

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Muskuläre Entwicklung im Kindesalter: Validierung der Feldtestung „Counter-Movement-Jump“ anhand isokinetischer Labormessungen

verfasst von | submitted by

Georg Stefan Bogoevski BSc

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Master of Science (MSc)

Wien | Vienna, 2025

Studienkennzahl lt. Studienblatt |
Degree programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 066 826

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree
programme as it appears on the student
record sheet:

Masterstudium Sportwissenschaft

Betreut von | Supervisor:

Univ.-Prof. Mag. Dr. Robert Csapo

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß anderen Werken entnommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Georg Bogoevski, BSc.

15.Mai 2025

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlage	3
2.1 Muskuläre Entwicklung und physiologische Grundlagen	3
2.1.1 Bedeutung der muskulären Entwicklung im Kindes- und Jugendalter	3
2.1.2 Physiologische Grundlagen der Kraftentwicklung	4
2.2 Die Kraft-Geschwindigkeits-Kurve / Die Hill'sche Kurve	6
2.2.1 Theoretische Grundlagen	6
2.2.2 Die Kraft-Geschwindigkeits-Kurve in der Praxis / Die in Vivo-Beziehung	8
2.2.3 Empfehlungen zur Ermittlung der F-V-Kurve in Vivo	11
2.2.4 Ableitungen für die Leistungsdiagnostik / Die Leistungsparabel	11
2.2.5 Empfohlene Standardisierung von Kraft-Geschwindigkeits-Parametern im Kindes- und Jugendalter: Körpergewicht und biologische Reifung als Vergleichsbasis	13
2.3 Die Peak Height Velocity und der Maturity Offset	15
2.3.1 Definition der Peak Height Velocity und des Maturity Offset	15
2.3.2 Unterschiede der körperlichen Entwicklung zwischen trainierten und untrainierten Kindern	17
2.4 Methoden zur Feststellung muskulärer Entwicklungen im Kindes- und Jugendalter	17
2.4.1 Labormethoden: Isokinetische Messung als Goldstandard	17
2.4.2 Feldmethoden: Sprungtests und die Kraftmessplatte	18
2.5 Stand der Forschung und Forschungslücke	21
2.6 Zielsetzung und Forschungsfrage	25
3 Methodik	27
3.1 Studiendesign	27
3.2 Teilnehmer*innen	27
3.3 Versuchsbedingungen und Materialien	29
3.4 Messverfahren	29
3.5 Ablauf der Datenerhebung	30
3.6 Datenanalyse	31
3.7 Ethik und Datenschutz	32
4 Ergebnisse	33
4.1 Proband*innen	33
4.2 PHV und MO	33
4.3 Altersgruppen	35
4.4 Univariate Analyse der Altersgruppen	36
4.4.1 Analyse Maximalkraft	36
4.4.2 Analyse Sprunghöhe	36

4.4.3 Analyse Maximalkraft normiert.....	36
4.5 Absolute CMJ-Kraftentwicklung.....	38
4.6 Normierte CMJ-Kraft und Leistungsparameter	40
5 Diskussion und Ausblick	43
5.1 Interpretation der Ergebnisse	43
5.2 Implikationen für Forschung und Praxis	43
5.3 Vergleich mit bestehender Literatur.....	44
5.4 Forschungsperspektiven	46
5.5 Gesellschaftliche Relevanz	47
5.6 Methodische Stärken und Limitationen	48
5.6.1 Stärken.....	48
5.6.2 Limitationen	49
6 Conclusio.....	51
7 Abbildungsverzeichnis	52
8 Tabellenverzeichnis.....	53
9 Literaturverzeichnis	54

KURZFASSUNG

Die vorliegende Studie untersucht die muskuläre Entwicklung präpubertärer Jungen (10–13 Jahre) unter Berücksichtigung biologischer Reifungsprozesse, um die Validität von Feldmethoden gegenüber laborgestützten Verfahren zu überprüfen. Im Fokus steht die Analyse von Leistungsdaten ($F_{\max}$, $V_{\max}$, $P_{\max}$) mittels Counter-Movement-Jump (CMJ) auf einer Kraftmessplatte und der Vergleich zu dem Gold-Standard, den isokinetischen Labormessungen. Die Ergebnisse zeigen, dass präpubertäre Kraftzuwächse ausschließlich proportional zur Körpergewichtszunahme verlaufen: Während die absolute Maximalkraft ($F_{\max}$) signifikant um 59,5 % anstieg ($p < 0,001$), blieben normierte Werte ($F_{\max}/\text{kg}$, $P_{\max}/\text{kg}$) über alle Altersgruppen stabil ($p > 0,672$). Diese Befunde replizieren isokinetische Daten von Reznar & Bogoevski (2022) und belegen, dass Feldtests wie der CMJ valide Aussagen zur muskulären Entwicklung liefern – vorausgesetzt, die Daten werden körpergewichtsnormiert und der biologische Reifegrad mittels Maturity Offset (MO) beziehungsweise der Peak-Height-Velocity (PHV) berücksichtigt. Die Studie unterstreicht die Notwendigkeit einer PHV-basierten Kategorisierung, um muskuläre Entwicklung und Leistungsfähigkeit zu erkennen. Der CMJ erweist sich als praktikables Werkzeug zur Langzeitbeobachtung der motorischen Entwicklung, insbesondere in der Präpubertät.

ABSTRACT

This study investigates the muscular development of prepubescent boys (ages 10–13), considering biological maturation processes, to evaluate the validity of field methods compared to laboratory-based procedures. The focus lies on the analysis of performance data ($F_{\max}$, $V_{\max}$, $P_{\max}$) using the Counter-Movement Jump (CMJ) on a force plate and comparing it to the gold standard of isokinetic laboratory measurements. Results show that prepubescent strength gains occur exclusively in proportion to increases in body weight: while absolute maximal force ($F_{\max}$) significantly increased by 59.5% ($p < 0.001$), normalized values ($F_{\max}/\text{kg}$, $P_{\max}/\text{kg}$) remained stable across all age groups ($p > 0.672$). These findings replicate isokinetic data from Reznar & Bogoevski (2022) and demonstrate that field tests such as the CMJ can provide valid insights into muscular development — provided that the data are normalized for body weight and biological maturity via Maturity Offset (MO) respectively Peak-Height-Velocity (PHV) is considered. The study highlights the necessