992). *The effects of resistance training on muscle area and strength in prepubescent age*. The Annals of Physiological Anthropology 11 (3), 357-364.
 141. Fuller, M. F. & Chen, C. H. (1997). *Nutrient intake and protein metabolism: responses to feeding*. Zeitschrift für Ernährungswissenschaft 36 (4), 332-335.
 142. Fuller, N. J., Jebb, S. A., Laskey, M. A., Coward, W. A. & Elia, M. (1992). *Four-component model for the assessment of body composition in humans: comparison with alternative methods, and evaluation of the density and hydration of fat-free mass*. Clin.Sci (Lond) 82 (6), 687-693.
 143. Funato, K., Fukunaga, T. und Asami, T. I. S. (1987). Strength training for prepubescent Boys and Girls. Proceedings of the Department of Sports Sciences University Tokyo, University of Tokyo, 21: 9-19.

-
144. Gan, E. H. & Quinton, R. (2010). *Physiological significance of the rhythmic secretion of hypothalamic and pituitary hormones*. Progress in Brain Research 181, 111-126.
 145. Garcia, A., Calleja, J., Antolin, F. M. & Berciana, J. (2000). *Peripheral motor and sensory nerve conduction studies in normal infants and children*. Clin.Neurophys. 111, 513-520.
 146. Garnett, S. P., Hogler, W., Blades, B., Baur, L. A., Peat, J., Lee, J. & Cowell, C. T. (2004). *Relation between hormones and body composition, including bone, in prepubertal children*. American Journal of Clinical Nutrition 80 (4), 966-972.
 147. Gassler, N., Peuschel, T. & Pankau, R. (2000). *Pediatric reference values of estradiol, testosterone, lutropin, follitropin and prolactin*. Clin.Lab 46 (11-12), 553-560.
 148. Gayon, J. (2000). *History of the concept of allometry*. American Zoologist 40 (5), 748-758.
 149. Gerdle, B., HenrikssonLarsen, K., Lorentzon, R. & Wretling, M. L. (1991). *Dependence of the Mean Power Frequency of the Electromyogram on Muscle Force and Fiber Type*. Acta Physiologica Scandinavica 142 (4), 457-465.
 150. Gidding, S. S. (2007). *Physical activity physical fitness and cardiovascular risk factors in childhood*. American Journal of Lifestyle Medicine 1 (6), 499-505.
 151. Golan, R., Falk, B., Hoffman, J. R., Hochberg, Z., Ben-Sira, D. und Barak, Y. (1998). Resistance Training for Children and Adolescents. In Chan, K.-M. et al. (Hrsg.), Sports and Children (265-270). Williams & Wilkins Asia-Pacific Ltd.: Hong Kong.
 152. Goldberg, A. L. & Goodman, H. M. (1969). *Relationship Between Growth Hormone and Muscular Work in Determining Muscle Size*. Journal of Physiology-London 200 (3), 655-&.
 153. Goldspink, G. (1970). *The proliferation of myofibrils during muscle fibre growth*. J.Cell Sci 6 (2), 593-603.
 154. Goran, M. I. (1995). *Variation in total energy expenditure in humans*. Obesity Research 3 Suppl 1, 59-66.
 155. Goran, M. I., Driscoll, P., Johnson, R., Nagy, T. R. & Hunter, G. (1996). *Cross-calibration of body-composition techniques against dual-energy X-ray absorptiometry in young children*. American Journal of Clinical Nutrition 63 (3), 299-305.

156. Goran, M. I. & Sun, M. (1998). *Total energy expenditure and physical activity in prepubertal children: recent advances based on the application of the doubly labeled water method*. American Journal of Clinical Nutrition 68 (4), 944S-949S.
157. Goreham, C., Green, H. J., Ball-Burnett, M. & Ranney, D. (1999). *High-resistance training and muscle metabolism during prolonged exercise*. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism 276 (3), E489-E496.
158. Goulding, A., Taylor, R. W., Gold, E. & LewisBarned, N. J. (1996). *Regional body fat distribution in relation to pubertal stage: A dual-energy X-ray absorptiometry study of New Zealand girls and young women*. American Journal of Clinical Nutrition 64 (4), 546-551.
159. Graves, J. E., Kanaley, J. A., Garzarella, L. und Pollock, M. L. (2006). Anthropometry and body Composition Measurement. In Maud, P. J. et al. (Hrsg.), *Physiological Assessment of Human Fitness* (185-226). Human Kinetics: Champaign.
160. Graystone, J. E. (1968). Creatinine excretion during growth. In Cheek, D. B. (Hrsg.), *Human growth: body composition cell growth, energy and intelligence* (182-197). Lea & Febiger: Philadelphia.
161. Green, D. J., Walsh, J. H., Maiorana, A., Best, M. J., Taylor, R. R. & O'Driscoll, J. G. (2003). *Exercise-induced improvement in endothelial dysfunction is not mediated by changes in CV risk factors: pooled analysis of diverse patient populations*. American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology 285 (6), H2679-H2687.
162. Green, H., Goreham, C., Ouyang, J., Ball-Burnett, M. & Ranney, D. (1999). *Regulation of fiber size, oxidative potential, and capillarization in human muscle by resistance exercise*. American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology 276 (2), R591-R596.
163. Greulich, W. W. & Pyle, S. I. (1959). *Radiographic Atlas of Skeletal Development of Hand and Wrist*. Stanford:Stanford University Press.
164. Grimby, G., BJORNTOR.P, Fahlen, M., Hoskins, T. A., Hook, O., Oxhoj, H. & Saltin, B. (1973). *Metabolic Effects of Isometric Training*. Scandinavian Journal of Clinical & Laboratory Investigation 31 (3), 301-305.
165. Grimston, S. K., Willows, N. D. & Hanley, D. A. (1993). *Mechanical Loading Regime and Its Relationship to Bone-Mineral Density in Children*. Medicine and Science in Sports and Exercise 25 (11), 1203-1210.
166. Gronlund, C., Ostlund, N., Roeleveld, K. & Karlsson, J. S. (2005). *Simultaneous estimation of muscle fibre conduction velocity and muscle fibre orientation using 2D multichannel surface electromyogram*. Medical & Biological Engineering & Computing 43 (1), 63-70.

-
167. Groothausen, J., Siemer, H., Kemper, H. C. G., Twisk, J. & Welten, D. C. (1997). *Influence of peak strain on lumbar bone mineral density: An analysis of 15-year physical activity in young males and females*. *Pediatric Exercise Science* 9 (2), 159-173.
168. Grosset, J. F., Mora, I., Lambertz, D. & Perot, C. (2008). *Voluntary activation of the triceps surae in prepubertal children*. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 18 (3), 455-465.
169. Gupta, D., Attanasio, A. & Raaf, S. (1975). *Plasma estrogen and androgen concentrations in children during adolescence*. *J.Clin.Endocrinol.Metab* 40 (4), 636-643.
170. Gutin, B., Barbeau, P., Owens, S., Lemmon, C. R., Bauman, M., Allison, J., Kang, H. S. & Litaker, M. S. (2002). *Effects of exercise intensity on cardiovascular fitness, total body composition, and visceral adiposity of obese adolescents*. *American Journal of Clinical Nutrition* 75 (5), 818-826.
171. Gutin, B., Litaker, M., Islam, S., Manos, T., Smith, C. & Treiber, F. (1996). *Body-composition measurement in 9-11-y-old children by dual-energy X-ray absorptiometry, skinfold-thickness measurements, and bioimpedance analysis*. *American Journal of Clinical Nutrition* 63 (3), 287-292.
172. Guy, J. A. & Micheli, L. J. (2001). *Strength training for children and adolescents*. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons* 9 (1), 29-36.
173. Haapala, I., Hirvonen, A., Niskanen, L., Uusitupa, M., Kroger, H., Alhava, E. & Nissinen, A. (2002). *Anthropometry, bioelectrical impedance and dual-energy X-ray absorptiometry in the assessment of body composition in elderly Finnish women*. *Clinical Physiology and Functional Imaging* 22 (6), 383-391.
174. Hagberg, J. M., Ehsani, A. A., Goldring, D., Hernandez, A., Sinacore, D. R. & Holloszy, J. O. (1984). *Effect of Weight Training on Blood-Pressure and Hemodynamics in Hypertensive Adolescents*. *Journal of Pediatrics* 104 (1), 147-151.
175. Halin, R., Germain, P., Bercier, S., Kapitaniak, B. & Buttelli, O. (2003). *Neuromuscular response of young boys versus men during sustained maximal contraction*. *Med Sci Sports Exerc* 35 (6), 1042-1048.
176. Hansen, H. S., Froberg, K., Hyldebrandt, N. & Nielsen, J. R. (1991). *A Controlled-Study of 8 Months of Physical-Training and Reduction of Blood-Pressure in Children - the Odense Schoolchild Study*. *British Medical Journal* 303 (6804), 682-685.
177. Haroun, D., Taylor, S. J., Viner, R. M., Hayward, R. S., Darch, T. S., Eaton, S., Cole, T. J. & Wells, J. C. (2010). *Validation of bioelectrical impedance*
-

- analysis in adolescents across different ethnic groups. Obesity (Silver.Spring) 18 (6), 1252-1259.*
178. Hassan, S. E. A. (1991). *Die Trainierbarkeit der Maximalkraft bei 7-13jährigen Kindern (The trainability of muscle strength in 7-13 year old children)*. Leistungssport (5), 17-24.
179. Hather, B. M., Tesch, P. A., Buchanan, P. & Dudley, G. A. (1991). *Influence of eccentric actions on skeletal muscle adaptations to resistance training*. Acta Physiologica Scandinavica (143), 177-185.
180. Haywood, M. H. & Getchell, N. (2009). *Life Span Motor Development*. Champaign: Human Kinetics.
181. Hebestreit, H., Ferrari, R., Meyer-Holz, J., Lawrenz, W. & Jüngst, B.-K. (2002). *Kinder- und Jugendsportmedizin*. Stuttgart: Thieme Verlag.
182. Hedges, L. V. & Olkin, I. (1985). *Statistical methods for meta analysis*. Orlando, FL: Academic Press.
183. Heidt, R. S., Sweeterman, L. M., Carlonas, R. L., Traub, J. A. & Tekulve, F. X. (2000). *Avoidance of soccer injuries with preseason conditioning*. The American journal of sports medicine 28 (5), 659-662.
184. Heitmann, B. L. (1990). *Prediction of Body-Water and Fat in Adult Danes from Measurement of Electrical-Impedance - A Validation-Study*. International Journal of Obesity 14 (9), 789-802.
185. Hejna, W., , Rosenberg, A., Buturusis, D. J. & Krieger, A. (1982). *The Prevention of sports injuries in high school students through strength training*. National Strength Coaches Association Journal 4 (1), 28-31.
186. Herbst, K. L. & Bhasin, S. (2004). *Testosterone action on skeletal muscle*. Curr.Opin.Clin.Nutr.Metab Care 7 (3), 271-277.
187. Herman-Giddens, M. E., Wang, L. & Koch, G. (2001). *Secondary sexual characteristics in boys - Estimates from the National Health and Nutrition Examination Survey III, 1988-1994*. Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine 155 (9), 1022-1028.
188. Hetherington, M. R. (1976). *Effect of Isometric Training on Elbow Flexion Force Torque of Grade-5 Boys*. Research Quarterly 47 (1), 41-47.
189. Hettinger, T. (1958). *Die Trainierbarkeit menschlicher Muskeln in Abhängigkeit vom Alter und Geschlecht*. Int.Z.angew.Physiol.einschl.Arbeitsphysiol. 17, 371-377.
190. Hettinger, T. (1978). *Training im Schulsport*. Sportwissenschaft 8, 205-221.

-
191. Hetzler, R. K., DeRenne, C., Burton, B. P., Ho, K. W., Chai, D. X. & Seichi, G. (1997). *Effects of 12 weeks of strength training on anaerobic power in prepubescent male athletes*. Journal of Strength and Conditioning Research 11 (3), 174-181.
 192. Hewett, T. E., Lindenfeld, T. N., Riccobene, J. V. & Noyes, F. R. (1999). *The effect of neuromuscular training on the incidence of knee injury in female athletes - A prospective study*. The American journal of sports medicine 27 (6), 699-706.
 193. Heyward, V. H. (1998). *Practical body composition assessment for children, adults, and older adults*. International Journal of Sport Nutrition 8 (3), 285-307.
 194. Hollmann, W. & Hettinger, T. (1976). *Sportmedizin - Arbeits- und Trainingsgrundlagen*. Stuttgart, New York:Schattauer.
 195. Hollmann, W. & Hettinger, T. (2000). *Sportmedizin - Arbeits- und Trainingsgrundlagen*. Stuttgart:Schattauer.
 196. Hollmann, W. & Strüder, H. K. (2009). *Sportmedizin - Grundlagen für körperliche Aktivität, Training und Präventivmedizin*. Stuttgart:Schattauer.
 197. Holloway, J., Beuter, A. & Duda, J. (1988). *Self-efficacy and training in adolescents*. J.Appl.Soc.Psychol 18, 699-719.
 198. Holm, I., Steen, H. & Olstad, M. (2005). *Isokinetic muscle performance in growing boys from pre-teen to maturity. An eleven-year longitudinal study*. Isokinetics and Exercise Science 13 (2), 153-158.
 199. Housh, D. J., Housh, T. J., Weir, J. P., Weir, L. L., Johnson, G. O. & Stout, J. R. (1995). *Anthropometric Estimation of Thigh Muscle Cross-Sectional Area*. Medicine and Science in Sports and Exercise 27 (5), 784-791.
 200. Houtkooper, L. B., Lohman, T. G., Going, S. B. & Hall, M. C. (1989). *Validity of bioelectric impedance for body composition assessment in children*. J.Appl.Physiol 66 (2), 814-821.
 201. Huelsemann, F., Flenker, U., Köhler, B., Schänzer, H. und Mester, J. (2008). *Retrospective analysis of metabolic activity by nitrogen isotope ratio analysis of the hair*.13: 642-
 202. Hulthen, L., Bengtsson, B. A., Sunnerhagen, K. S., Hallberg, L., Grimby, G. & Johannsson, G. (2001). *GH is needed for the maturation of muscle mass and strength in adolescents*. J.Clin.Endocrinol.Metab 86 (10), 4765-4770.
 203. Huxley, J. S. (1924). *Constant differential growth-ratios and their significance*. Nature 114, 895-896.

-
204. Ikai, M. & Fukunaga, T. (1968). *Calculation of muscle strength per unit cross-sectional area of human muscle by means of ultrasonic measurement*. *Int.Z.Angew.Physiol* 26 (1), 26-32.
205. Institut für Angewandte Trainingswissenschaft (IAT) (2010). Datenbank SPOWIS. <http://www.iat.uni-leipzig.de/service/datenbanken/spowis>.
206. Institut für Angewandte Trainingswissenschaft (IAT) (2010). Informationen zur Datenbank Sponet. <http://www.sponet.de/>.
207. Isaacs, L. D., Pohlman, R. & Craig, B. (1994). *Effects of Resistance Training on strength development in prepubescent females*. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 26, S210
208. Jaffrin, M. Y. & Morel, H. (2008). *Body fluid volumes measurements by impedance: A review of bioimpedance spectroscopy (BIS) and bioimpedance analysis (BIA) methods*. *Med Eng Phys*. 30 (10), 1257-1269.
209. Jakicic, J. M., Wing, R. R. & Lang, W. (1998). *Bioelectrical impedance analysis to assess body composition in obese adult women: The effect of ethnicity*. *International Journal of Obesity* 22 (3), 243-249.
210. James, R. (1982). *The Effect of Weight Training on the Self-Concept of Male Undergraduates*.
http://eric.ed.gov/ERICWebPortal/custom/portlets/recordDetails/detailmini.jsp?_nfpb=true&_ERICExtSearch_SearchValue_0=ED240435&ERICExtSearch_SearchType_0=no&accno=ED240435.
211. Jaric, S. (2002). *Muscle strength testing - Use of normalisation for body size*. *Sports Medicine* 32 (10), 615-631.
212. Jones, D. A. & Round, J. M. (2000). *Strength and Muscle growth*. Oxford:Oxford University Press.
213. Jones, D. A. und Round, J. M. (2008). *Muscle Development During Childhood and Adolescence*. In Hebestreit, H. et al. (Hrsg.), *The Young Athlete (18-26)*. Blackwell Publishing Ltd: Malden, Oxford, Victoria.
214. Jones, E. J., Bishop, P. A., Woods, A. K. & Green, J. M. (2008). *Cross-sectional area and muscular strength: a brief review*. *Sports Med* 38 (12), 987-994.
215. Kanbur-Oksuz, N., Derman, O. & Kinik, E. (2004). *Correlation of sex steroids with IGF-1 and IGFBP-3 during different pubertal stages*. *Turk.J.Pediatr* 46 (4), 315-321.
216. Kanehisa, H., Ikegawa, S. & Tsunoda, N. (1995). *Strength and cross-sectional area of knee extensor muscles in children*. *European Journal of Applied Physiology* 68, 402-405.
-

-
217. Kanehisa, H., Ikegawa, S., Tsunoda, N. & Fukunaga, T. (1994). *Strength and Cross-Sectional Area of Knee Extensor Muscles in Children*. European Journal of Applied Physiology 68 (5), 402-405.
218. Kanehisa, H., Yata, H., Ikegawa, S. & Fukunaga, T. (1995). *A cross-sectional study of the size and strength of the lower leg muscles during growth*. Eur.J.Appl.Physiol Occup.Physiol 72 (1-2), 150-156.
219. Kanosue, K., Yoshida, M., Akazawa, K. & Fujii, K. (1979). *Number of Active Motor Units and Their Firing Rates in Voluntary Contraction of Human Brachialis Muscle*. Japanese Journal of Physiology 29 (4), 427-443.
220. Kellis, E. (2003). *Antagonist moment of force during maximal knee extension in pubertal boys: effects of quadriceps fatigue*. European Journal of Applied Physiology 89 (3-4), 271-280.
221. Kellis, E. & Unnithan, V. B. (1999). *Co-activation of vastus lateralis and biceps femoris muscles in pubertal children and adults*. European Journal of Applied Physiology 79 (6), 504-511.
222. Kemper, H. C. G. und Verschuur, R. (1985). *Body build and composition*. In Kemper, H. C. G. (Hrsg.), *Growth, Health and Fitness of Teenagers* (88-95). Karger: Basel.
223. Kesidis, N., Metaxas, T. I., Vrabas, I. S., Stefanidis, P., Vamvakoudis, E., Christoulas, K., Mandroukas, A., Balasas, D. & Mandroukas, K. (2008). *Myosin heavy chain isoform distribution in single fibres of bodybuilders*. European Journal of Applied Physiology 103 (5), 579-583.
224. Kim, H., Barton, E., Muja, N., Yakar, S., Pennisi, P. & Leroith, D. (2005). *Intact insulin and insulin-like growth factor-I receptor signaling is required for growth hormone effects on skeletal muscle growth and function in vivo*. Endocrinology 146 (4), 1772-1779.
225. Kim, J., Shen, W., Gallagher, D., Jones, A., Jr., Wang, Z., Wang, J., Heshka, S. & Heymsfield, S. B. (2006). *Total-body skeletal muscle mass: estimation by dual-energy X-ray absorptiometry in children and adolescents*. American Journal of Clinical Nutrition 84 (5), 1014-1020.
226. Kim, J., Wang, Z., Heymsfield, S. B., Baumgartner, R. N. & Gallagher, D. (2002). *Total-body skeletal muscle mass: estimation by a new dual-energy X-ray absorptiometry method*. American Journal of Clinical Nutrition 76 (2), 378-383.
227. Kirsten, G. (1963). *Der Einfluss isometrischen Muskeltrainings auf die Entwicklung der Muskelkraft Jugendlicher*. Internationale Zeitschrift für Angewandte Physiologie Einschließlich Arbeitsphysiologie 19, 387-402.

-
228. Klitgaard, H., Zhou, M. & Richter, E. A. (1990). *Myosin Heavy-Chain Composition of Single Fibers from Musculus-Biceps-Brachii of Male Body-Builders*. Acta Physiologica Scandinavica 140 (2), 175-180.
229. Komi, P. V. & Karlsson, J. (1979). *Physical Performance, Skeletal-Muscle Enzyme-Activities, and Fiber Types in Monozygous and Dizygous Twins of Both Sexes*. Acta Physiologica Scandinavica, 5-&.
230. Komi, P. V., KLISSOUR.V & Karvinen, E. (1973). *Genetic-Variation in Neuromuscular Performance*. Internationale Zetischrift fur Angewandte Physiologie Einschliesslich Arbeitsphysiologie 31 (4), 289-304.
231. Komi, P. V. & Tesch, P. (1979). *Emg Frequency-Spectrum, Muscle Structure, and Fatigue During Dynamic Contractions in Man*. European Journal of Applied Physiology 42 (1), 41-50.
232. Komi, P. V., Viitasalo, J. T., Rauramaa, R. & Vihko, V. (1978). *Effect of Isometric Strength Training on Mechanical, Electrical, and Metabolic Aspects of Muscle Function*. European Journal of Applied Physiology 40 (1), 45-55.
233. Korsten-Reck, U. (2008). *Adipositas im Kindesalter: Therapeutische Optionen*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 59 (10), 223-227.
234. Kotzamanidis, C. (2006). *Effect of plyometric training on running performance and vertical jumping in prepubertal boys*. Journal of Strength and Conditioning Research 20 (2), 441-445.
235. Kraemer, W. J. & Fleck, S. J. (1993). *Strength training for young athletes*. Champaign:Human Kinetics.
236. Kraemer, W. J. & Fleck, S. J. (2005). *Strength training for young athletes*. Champaign:Human Kinetics.
237. Kreider, R., Fry, A. & O'Toole, M. (1998). *Overtraining in Sport*. Champaign:Human Kinetics.
238. Kriemler, S., Puder, J., Zahner, L., Roth, R., Braun-Fahrlander, C. & Bedogni, G. (2009). *Cross-validation of bioelectrical impedance analysis for the assessment of body composition in a representative sample of 6- to 13-year-old children*. European Journal of Clinical Nutrition 63 (5), 619-626.
239. Kubo, K., Kanehisa, H., Kawakami, Y. & Fukunaga, T. (2001). *Growth changes in the elastic properties of human tendon structures*. Int.J.Sports Med 22 (2), 138-143.
240. Kupa, E. J., Roy, S. H., Kandarian, S. C. & Deluca, C. J. (1995). *Effects of Muscle-Fiber Type and Size on Emg Median Frequency and Conduction-Velocity*. Journal of Applied Physiology 79 (1), 23-32.
-

-
241. Kurihara, T., Kanehisa, H., Abe, T., Tsunoda, N., Fukunaga, T. & Kawakami, Y. (2007). *Gastrocnemius muscle architecture and external tendon length in young boys*. Journal of Biomechanics 40, S690
242. Kyle, U. G., Bosaeus, I., De Lorenzo, A. D., Deurenberg, P., Elia, M., Gomez, J. M., Heitmann, B. L., Kent-Smith, L., Melchior, J. C., Pirlich, M., Scharfetter, H., Schols, A. M. & Pichard, C. (2004). *Bioelectrical impedance analysis--part I: review of principles and methods*. Clinical Nutrition 23 (5), 1226-1243.
243. Kyle, U. G., Genton, L., Karsegard, L., Slosman, D. O. & Pichard, C. (2001). *Single prediction equation for bioelectrical impedance analysis in adults aged 20-94 years*. Nutrition 17 (3), 248-253.
244. Lang, H. A., Puusa, A., Hynninen, P., Kuusela, V., Jantti, V. & Sillanpaa, M. (1985). *Evolution of nerve conduction velocity in later childhood and adolescence*. Muscle and Nerve 8 (1), 38-43.
245. Larsson, L. & Moss, R. L. (1993). *Maximum velocity of shortening in relation to myosin isoform composition in single fibres from human skeletal muscles*. J.Physiol 472, 595-614.
246. Lee, R. C., Wang, Z. M., Heo, M. S., Ross, R., Janssen, I. & Heymsfield, S. B. (2000). *Total-body skeletal muscle mass: development and cross-validation of anthropometric prediction models*. American Journal of Clinical Nutrition 72 (3), 796-803.
247. Lee, S. Y. & Gallagher, D. (2008). *Assessment methods in human body composition*. Curr.Opin.Clin.Nutr.Metab Care 11 (5), 566-572.
248. Legerlotz, K., Smith, H. K. & Hing, W. A. (2010). *Variation and reliability of ultrasonographic quantification of the architecture of the medial gastrocnemius muscle in young children*. Clin.Physiol Funct.Imaging 30 (3), 198-205.
249. Leone, M. & Comtois, A. S. (2007). *Validity and reliability of self-assessment of sexual maturity in elite adolescent athletes*. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness 47 (3), 361-365.
250. Lephart, S. M., Abt, J. P., Ferris, C. M., Sell, T. C., Nagai, T., Myers, J. B. & Irrgang, J. J. (2005). *Neuromuscular and biomechanical characteristic changes in high school athletes: a plyometric versus basic resistance program*. British Journal of Sports Medicine 39 (12), 932-938.
251. Letzelter, M. & Diekmann, W. (1984). *Zur Trainierbarkeit der Maximalkraft im Grundschulalter*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin (2), 62-69.
252. Lexell, J., Sjostrom, M. & Nordlund, A.-S. (1992). *Growth and development of human muscle: a quantitative morphological study of whole vastus lateralis from childhood to adult age*. Muscle & Nerve 15, 404-409.

-
253. Li, Y. L., Ji, C. Y., Lu, S. H., Suo, L. Y. & Chen, T. J. (2006). [Genetic study on somatotype of child and adolescent twins in Han nationality]. *Zhonghua Yu Fang Yi.Xue.Za Zhi.* 40 (6), 433-436.
254. Lieber, R. L. & Friden, J. (2000). *Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture.* *Muscle and Nerve* 23 (11), 1647-1666.
255. Lim, J. S., Hwang, J. S., Lee, J. A., Kim, D. H., Park, K. D., Jeong, J. S. & Cheon, G. J. (2009). *Cross-calibration of multi-frequency bioelectrical impedance analysis with eight-point tactile electrodes and dual-energy X-ray absorptiometry for assessment of body composition in healthy children aged 6-18 years.* *Pediatr Int.* 51 (2), 263-268.
256. Livshits, G., Kato, B. S., Wilson, S. G. & Spector, T. D. (2007). *Linkage of genes to total lean body mass in normal women.* *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 92 (8), 3171-3176.
257. Lohman, T. G. (1986). *Applicability of body composition techniques and constants for children and youths.* *Exerc Sport Sci Rev.* 14, 325-357.
258. Loomba-Albrecht, L. A. & Styne, D. M. (2009). *Effect of puberty on body composition.* *Curr.Opin.Endocrinol.Diabetes Obes.* 16 (1), 10-15.
259. Lopes, V., Monteiro, A., Barbosa, T. und Magalhaes, P. (2001). Strength Training effects on pre-pubertal boys. In Mester J. (Hrsg.), 6th Annual Congress of the ECSS Köln (1037-1037). ECSS: Cologne.
260. Lundberg, A., Eriksson, B. O. & Mellgren, G. (1979). *Metabolic Substrates, Muscle-Fiber Composition and Fiber Size in Late Walking and Normal Children.* *European Journal of Pediatrics* 130 (2), 79-92.
261. MacIntosh, B., Gardiner, P. F. & McComas, A. J. (2006). *Skeletal Muscle Form and Function.* Champaign:Human Kinetics.
262. Malavolti, M., Mussi, C., Poli, M., Fantuzzi, A. L., Salvioli, G., Battistini, N. & Bedogni, G. (2003). *Cross-calibration of eight-polar bioelectrical impedance analysis versus dual-energy X-ray absorptiometry for the assessment of total and appendicular body composition in healthy subjects aged 21-82 years.* *Annals of Human Biology* 30 (4), 380-391.
263. Malina, R. M. (2006). *Weight training in youth-growth, maturation, and safety: an evidence-based review.* *Clinical Journal of Sport Medicine* 16 (6), 478-487.
264. Malina, R. M. und Beunen, G. (2008). Growth and Maturation: Methods of Monitoring. In Hebestreit, H. et al. (Hrsg.), *The Young Athlet* (430-442). Blackwell Publishing: Malden, Oxford, Carlton.

-
265. Malina, R. M., Bouchard, C. & Bar-Or, O. (2004). *Growth, Maturation, and Physical Activity*. Champaign:Human Kinetics.
266. Malisoux, L., Francaux, M. & Theisen, D. (2007). *What do single-fiber studies tell us about exercise training?* *Med Sci Sports Exerc* 39 (7), 1051-1060.
267. Malmstrom, J. E. & Lindstrom, L. (1997). *Propagation velocity of muscle action potentials in the growing normal child*. *Muscle and Nerve* 20 (4), 403-410.
268. Martha, P. M., Jr., Rogol, A. D., Veldhuis, J. D., Kerrigan, J. R., Goodman, D. W. & Blizzard, R. M. (1989). *Alterations in the pulsatile properties of circulating growth hormone concentrations during puberty in boys*. *J.Clin.Endocrinol.Metab* 69 (3), 563-570.
269. Martin, A. D., Spent, L. F., Drinkwater, D. T. & Clarys, J. P. (1990). *Anthropometric estimation of muscle mass in men*. *Med Sci Sports Exerc* 22 (5), 729-733.
270. Martin, D. (1980). *Die Planung, Gestaltung, Steuerung des Trainings und das Kinder- und Jugendtraining*. Schorndorf:Hofmann.
271. Martin, D., Nicolaus, J., Ostrowski, C. & Rost, K. (1999). *Handbuch Kinder- und Jugendtraining*. Schorndorf:Verlag Karl Hofmann.
272. Maso, F., Lac, G., Michaux, O. & Robert, A. (2003). *The questionnaire of overtraining*. *Science & Sports* 18 (3), 169-171.
273. Matos, N. & Winsley, R. J. (2007). *Trainability of young athletes and overtraining*. *Journal of Sports Science and Medicine* 6 (3), 353-367.
274. Murras, N. (1995). *Estrogens do not affect whole-body protein metabolism in the prepubertal female*. *J.Clin.Endocrinol.Metab* 80 (10), 2842-2845.
275. McCall, G. E., Byrnes, W. C., Dickinson, A., Pattany, P. M. & Fleck, S. J. (1996). *Muscle fiber hypertrophy: Hyperplasia, and capillary density in college men after resistance training*. *Journal of Applied Physiology* 81 (5), 2004-2012.
276. Mcgill, H. C., McMahan, C. A., Herderick, E. E., Zieske, A. W., Malcom, G. T., Tracy, R. E. & Strong, J. P. (2002). *Obesity accelerates the progression of coronary atherosclerosis in young men*. *Circulation* 105 (23), 2712-2718.
277. Mcgill, H. C., McMahan, C. A., Zieske, A. W., Sloop, G. D., Walcott, J. V., Troxclair, D. A., Malcom, G. T., Tracy, R. E., Oalman, M. C. & Strong, J. P. (2000). *Associations of coronary heart disease risk factors with the intermediate lesion of atherosclerosis in youth*. *Arteriosclerosis Thrombosis and Vascular Biology* 20 (8), 1998-2004.
-

-
278. McMurray, R. G., Harrell, J. S., Bangdiwala, S. I., Bradley, C. B., Deng, S. B. & Levine, A. (2002). *A school-based intervention can reduce body fat and blood pressure in young adolescents*. Journal of Adolescent Health 31 (2), 125-132.
279. Meeusen, R., Duclos, M., Gleeson, M., Rietjens, G., Steinacker, J. & Urhausen, A. (2006). *Prevention, diagnosis and treatment of the Overtraining Syndrome - ECSS Position Statement 'Task Force'*. European Journal of Sport Science 6 (1), 1-14.
280. Meikle, A. W., Kushnir, M. M., Rockwood, A. L., Pattison, E. G., Terry, A. H., Sandrock, T., Bunker, A. M., Phanslkar, A. R., Owen, W. E. & Roberts, W. L. (2007). *Adrenal steroid concentrations in children seven to seventeen years of age*. J.Pediatr Endocrinol.Metab 20 (12), 1281-1291.
281. Mello Meirelles, C. & Gomes, P. S. C. (2004). *Acute effects of resistance exercise on energy expenditure: revisiting the impact of the training variables*. Revista Brasileira de Medicina do Esporte 10 (2), 131-137.
282. Menzi, C., Zahner, L. & Kriemler, S. (2007). *Krafttraining im Kindes- und Jugendalter*. Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie, 38-44.
283. Mero, A., Jaakkola, L. & Komi, P. V. (1990). *Serum Hormones and Physical Performance Capacity in Young Boy Athletes During A 1-Year Training Period*. European Journal of Applied Physiology 60 (1), 32-37.
284. Mero, A., Jaakkola, L. & Komi, P. V. (1991). *Relationships between muscle fibre characteristics and physical performance capacity in trained athletic boys*. J.Sports Sci 9 (2), 161-171.
285. Mersch, F. und Stoboy, H. (1989). *Strength Training and Muscle Hypertrophy in Children*. In Children and Exercise XIII (165-182). Human Kinetics: Champaign.
286. Mester, J. (2007). *Nationale und internationale Ergebnisse zu Belastbarkeit und Training im Kindes und Jugendalter*. In Sport ist Spitze. Landesprogramm Talentsuche und Talentförderung (85-102). Meyer & Meyer Verlag: Marl.
287. Metcalf, J. & Roberts, S. (1993). *Strength training and the immature athlete: an overview*. Pediatric Nursing 19 (4), 325-332.
288. Meyer, A. A., Kundt, G., Lenschow, U., Schuff-Werner, P. & Kienast, W. (2006). *Improvement of early vascular changes and cardiovascular risk factors in obese children after a six-month exercise program*. Journal of the American College of Cardiology 48 (9), 1865-1870.

-
289. Micheli, L. (1988). Strength training in the young athlete. In Brown, E. et al. (Hrsg.), *Competitive Sports for Children and Youth* (99-105). Human Kinetics: Champaign, IL.
290. Mitamura, R., Yano, K., Suzuki, N., Ito, Y., Makita, Y. & Okuno, A. (1999). *Diurnal rhythms of luteinizing hormone, follicle-stimulating hormone, and testosterone secretion before the onset of male puberty*. J.Clin.Endocrinol.Metab 84 (1), 29-37.
291. Mitamura, R., Yano, K., Suzuki, N., Ito, Y., Makita, Y. & Okuno, A. (2000). *Diurnal rhythms of luteinizing hormone, follicle-stimulating hormone, testosterone, and estradiol secretion before the onset of female puberty in short children*. J.Clin.Endocrinol.Metab 85 (3), 1074-1080.
292. Mitchell, C. S., Savage, D. B., Dufour, S., Schoenmakers, N., Murgatroyd, P., Befroy, D., Halsall, D., Northcott, S., Raymond-Barker, P., Curran, S., Henning, E., Keogh, J., Owen, P., Lazarus, J., Rothman, D. L., Farooqi, I. S., Shulman, G. I., Chatterjee, K. & Petersen, K. F. (2010). *Resistance to thyroid hormone is associated with raised energy expenditure, muscle mitochondrial uncoupling, and hyperphagia*. J.Clin.Invest 120 (4), 1345-1354.
293. MITCHELL, H. H., Hamilton, T. S., Steggerda, F. R. & Bean, H. W. (1945). *The Chemical Composition of the Adult Human Body and Its Bearing on the Biochemistry of Growth*. Journal of Biological Chemistry 158 (3), 625-637.
294. Mitsiopoulos, N., Baumgartner, R. N., Heymsfield, S. B., Lyons, W., Gallagher, D. & Ross, R. (1998). *Cadaver validation of skeletal muscle measurement by magnetic resonance imaging and computerized tomography*. J.Appl.Physiol 85 (1), 115-122.
295. Moglia, A., Zandrini, C., Rascaroli, M., Ciano, C., Bergonzoli, S. & Arrigo, A. (1989). *Peripheral nerve conduction velocity in normal infants and children*. Ital.J.Neurol.Sci 10 (3), 311-314.
296. Moher, D., Schulz, K. F. & Altman, D. G. (2001). *The CONSORT statement: revised recommendations for improving the quality of reports of parallel-group randomised trials*. Lancet 357 (9263), 1191-1194.
297. Moore, F. D., Lister, J., Boyden, C. M., Ball, M. R., Sullivan, N. & Dagher, F. J. (1968). *Skeleton As A Feature of Body Composition - Values Predicted by Isotope Dilution and Observed by Cadaver Dissection in An Adult Human Female*. Human Biology 40 (2), 135-&.
298. Mora, S., Goodman, W. G., Loro, M. L., Roe, T. F., Sayre, J. & Gilsanz, V. (1994). *Age-Related-Changes in Cortical and Cancellous Vertebral Bone-Density in Girls - Assessment with Quantitative Ct*. American Journal of Roentgenology 162 (2), 405-409.

-
299. Moritani, T. & Devries, H. A. (1979). *Neural Factors Versus Hypertrophy in the Time Course of Muscle Strength Gain*. American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation 58 (3), 115-130.
300. Morris, F. L., Naughton, G. A., Gibbs, J. L., Carlson, J. S. & Wark, J. D. (1997). *Prospective ten-month exercise intervention in premenarcheal girls: Positive effects on bone and lean mass*. Journal of Bone and Mineral Research 12 (9), 1453-1462.
301. Morse, C. I., Tolfrey, K., Thom, J. M., Vassilopoulos, V., Maganaris, C. N. & Narici, M. V. (2008). *Gastrocnemius muscle specific force in boys and men*. J.Appl.Physiol 104 (2), 469-474.
302. Morton, J. F., Brownlee, M. & McFadyen, A. K. (2005). *The effects of progressive resistance training for children with cerebral palsy*. Clinical Rehabilitation 19 (3), 283-289.
303. Mujika, I. & Padilla, S. (2001). *Muscular characteristics of detraining in humans*. Med Sci Sports Exerc 33 (8), 1297-1303.
304. Napolitano, A., Miller, S. R., Murgatroyd, P. R., Coward, W. A., Wright, A., Finer, N., De Bruin, T. W., Bullmore, E. T. & Nunez, D. J. (2008). *Validation of a quantitative magnetic resonance method for measuring human body composition*. Obesity (Silver.Spring) 16 (1), 191-198.
305. Nau, K. L., Katch, V. L., Beekman, R. H. & Dick, M. (1990). *Acute Intraarterial Blood Pressure Response to Bench Press Weight Lifting Children*. Pediatric Exercise Science (2), 37-45.
306. Naughton, G., Farpour-Lambert, N. J., Carlson, J., Bradney, M. & Van Praagh, E. (2000). *Physiological issues surrounding the performance of adolescent athletes*. Sports Medicine 30 (5), 309-325.
307. Neumann, C. G., Murphy, S. P., Gewa, C., Grillenberger, M. & Bwibo, N. O. (2007). *Meat supplementation improves growth, cognitive, and behavioral outcomes in Kenyan children*. Journal of Nutrition 137 (4), 1119-1123.
308. Nichols, D. L., Sanborn, C. F. & Love, A. M. (2001). *Resistance training and bone mineral density in adolescent females*. Journal of Pediatrics 139 (4), 494-500.
309. Noack, H. (1956). *Zur Frage der Schwankung der körperlichen Leistungsfähigkeit der Frau im Menstruationszyklus und der unterschiedlichen sportlichen Begabung*. Theorie und Praxis der Körperkultur 5, 885-894.
310. O'Brien, T. D., Reeves, N. D., Baltzopoulos, V., Jones, D. A. & Maganaris, C. N. (2009). *Moment arms of the knee extensor mechanism in children and adults*. Journal of Anatomy 215 (2), 198-205.
-

-
311. O'Brien, T. D., Reeves, N. D., Baltzopoulos, V., Jones, D. A. & Maganaris, C. N. (2010). *Muscle-tendon structure and dimensions in adults and children*. *Journal of Anatomy* 216 (5), 631-642.
312. Oertel, G. (1988). *Morphometric analysis of normal skeletal muscles in infancy, childhood and adolescence. An autopsy study*. *Journal of the Neurological Sciences* 88, 303-313.
313. Ounjian, M., Roy, R. R., Eldred, E., Garfinkel, A., Payne, J. R., Armstrong, A., Toga, A. W. & Edgerton, V. R. (1991). *Physiological and Developmental Implications of Motor Unit Anatomy*. *Journal of Neurobiology* 22 (5), 547-559.
314. Owens, S., Gutin, B., Allison, J., Riggs, S., Ferguson, M., Litaker, M. & Thompson, W. (1999). *Effect of physical training on total and visceral fat in obese children*. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 31 (1), 143-148.
315. Ozmun, J. C., Mikesky, A. E. & Surburg, P. R. (1994). *Neuromuscular Adaptations Following Prepubescent Strength Training*. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 26 (4), 510-514.
316. Paasuke, M., Ereline, J. & Gapeyeva, H. (2000). *Twitch contraction properties of plantar flexor muscles in pre- and post-pubertal boys and men*. *Eur.J.Appl.Physiol* 82 (5-6), 459-464.
317. Parker, D. F., Round, J. M., Sacco, P. & Jones, D. A. (1990). *A cross-sectional survey of upper and lower limb strength in boys and girls during childhood and adolescence*. *Annals of Human Biology* 17 (3), 199-211.
318. Patten, C., Kamen, G. & Rowland, D. M. (2001). *Adaptations in maximal motor unit discharge rate to strength training in young and older adults*. *Muscle and Nerve* 24 (4), 542-550.
319. Pearson, A. M. (1990). *Muscle growth and exercise*. *Crit Rev.Food Sci Nutr.* 29 (3), 167-196.
320. Peeters, M. W., Thomis, M. A., Claessens, A. L., Loos, R. J., Maes, H. H., Lysens, R., Vanden Eynde, B., Vlietinck, R. & Beunen, G. (2003). *Heritability of somatotype components from early adolescence into young adulthood: a multivariate analysis on a longitudinal twin study*. *Annals of Human Biology* 30 (4), 402-418.
321. Peeters, M. W., Thomis, M. A., Loos, R. J., Derom, C. A., Fagard, R., Claessens, A. L., Vlietinck, R. F. & Beunen, G. P. (2007). *Heritability of somatotype components: a multivariate analysis*. *Int.J.Obes.(Lond)* 31 (8), 1295-1301.

322. Perl, A. (2004). *Elektromyographische Untersuchung der Entladungsfrequenz hirnnervenversorgter Muskulatur mit der konzentrischen Standard-Nadel-Elektrode*. <[11] Journal>
323. Petajan, J. H. & Philip, B. A. (1969). *Frequency Control of Motor Unit Action Potentials*. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 27 (1), 66-&.
324. Pfeiffer, R. D. & Francis, R. S. (1986). *Effects of Strength Training on Muscle Development in Prepubescent, Pubescent, and Postpubescent Males*. *Physician and Sportsmedicine* 14 (9), 134-&.
325. Phillips, W. T. & Ziuraitis, J. R. (2003). *Energy cost of the ACSM single-set resistance training protocol*. *Journal of Strength and Conditioning Research* 17 (2), 350-355.
326. Picou, D., Reeds, P. J., Jackson, A. & Poulter, N. (1976). *The measurement of muscle mass in children using [15N]creatine*. *Pediatr Res.* 10 (3), 184-188.
327. Pikosky, M., Faigenbaum, A., Westcott, W. & Rodriguez, N. (2002). *Effects of resistance training on protein utilization in healthy children*. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 34 (5), 820-827.
328. Pludowski, P., Lebedowski, M. & Lorenc, R. S. (2004). *Evaluation of the possibility to assess bone age on the basis of DXA derived hand scans - preliminary results*. *Osteoporosis International* 15 (4), 317-322.
329. Poortmans, J. R., Boisseau, N., Moraine, J. J., Moreno-Reyes, R. & Goldman, S. (2005). *Estimation of total-body skeletal muscle mass in children and adolescents*. *Med Sci Sports Exerc* 37 (2), 316-322.
330. Pschyrembel, W. (2002). *Pschyrembel*. Gruyter.
331. Raglin, J. S. & Morgan, W. P. (1994). *Development of A Scale for Use in Monitoring Training-Induced Distress in Athletes*. *International Journal of Sports Medicine* 15 (2), 84-88.
332. Ramos, E., Frontera, W. R. & Llopart, A. (1998). *Muscle strength and hormonal levels in adolescents: gender related differences*. *International Journal of Sports Medicine* 19, 526-531.
333. Ramsay, J. A., Blimkie, C. J., Smith, K., Garner, S., MacDougall, J. D. & Sale, D. G. (1990). *Strength training effects in prepubescent boys*. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 22 (5), 605-614.
334. Reis, V. M., Machado, J. V., Fortes, M. S., Fernandes, P. R., Silva, A. J., Dantas, P. S. & Filho, J. F. (2007). *Evidence for higher heritability of*

- somatotype compared to body mass index in female twins. J. Physiol Anthropol.* 26 (1), 9-14.
335. Reuter, H. & Buskies, W. (2001). *Zu den Effekten eines sanften Krafttrainings bei Kindern und Jugendlichen (The effects of a gentle strength training program during childhood and adolescence).* Dt.Zt.f.Sportmedizin 52 (7-8), 27-27.
336. Rians, C. B., Weltman, A., Cahill, B. R., Janney, C. A., Tippet, S. R. & Katch, F. I. (1987). *Strength Training for Prepubescent Males - Is It Safe.* The American journal of sports medicine 15 (5), 483-489.
337. Rich, P. A., Villani, R., Fulton, A., Ashton, J., Bass, S., Brinkert, R. & Brown, P. (1992). *Serum Cortisol Concentration and Testosterone to Cortisol Ratio in Elite Prepubescent Male Gymnasts During Training.* European Journal of Applied Physiology 65 (5), 399-402.
338. Richmond, F. J. R., Singh, K. & Corneil, B. D. (1999). *Marked non-uniformity of fiber-type composition in the primate suboccipital muscle obliquus capitis inferior.* Experimental Brain Research 125 (1), 14-18.
339. Rogol, A. D. (2010). *Sex steroids, growth hormone, leptin and the pubertal growth spurt.* Endocr.Dev. 17, 77-85.
340. Rogol, A. D., Clark, P. A. & Roemmich, J. N. (2000). *Growth and pubertal development in children and adolescents: effects of diet and physical activity.* American Journal of Clinical Nutrition 72 (2 Suppl), 521S-528S.
341. Rohmert, W. (1968). *Rechts-Links-Vergleich bei isometrischem Armmuskeltraining mit verschiedenem Trainingsreiz bei achtjährigen Kindern.* Int.Z. angew. Physiol. Einschl. Arbeitsphysiologie (26), 363-393.
342. Röthig, P. (2003). *Sportwissenschaftliches Lexikon.* Schorndorf: Hofmann.
343. Roubenoff, R., Baumgartner, R. N., Harris, T. B., Dallal, G. E., Hannan, M. T., Economos, C. D., Stauber, P. M., Wilson, P. W. F. & Kiel, D. P. (1997). *Application of bioelectrical impedance analysis to elderly populations.* Journals of Gerontology Series A-Biological Sciences and Medical Sciences 52 (3), M129-M136.
344. Round, J. M., Jones, D. A., Honour, J. W. & Nevill, A. M. (1999). *Hormonal factors in the development of differences in strength between boys and girls during adolescence: a longitudinal study.* Annals of Human Biology 26 (1), 49-62.
345. Rowland, T. W. (2005). *Children's Exercise Physiology.* Champaign: Human Kinetics.

346. Roy, T. A., Blackman, M. R., Harman, S. M., Tobin, J. D., Schragar, M. & Metter, E. J. (2002). *Interrelationships of serum testosterone and free testosterone index with FFM and strength in aging men*. Am.J.Physiol Endocrinol.Metab 283 (2), E284-E294.
347. Rutherford, O. M. & Jones, D. A. (1992). *Measurement of Fiber Pennation Using Ultrasound in the Human Quadriceps Invivo*. European Journal of Applied Physiology 65 (5), 433-437.
348. Ryniewicz, B. (1975). [*Conduction velocity in peripheral nerves in healthy and sick children*]. Neurologia i Neurochirurgia Polska 9 (6), 701-704.
349. Sadres, E., Eliakim, A., Constantini, N., Lidor, R. & Falk, B. (2001). *The effect of long-term resistance training on anthropometric measures, muscle strength, and self concept in pre-pubertal boys*. Pediatric Exercise Science 13 (4), 357-372.
350. Sailors, M. & Berg, K. (1987). *Comparison of Responses to Weight Training in Pubescent Boys and Men*. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness 27 (1), 30-37.
351. Schantz, P., Randall-Fox, E., Hutchison, W., Tyden, A. & Astrand, P. O. (1983). *Muscle fibre type distribution, muscle cross-sectional area and maximal voluntary strength in humans*. Acta Physiol Scand. 117 (2), 219-226.
352. Schlossberger, N. M., Turner, R. A. & Irwin, C. E. (1992). *Validity of Self-Report of Pubertal Maturation in Early Adolescents*. Journal of Adolescent Health 13 (2), 109-113.
353. Seger, J. Y. & Thorstensson, A. (2000). *Muscle strength and electromyogram in boys and girls followed through puberty*. Eur.J.Appl.Physiol 81 (1-2), 54-61.
354. Selbmann, H.-K. & Meisner, C. (2000). *Wie beurteilt man die Qualität klinisch-therapeutischer Studien?* Der Internist 41 (4), 344-348.
355. Sen, B., Mahalanabis, D., Kurpad, A. V., Shaikh, S. & Bose, K. (2010). *Total body water and fat-free mass: evaluation of equations based on bioelectrical impedance analysis in infants and young children in India*. British Journal of Nutrition 104 (2), 256-264.
356. Sewall, L. & Micheli, L. J. (1986). *Strength Training for Children*. Journal of Pediatric Orthopaedics 6 (2), 143-146.
357. Shaibi, G. Q., Cruz, M. L., Ball, G. D. C., Weigensberg, M. J., Salem, G. J., Crespo, N. C. & Goran, M. I. (2006). *Effects of resistance training on insulin sensitivity in overweight Latino adolescent males*. Medicine and Science in Sports and Exercise 38 (7), 1208-1215.

-
358. Shield, A. & Zhou, S. (2004). *Assessing voluntary muscle activation with the twitch interpolation technique*. Sports Med 34 (4), 253-267.
359. Siegel, J., Camaione, D. N. & Manfredi, T. G. (1989). *The effects of upper body resistance training in prepubescent children*. Pediatric Exercise Science (1), 145-154.
360. Simoneau, J. A. & Bouchard, C. (1995). *Genetic Determinism of Fiber-Type Proportion in Human Skeletal-Muscle*. Faseb Journal 9 (11), 1091-1095.
361. Slemenda, C. W., Miller, J. Z., Hui, S. L., Reister, T. K. & Johnston, C. C. (1991). *Role of Physical-Activity in the Development of Skeletal Mass in Children*. Journal of Bone and Mineral Research 6 (11), 1227-1233.
362. Small, E. W., Bernhardt, D. T., Brenner, J. S., Congeni, J. A., Gomez, J. E., Gregory, A. J. M., Gregory, D. B., McCambridge, T. M., Reed, F. E., Rice, S. G., Stricker, P. R., Griesemer, B. A., Le Blanc, C. M. A., Raynor, J., Lindros, J. & Emanuel, A. (2007). *Overuse injuries, overtraining, and burnout in child and adolescent athletes*. Pediatrics 119 (6), 1242-1245.
363. Small, E. W., McCambridge, T. M., Benjamin, H. J., Bernhardt, D. T., Brenner, J. S., Cappetta, C. T., Congeni, J. A., Gregory, A. J. M., Griesemer, B. A., Reed, F. E. & Rice, S. G. (2008). *Strength training by children and adolescents*. Pediatrics 121 (4), 835-840.
364. Smith, A., Andrish, J. & Micheli, L. (1993). *The prevention of sports injuries of children and adolescents*. Medicine and Science in Sports and Exercise 25 (Suppl.), 1-7.
365. Solomon, A. M. & Bouloux, P. M. (2006). *Modifying muscle mass - the endocrine perspective*. Journal of Endocrinology 191 (2), 349-360.
366. Sotiropoulos, A., Ohanna, M., Kedzia, C., Menon, R. K., Kopchick, J. J., Kelly, P. A. & Pende, M. (2006). *Growth hormone promotes skeletal muscle cell fusion independent of insulin-like growth factor 1 up-regulation*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 103 (19), 7315-7320.
367. Souccar, C., Lapa, A. J. & Dovalle, J. R. (1982). *The Influence of Testosterone on Neuromuscular-Transmission in Hormone Sensitive Mammalian Skeletal-Muscles*. Muscle & Nerve 5 (3), 232-237.
368. Spurway, N. (2006). Types of skeletal muscle fibre. In Spurway, N. et al. (Hrsg.), *Genetics and Molecular Biology of Muscle Adaptation* (61-120). Elsevier: Churchill Livingstone.
369. Srinivasan, B. & Premkumar, S. (2011). *Assessment of serum dehydroepiandrosterone sulphate in subjects during the pre-pubertal, pubertal, and adult stages of skeletal maturation*. European Journal of Orthodontics
-

-
370. Staron, R. S., Hagerman, F. C., Hikida, R. S., Murray, T. F., Hostler, D. P., Crill, M. T., Ragg, K. E. & Toma, K. (2000). *Fiber type composition of the vastus lateralis muscle of young men and women*. Journal of Histochemistry and Cytochemistry 48 (5), 623-629.
371. Staron, R. S., Karapondo, D. L., Kraemer, W. J., Fry, A. C., Gordon, S. E., Falkel, J. E., Hagerman, F. C. & Hikida, R. S. (1994). *Skeletal-Muscle Adaptations During Early Phase of Heavy-Resistance Training in Men and Women*. Journal of Applied Physiology 76 (3), 1247-1255.
372. Steinmann, W. (1990). *Krafttraining im Sportunterricht*. Sportunterricht 39 (9), 326-339.
373. Stolarczyk, L. M., Heyward, V. H., Hicks, V. L. & Baumgartner, R. N. (1994). *Predictive Accuracy of Bioelectrical-Impedance in Estimating Body-Composition of Native-American Women*. American Journal of Clinical Nutrition 59 (5), 964-970.
374. Stone, M. H., Stone, M. und Sands, W. A. (2007). Physical and Physiological Adaptations to Resistance Training. In Principles and Practice of Resistance Training (201-228). Human Kinetics: Champaign.
375. Stratton, G., Jones, M., Fox, K. R., Tolfrey, K., Harris, J., Maffulli, N., Lee, M. & Frostick, S. P. (2004). *BASES position statement on guidelines for resistance exercise in young people*. Journal of Sports Sciences 22 (4), 383-390.
376. Suman, O. E., Spies, R. J., Celis, M. M., Mlcak, R. P. & Herndon, D. N. (2001). *Effects of a 12-wk resistance exercise program on skeletal muscle strength in children with burn injuries*. Journal of Applied Physiology 91 (3), 1168-1175.
377. Sunnegardh, J., Bratteby, L. E., Nordesjo, L. O. & Nordgren, B. (1988). *Isometric and Isokinetic muscle strength, anthropometry and physical activity in 8 and 13 year old Swedish children*. European Journal of Applied Physiology 58, 291-297.
378. Szulc, P., Claustrat, B., Marchand, F. & Delmas, P. D. (2003). *Increased risk of falls and increased bone resorption in elderly men with partial androgen deficiency: the MINOS study*. J.Clin.Endocrinol.Metab 88 (11), 5240-5247.
379. Tabary, J. C., Tabary, C., Tardieu, C., Tardieu, G. & Goldspink, G. (1972). *Physiological and structural changes in the cat's soleus muscle due to immobilization at different lengths by plaster casts*. J.Physiol 224 (1), 231-244.
380. Tanji, J. & Kato, M. (1973). *Firing Rate of Individual Motor Units in Voluntary Contraction of Abductor Digiti Minimi Muscle in Man*. Experimental Neurology 40 (3), 771-783.
-

381. Tanner, J. M. (1962). *Growth at Adolescents*. Oxford:Blackwell.
382. Tanner, J. M., Hughes, P. C. & Whitehouse, R. H. (1981). *Radiographically determined widths of bone muscle and fat in the upper arm and calf from age 3-18 years*. *Annals of Human Biology* 8 (6), 495-517.
383. Tanner, J. M., Whitehouse, R. H. & Cameron, N. (1983). *Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height*. London:Academic Press.
384. Tanner, J. M., Whitehouse, R. H. & Takaishi, M. (1966). *Standards from birth to maturity for height, weight, height velocity, and weight velocity: British children, 1965. I*. *Arch.Dis.Child* 41 (219), 454-471.
385. Tesch, P. A. und Alkner, B. A. (2005). Acute and Chronic Muscle Metabolic Adaptations to Strength Training. In Komi, P. V. (Hrsg.), *Strength and Power in Sport* (265-280). Blackwell Publishing: Oxford, Malden, Victoria, Berlin.
386. Thomas, J. R., Nelson, J. K. & Silverman, S. J. (2005). *Research Methods in Physical Activity*. Champaign:Human Kinetics.
387. Tipton, K. D. (2001). *Gender differences in protein metabolism*. *Curr.Opin.Clin.Nutr.Metab Care* 4 (6), 493-498.
388. Tobina, T., Nakashima, H., Mori, S., Abe, M., Kumahara, H., Yoshimura, E., Nishida, Y., Kiyonaga, A., Shono, N. & Tanaka, H. *The Utilization of a Biopsy Needle to Obtain Small Muscle Tissue Specimens to Analyze the Gene and Protein Expression*. *Journal of Surgical Research In Press*, Uncorrected Proof
389. Toigo, M. & Boutellier, U. (2006). *New fundamental resistance exercise determinants of molecular and cellular muscle adaptations*. *European Journal of Applied Physiology* 97 (6), 643-663.
390. Tolfrey, K. (2007). Responses to training. In Armstrong, N. (Hrsg.), *Paediatric Exercise Physiology* (213-234). Elsevier: Churchill, Livingstone.
391. Toth, M. J., Poehlman, E. T., Matthews, D. E., Tchernof, A. & MacCoss, M. J. (2001). *Effects of estradiol and progesterone on body composition, protein synthesis, and lipoprotein lipase in rats*. *Am.J.Physiol Endocrinol.Metab* 280 (3), E496-E501.
392. Treuth, M. S., Hunter, G. R., Pichon, C., Figueroa-Colon, R. & Goran, M. I. (1998). *Fitness and energy expenditure after strength training in obese prepubertal girls*. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 30 (7), 1130-1136.

-
393. Tsolakis, C., Messinis, D., Stergioulas, A. & Dessypris, A. (2000). *Hormonal responses after strength training and detraining in prepubertal and pubertal boys*. Journal of Strength and Conditioning Research 14 (4), 399-404.
394. Tsolakis, C. K., Vagenas, G. K. & Dessypris, A. G. (2004). *Strength adaptations and hormonal responses to resistance training and detraining in preadolescent males*. Journal of Strength and Conditioning Research 18 (3), 625-629.
395. Tucker, L. A. (1983). *Effect of Weight Training on Self-Concept - A Profile of Those Influenced Most*. Research Quarterly for Exercise and Sport 54 (4), 389-397.
396. Twisk, J. (2007). Physical activity and health. In Armstrong, N. (Hrsg.), *Paediatric Exercise Physiology* (325-346). Elsevier: Churchill Livingstone.
397. U.S.National Library of Medicine (2010). Fact Sheet - What's the Difference Between MEDLINE (R) and PubMed (R). http://www.nlm.nih.gov/pubs/factsheets/dif_med_pub.html.
398. Umbach, C. & Fach, H. H. (1990). *Muskeltraining in der Schule*. Sportunterricht 39 (9), 353-362.
399. van den Beld, A. W., de Jong, F. H., Grobbee, D. E., Pols, H. A. & Lamberts, S. W. (2000). *Measures of bioavailable serum testosterone and estradiol and their relationships with muscle strength, bone density, and body composition in elderly men*. J.Clin.Endocrinol.Metab 85 (9), 3276-3282.
400. Veldhuis, J. D., Roemmich, J. N., Richmond, E. J., Rogol, A. D., Lovejoy, J. C., Sheffield-Moore, M., Mauras, N. & Bowers, C. Y. (2005). *Endocrine control of body composition in infancy, childhood, and puberty*. Endocrine Reviews 26 (1), 114-146.
401. Velloso, C. P. (2008). *Regulation of muscle mass by growth hormone and IGF-I*. British Journal of Pharmacology 154 (3), 557-568.
402. Vicente-Rodriguez, G. (2006). *How does exercise affect bone development during growth?* Sports Medicine 36 (7), 561-569.
403. Vifa:Sport (2011). Datenbank Spolit. <http://www.vifasport.de/Datenbank-Spolit.html>.
404. Vingren, J. L., Kraemer, W. J., Ratamess, N. A., Anderson, J. M., Volek, J. S. & Maresh, C. M. (2010). *Testosterone physiology in resistance exercise and training: the up-stream regulatory elements*. Sports Med 40 (12), 1037-1053.

-
405. Vrijens, J. (1978). *Muscle strength development in the pre-and post-pubescent age*. *Medicine and Sport* 11, 152-158.
406. Wacharasindhu, S., Pri-Ngam, P. & Kongchonrak, T. (2002). *Self-assessment of sexual maturation in Thai children by Tanner photograph*. *Journal of the Medical Association of Thailand* 85 (3), 308-319.
407. Wackerhage, H. und Atherton, P. (2006). Adaptation to resistance training. In Spurway, N. et al. (Hrsg.), *Genetics and Molecular Biology of Muscle Adaptation* (197-226). Elsevier: Churchill Livingstone.
408. Wang, Z. M., Gallagher, D., Nelson, M. E., Matthews, D. E. & Heymsfield, S. B. (1996). *Total-body skeletal muscle mass: evaluation of 24-h urinary creatinine excretion by computerized axial tomography*. *American Journal of Clinical Nutrition* 63 (6), 863-869.
409. Warren, G. L. und Palubinskas, L. (2008). Human and Animal Experimental Muscle Injury Models. In Tiidus, P. M. (Hrsg.), *Skeletal Muscle Damage and Repair* (13-35). Human Kinetics: Champaign.
410. Watts, K., Beye, P., Siafarikas, A., Davis, E. A., Jones, T. W., O'Driscoll, G. & Green, D. J. (2004). *Exercise training normalizes vascular dysfunction and improves central adiposity in obese adolescents*. *Journal of the American College of Cardiology* 43 (10), 1823-1827.
411. Webber, C. E. (1995). Dual photon transmission measurements of bone mass and body composition during growth. In Blimkie, C. J. et al. (Hrsg.), *New Horizons in Pediatric Exercise Science* (57-76). Human Kinetics: Champaign.
412. Webber, L. M., William, C. B., Rowland, D. M. & Foster, V. L. (1989). *Serum Creatine Kinase Activity and Delayed Onset Muscle Soreness in Prepubescent Children*. *Pediatric Exercise Science* 1 (4), 351-359.
413. Weineck, J. (2004). *Optimales Training*. Balingen:Spitta Verlag.
414. Weineck, J. (2007). *Optimales Training*. Balingen:Spitta Verlag.
415. Wells, J. C. (2007). *Sexual dimorphism of body composition*. *Best.Pract.Res.Clin.Endocrinol.Metab* 21 (3), 415-430.
416. Weltman, A., Janney, C., Rians, C. B., Strand, K., Berg, B., Tippitt, S., Wise, J., Cahill, B. R. & Katch, F. I. (1986). *The Effects of Hydraulic Resistance Strength Training in Pre-Pubertal Males*. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 18 (6), 629-638.
417. West, D. W., Burd, N. A., Staples, A. W. & Phillips, S. M. (2010). *Human exercise-mediated skeletal muscle hypertrophy is an intrinsic process*. *International Journal of Biochemistry and Cell Biology* 42 (9), 1371-1375.
-

-
418. West, D. W. & Phillips, S. M. (2010). *Anabolic processes in human skeletal muscle: restoring the identities of growth hormone and testosterone*. *Phys.Sportsmed.* 38 (3), 97-104.
419. Widdowson, E. M., Mccance, R. A. & Spray, C. M. (1951). *The Chemical Composition of the Human Body*. *Clinical Science* 10 (1), 113-125.
420. Widrick, J. J., Trappe, S. W., Blaser, C. A., Costill, D. L. & Fitts, R. H. (1996). *Isometric force and maximal shortening velocity of single muscle fibers from elite master runners*. *Am.J.Physiol* 271 (2 Pt 1), C666-C675.
421. Wiedner, H. & Pfeiffer, M. (2006). *Schnellkrafttraining bei jugendlichen Schwimmern*. *Leistungssport* 36 (1), 41-47.
422. Williams, M. (2001). *Human Development and Aging*. In Roitman, J. et al. (Hrsg.), *Guidelines For Exercise Testing And Perscription* (513-519). Lippincott Williams & Williams: Philadelphia u.a.
423. Williams, P. E. & Goldspink, G. (1971). *Longitudinal growth of striated muscle fibres*. *J.Cell Sci* 9 (3), 751-767.
424. Wilmore, J. H., Costill, D. L. & Kenney, W. L. (2008). *Physiology of Sport and Exercise*. Champaign:Human Kinetics.
425. Wirth, A., Trager, E., Scheele, K., Mayer, D., Diehm, K., Reischle, K. & Weicker, H. (1978). *Cardiopulmonary adjustment and metabolic response to maximal and submaximal physical exercise of boys and girls at different stages of maturity*. *European Journal of Applied Physiology* 39 (4), 229-240.
426. Witte, H., Schumann, N. P., Griessbach, G., Scholle, H. C. & Eskelinen, P. (1991). *Methodical Investigations to Dynamic Emg-Mapping on the Basis of Hilbert-Transformation*. *Eeg-Emg-Zeitschrift fur Elektroenzephalographie Elektromyographie und Verwandte Gebiete* 22 (2), 77-82.
427. Wood, L. E., Dixon, S., Grant, C. & Armstrong, N. (2004). *Elbow flexion and extension strength relative to body or muscle size in children*. *Med Sci Sports Exerc* 36 (11), 1977-1984.
428. Wood, L. E., Dixon, S., Grant, C. & Armstrong, N. (2006). *Elbow flexor strength, muscle size, and moment arms in prepubertal boys and girls*. *Pediatric Exercise Science* 18 (4), 457-469.
429. World Health Organization (1985). *Energy and Protein requirements: Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation*. <[11] Journal> <[12] Volume>
430. Wretling, M. L., Gerdle, B. & HenrikssonLarsen, K. (1987). *Emg - A Noninvasive Method for Determination of Fiber Type Proportion*. *Acta Physiologica Scandinavica* 131 (4), 627-628.

431. Wu, T. J., Mendola, P. & Buck, G. M. (2002). *Ethnic differences in the presence of secondary sex characteristics and menarche among US girls: The Third National Health and Nutrition Examination Survey, 1988-1994*. *Pediatrics* 110 (4), 752-757.
432. Wunsch, R., de Sousa, G., Toschke, A. M. & Reinehr, T. (2006). *Intima-media thickness in obese children before and after weight loss*. *Pediatrics* 118 (6), 2334-2340.
433. Young, A., Stokes, M., Round, J. M. & Edwards, R. H. T. (1983). *The Effect of High-Resistance Training on the Strength and Cross-Sectional Area of the Human Quadriceps*. *European Journal of Clinical Investigation* 13 (5), 411-417.
434. Yu, C. C. W., Sung, R. Y. T., So, R. C. H., Lui, K. C., Lau, W., Lam, P. K. W. & Lau, E. M. C. (2005). *Effects of strength training on body composition and bone mineral content in children who are obese*. *Journal of Strength and Conditioning Research* 19 (3), 667-672.
435. Zaichkowski, L., Zaichkowski, L. & Martinek, T. (1975). *Self-concept and attitudinal differences in elementary age school children after participation in a physical activity program*. *Movement* 7, 243-245.
436. Zwiren, L. D. (2001). *Exercise Testing and Prescription Considerations Throughout Childhood*. In Roitman, J. et al. (Hrsg.), *Guidelines For Exercise Testing And Perscription* (520-528). Lippincott Williams&Williams:

17 Anhang

Tab. 20: Positionspapiere und Richtlinien verschiedener internationaler Organisationen.

British Association of Sport and Exercise Science (BASES) (2004) (Stratton et al., 2004)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Kinder und Jugendliche sollten ermutigt werden, zweimal wöchentlich an einem sicheren und effektiven Krafttraining teilzunehmen. 2. Krafttraining sollte Bestandteil einer breitflächig angelegten sportlichen und körperlichen Ausbildung sein.
American Academy of Pediatrics (2008) (Small et al., 2008)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Krafttrainingsprogramme für Kinder und Jugendliche können sicher und effektiv sein, wenn adäquate Übungen ausgewählt und Sicherheitsvorkehrungen befolgt werden. 2. Wettkampfgemäßes Gewichtheben, Bodybuilding und maximale Lasten sollten bis zur vollständigen körperlichen und skelettären Reifung vermieden werden. 3. Vor der Aufnahme eines Krafttrainings sollte eine medizinische Untersuchung durch einen Kinderarzt erfolgen. 4. Wenn gesundheitsbezogene Ziele im Vordergrund stehen sollte ein Kraftan ein Ausdauertraining gekoppelt werden. 5. Krafttrainingsprogramme sollten Auf- und Abwärmkomponenten beinhalten. 6. Spezifische Trainingsübungen sollten zunächst ohne Last bzw. Widerstand erlernt werden. Sobald die Übung beherrscht wird, können die Lasten gesteigert werden. 7. Eine Steigerung der Lasten bzw. des Widerstandes erfolgt erst nach sicherer Bewältigung von 8 bis 15 Wiederholungen. 8. Ein allgemeines Krafttrainingsprogramm sollte alle Hauptmuskelgruppen beanspruchen, die Übungen über den vollen Bewegungsumfang durchge-

führt werden.

9. Jegliche Anzeichen von Verletzungen oder Erkrankungen, die durch ein Krafttraining hervorgerufen werden, sollten vor Wiederaufnahme des Trainings medizinisch untersucht werden.

National Strength and Conditioning Association (1996) (Faigenbaum et al., 1996)

1. Jedes Kind sollte über die physiologische und psychologische Belastbarkeit verfügen, welche ein Krafttraining erfordert.
2. Den Kindern sollten hinsichtlich Muskelaufbau, Verbesserungen in der Körperzusammensetzung sowie motorischen Ziele realistische Erwartungen vermittelt werden.
3. Die Übungsumgebung sollte sicher und frei von Gefahren sein.
4. Die Trainingseinheit sollte eine 5-10minütige Phase mit allgemeinen Aufwärm- und Dehnübungen beinhalten, an die sich einer oder mehrere leichte übungsspezifische Aufwärmätze anschließen.
5. Die Trainingsgeräte müssen in gutem Zustand und auf die Größen der Kinder einstellbar sein.
6. Alle Trainingseinheiten sind unter gründlicher Anleitung durch qualifiziertes Personal durchzuführen.
7. Hinsichtlich Übungstechniken, allgemeinen Trainingsrichtlinien und Hilfestellungen muss eine sorgfältige und kompetente Instruktion erfolgen.
8. Grundlegende Verhaltensregeln, wie das Ablegen von Gewichten, müssen befolgt werden.
9. Die Trainingseinheit sollte mit Übungen für Ober- und Unterkörper beginnen, die primär große Muskelgruppen beanspruchen. Das Programm sollte sowohl Ein- als auch Mehrgelenksübungen beinhalten. Begonnen wird mit geringen Lasten (z. B. 12-15 RM), die für anschließende Belastungen eine genauere Einstellung ermöglichen.
10. Eine Intensitätssteigerung erfolgt über eine schrittweise Erhöhung des Trainingswiderstandes. Für die meisten Kinder ist eine Erhöhung des Widerstandes um 5-10 % angemessen.

11. Progression kann auch über eine allmähliche Steigerung von Satz- und Übungszahlen sowie durch eine Erhöhung der Trainingsfrequenz erreicht werden. Abhängig vom jeweiligen Trainingsziel werden 1 bis 3 Sätze zu 6 bis 15 Wiederholungen an 2 bis 3 nicht aufeinander folgenden Tagen pro Woche empfohlen.
12. Das Trainingsprogramm muss den Bedürfnissen und Wünschen der Kinder entsprechend geplant und bei Bedarf modifiziert werden.
13. Bestimmte Mehrgelenksübungen (Bankdrücken, Kniebeugen usw.) müssen entsprechend der individuellen Anforderungen und Fähigkeiten der Kinder erklärt werden und sollten zunächst nur mit leichten Widerständen durchgeführt werden, damit eine angemessene Technik erlernt werden kann. Bei der Einführung neuer Übungen erfolgt generell eine Bewegungsdemonstration.
14. Fortgeschrittene Hantelübungen (Kreuzheben, Reißen, Stoßen etc.) können in ein Trainingsprogramm integriert werden, vorausgesetzt, dass geeignete Lasten verwendet und eine angemessene Übungsausführung eingehalten wird.
15. Das Prinzip der Periodisierung sollte durch eine regelmäßige und systematische Variation der Trainingsprogramme berücksichtigt werden.
16. Wettkämpfe zwischen Kindern müssen aufgrund Verletzungsrisiken unterbunden werden. Stattdessen sollte Wert auf eine motivierende und bewegungsreiche Trainingsgestaltung gelegt werden.
17. Es sollte sichergestellt werden, dass Kinder Spaß am Krafttraining haben und nicht zur Teilnahme gedrängt werden.
18. Kinder sollten dazu angeregt werden vor, während und nach dem Krafttraining ausreichend Flüssigkeit zu sich zu nehmen.
19. Neben einem Krafttraining sollten Kinder an einer Vielzahl sportlicher Aktivitäten teilnehmen.

International Federation of Sports Medicine (1998) (Golan et al., 1998)

1. Krafttraining sollte nur unter Aufsicht von zertifiziertem Fachpersonal durchgeführt werden.

2. Für jede Übung muss eine fehlerfreie Bewegungsausführung erlernt werden.
3. Die Trainingsgeräte müssen den Größen der Kinder entsprechen und regelmäßig auf Sicherheit kontrolliert werden.
4. Hohe Trainingsintensitäten müssen vermieden werden. Maximale Intensitäten sollten nicht vor Erreichen des 16. Lebensjahres oder Tannerstufe 5 durchgeführt werden.
5. Die Intensitätssteigerung (Progression) sollte stufenweise erfolgen.
6. Krafttraining sollte als Ergänzung zu und nicht anstelle anderer Formen körperlicher Betätigung betrieben werden.
7. Krafttraining sollte sportspezifisch gestaltet werden.
8. Alle Übungen sollten kontrolliert über die volle Gelenkamplitude durchgeführt werden.
9. Schnelle, explosive und ballistische Bewegungen sollten vermieden werden.
10. Allen Trainingseinheiten sollten Dehnübungen vorausgehen und Beweglichkeitsübungen und eine Cool-Down-Phase folgen.

Canadian Society for Exercise Physiology (2008) (Behm et al., 2008)

1. Einweisung in und Durchführung von Krafttraining sollte durch geschultes Personal erfolgen.
2. Psychischer und physischer Reifestatus sowie Trainingserfahrung müssen berücksichtigt werden.
3. Eine frei von Gefahrenquellen und sichere Trainingsumgebung muss gewährleistet werden.
4. Die Trainingseinheit beginnt mit einer 5-10minütigen dynamischen Aufwärmphase.
5. Die Trainingshäufigkeit bei Aufnahme eines Krafttrainings sollte 2-3 Einheiten pro Woche umfassen.
6. Zu Anfang wird ein Ganzkörperkrafttraining bestehend aus 8-12 Übungen durchgeführt.
7. Anfänglich wird mit 1 bis 2 Sätzen zu 8-15 Wiederholungen mit einem

leichten bis moderaten Widerstand (etwa 60 % 1RM) trainiert, um eine angemessene Bewegungsausführung zu erlernen.

8. Die richtige Übungstechnik und ein sicherer Trainingsablauf hat Vorrang vor der Höhe des Widerstandes bzw. der Last.
9. Es sollten spezifische Trainingsübungen integriert werden, die Gleichgewicht und Koordination erfordern.
10. Es sollte eine stufenweise Progression zu fortgeschritteneren Bewegungen erfolgen, welche gezielt die Muskelleistung verbessern.
11. Ein Cool-Down erfolgt über geringintensive Aktivitäten und statischen Dehnübungen.
12. Systematische Variationen des Trainingsprogramms über den Zeitverlauf optimieren den Trainingsreiz und beugen Monotonie vor.

Australian Strength and Conditioning Association (2007) (Baker et al., 07)

1. Vor Aufnahme eines Krafttrainings sollten alle Kinder eine umfassende Sicherheitseinweisung erhalten, welche den Umgang mit Hanteln, das Leisten von Hilfestellungen, sowie allgemeine Verhaltensregeln im Übungsraum umfasst.
2. Das Training sollte von kompetenten Konditionstrainern angeleitet werden, welche sichere und adäquate Hebetechniken insbesondere bei Wirbelsäulenbelastenden Übungen gewährleisten können.
3. Weil eine kräftige Bauch- und Rückenmuskulatur dazu beiträgt, gefährliche Scherkräfte auf die Wirbelsäule zu reduzieren, sollte das Training dieser Muskelgruppen ein fundamentaler Bestandteil aller Trainingsprogramme für Kinder und Jugendliche darstellen.
4. Eine saubere Technik bei der Ausführung der Übungen hat Vorrang vor jeglicher Erhöhung von Belastungsintensität- oder des Umfangs.
5. Bei der Nutzung von Langhanteln sollte ein Standardgriff verwendet werden, bei dem die Daumen die Stange während des vollständigen Hebevorgangs umfassen. Vor der Anwendung falscher Grifftechniken wird dringend abgeraten.
6. Der Einstieg in ein Krafttraining kann ab dem 6. Lebensjahr erfolgen, vo-

rausgesetzt, dass Kinder über die entsprechende Reife verfügen, um Anweisungen befolgen und Gefahren richtig einschätzen zu können.

7. Im langfristigen Trainingsaufbau müssen der kindlichen Entwicklung entsprechende alters- und muskelfunktionsabhängige Progressionen vorgenommen werden.

American College of Sports Medicine (2006) (American College of Sports Medicine, 2006)

1. Krafttraining sollte sorgfältig von kompetentem Personal angeleitet werden.
2. Zu intensives bzw. Maximalkrafttraining sollte vermieden werden. Eine stufenweise Progression ist erforderlich, um unangemessen fordernde Programme zu verhindern, die Kinder demotivieren könnten.
3. Trainingsmittel sollten variiert werden und der Größe, Kraft und dem Reifestatus des Kindes angemessen sein.
4. Krafttraining sollte in ein umfangreiches Programm eingebettet werden, damit Fitness und Motorik gleichermaßen gesteigert werden können.
5. Es sollten 8 bis 15 Wiederholungen pro Übung absolviert werden. Widerstand oder Gewicht sollten erst erhöht werden, wenn das Kind die gewünschte Wiederholungsanzahl in guter Form bewältigen kann.
6. Besondere Aufmerksamkeit sollte auf eine angemessene Übungstechnik und nicht auf die Höhe des Widerstandes gelegt werden.
7. Wenn ein präpubertäres Kind nicht ein Minimum von acht Wiederholungen in angemessener Form durchführen kann, ist der Widerstand zu hoch und sollte reduziert werden.
8. Ein Wiederholungsspektrum unterhalb von acht Wiederholungen sollte Jugendlichen vorbehalten bleiben, die über eine entsprechende Reife verfügen (Tanner Stufe 5).

18 Zusammenfassung

18.1 Deutsch

Entgegen früherer Befürchtungen, bewerten aktuelle Positionspapiere der American Academy of Pediatrics (AAP), des American College of Sport Medicine (ACSM) oder der National Strength and Conditioning (NSCA) ein Training im Kindes- und Jugendalter einheitlich als effektiv und sicher. Demgegenüber stehen nationale Lehrbücher, welche noch immer die tradierten Vorstellungen wiedergeben sowie eine rudimentäre Einbindung von Krafttraining in zahlreichen Rahmentrainingsplänen für den Nachwuchsleistungssport. Das bedeutet wir hinken der internationalen Entwicklung in diesem Bereich um etwa 20 bis 30 Jahre hinterher. Daher war es das primäre Ziel der vorliegenden Arbeit, die vorhandene Datenlage im Bezug auf dieses Thema zusammenzutragen und etwaige Forschungsdesiderate herauszustellen.

Die Analyse von 69 Interventionsstudien zeigte, dass Krafttraining über alle Altersgruppen hinweg effektiv ist und die gewonnen Kraftzuwächse durchaus mit denen von Erwachsenen verglichen werden können. Einige Autoren fanden für präpubertäre Kinder sogar größere Zuwächse als in späteren Reifestadien. Die mittlere auxotonischen, isokinetischen und isometrischen Kraftzuwächse lagen bei 31,6% (23 Studien), 20,1% (6 Studien) und 26,3% (17 Studien). Bislange haben nur wenige Studien ($n = 7$) ihre Ergebnisse für weibliche Probanden isoliert angegeben. Da diese Studien widersprüchliche Ergebnisse zeigten, kann aktuell nicht abschließend beurteilt werden, ob die Muskelkraft von Mädchen weniger trainierbar ist als die von Jungen.

Da einige Studien trotz signifikanter Kraftverbesserungen bei präpubertären Kindern keine Muskelhypertrophie nachweisen konnten, werden die Kraftzuwächse bei Kindern in der Regel einer verbesserten neuromuskulären Aktivierung zugeschrieben. Ein Großteil der zugrundeliegenden Studien nutzte jedoch ungenaue Messmethoden, um die strukturellen Veränderungen zu erfassen. Im Gegensatz dazu fanden die wenigen Studien, welche präzisere Messmethoden verwendeten, auch bei präpubertären Kindern eine signifikante Zunahme des Muskelwachstums. Darüber hinaus existieren nur wenige Studien, welche die oben genannte Annahme stützen, dass vornehmlich neuromuskuläre Veränderungen für die Kraftzuwächse verantwortlich sind.

Entgegen der Befürchtungen, die mit einem Krafttraining im Kindes- und Jugendalter verbunden waren, ist zu sagen, dass es sich hierbei um eine risikoarme Trainingsform handelt. Neben der Tatsache, dass bislang in keiner einzigen prospektiven Studie die häufig befürchtete Schädigung der Epiphysenfugen beobachtet werden konnte, fanden sich auch in den 69 analysierten Studien lediglich zwei leichte Verletzungen. Ganz im Gegensatz dazu lassen sich vermehrt Studien finden, welche positive Effekte auf die Gesundheit beschreiben. Dazu gehören u.a. eine vermehrte Knochenmineralisation, eine verbesserte Körperzusammensetzung und positive Effekte auf die Psyche.

Insgesamt kann zwar gesagt werden, dass Krafttraining während der Kindheit und Jugend effektiv ist, jedoch sind die zugrundeliegenden Mechanismen der Kraftzuwächse in großen Teilen noch unbekannt.

18.2 Englisch

In contrast to earlier concerns, current position statements of the American Academy of Pediatrics (AAP), the American College of Sport Medicine (ACSM), or the National Strength and Conditioning (NSCA) Association unequivocally state resistance training in children and adolescents to be effective and safe. However, national textbooks and training guidelines still contain those outdated opinions that could be found in position paper from the AAP in the late 1980s. That is, we lag behind the international doctrine in this field of research for about 20 to 30 years. Therefore, the primary aim of the present study was to review the currently available data concerning this topic and to outline any desideratum for further research.

The analyses of 69 interventional studies revealed that resistance training is effective over all age groups and that strength gains in children and adolescents were comparable to those from adults. Some authors even found greater improvements for prepubertal children compared to those in later stages of puberty. Mean auxotonic, isokinetic, and isometric strength gains were 31.6% (23 studies), 20.1% (6 studies), and 26.3% (17 studies) respectively. Due to the small number of studies ($n=7$) presenting data for female subjects and due to their conflicting results, it is currently impossible to state whether girls muscle strength is less trainable.

Due to the fact that some of the previously published studies failed to detect muscle hypertrophy despite significant improvements in muscle strength, prepubertal strength gains are usually attributed to enhanced neuromuscular activation. However, the majority of those studies used imprecise methods, like anthropometric circumference measurements, to detect structural adaptations. By contrast, the few available studies using more precise methods like ultrasound were able to detect hypertrophy in prepubertal children. Furthermore, there is only little evidence to support the assumption that neuromuscular changes are responsible for the observed strength gains.

Against the early concerns associated with resistance training in children and adolescents, it can be stated that the risk of this exercise type is very low. Besides the fact that the frequently feared damage of the growth plate has never been reported by any prospective resistance training study, only two minor injuries were found to be noted in the 69 analyzed studies. By contrast, there is growing evidence that resistance training during childhood and youth is associated with different kind of health benefits, like enhanced bone mineral density, improved body composition, and psychological health.

Even though it can be stated that resistance training is effective and safe during childhood and youth, it must be stated that the underlying mechanisms of strength gains are largely unknown.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Trainingswissenschaft und Sportinformatik der Deutschen Sporthochschule Köln unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. Dr. hc. mult. Joachim Mester angefertigt.

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, welche mich bei meiner Arbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt dabei meinem Doktorvater Herrn Prof. Mester für die Überlassung des Themas, die überragende wissenschaftliche Betreuung und die enormen Freiheiten in allen Phasen der Arbeit. Ich danke Ihm weiterhin für die kreativen Diskussionen und seine zahlreichen fachlichen Hinweise, die mir stets weitergeholfen haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinem ehemaligen Kollegen Andreas vom Heede, der sich für das Thema Krafttraining mit Kindern und Jugendlichen überaus begeistern konnte und mich bei meiner Arbeit stets fachlich und freundschaftlich unterstützt hat. Ich hätte mir keine bessere Unterstützung vorstellen können!

Ein großer Dank gilt meiner gesamten Familie, die mir jederzeit und in jeder Hinsicht zur Seite gestanden hat.

Lebenslauf

Name	Dr. med. Michael Behringer
Geburtsdatum	27.06.1978
Geburtsort	Neuss
Eltern	Peter Behringer Doris Behringer
Geschwister	Eine jüngere Schwester Ein älterer Bruder
Schulbildung	01.08.1984 – 31.07.1988 (<i>Grundschule Hochdahl, Wilbeck</i>) 01.08.1988 – 31.07.1995 (<i>Gymnasium Hochdahl</i>) 01.08.1995 – 12.06.1998 (<i>Kollegschule Kickweg, Düsseldorf</i>)
Schulabschluss	Allgemeine Hochschulreife Leistungskurse Sport und Biologie
Berufsausbildung	01.08.1995 – 12.06.1998 Staatlich geprüfter Freizeitsportleiter
Wehrdienst	01.07.1998 – 30.04.1999 (<i>4. Panzerbataillon 203, Hemer</i>)
Medizinstudium	Immatrikulation im Wintersemester 1999 / 2000 an der <i>HHU-Düsseldorf</i> 31.08.2001 Ärztliche Vorprüfung 28.08.2003 Erster Abschnitt der ärztlichen Prüfung 05.09.2005 Zweiter Abschnitt der ärztlichen Prüfung 17.10.2005 – 15.09.2006 Praktisches Jahr an der <i>HHU-</i> <i>Düsseldorf</i> 07.11.2006 Dritter Abschnitt der ärztlichen Prüfung
Approbation	05.04.2007
Promotion	01.04.2007 – 11.02.2010 Promotion zum Dr. med. an der <i>orthopädischen Klinik der HHU - Düsseldorf</i> Titel: „Klinisch-radiologische Ergebnisse eines modularen zementfreien Endoprothesensystems mit XLPE/Keramik-Gleitpaarung“
Tätigkeit	Seit Oktober 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter am <i>Institut für Trainingswissenschaft und Sportinformatik der Deutschen Sporthochschule Köln</i> . Seit November 2008 tätig am <i>Forschungszentrum für Leistungssport (momentum) an der Deutschen Sporthochschule Köln</i> .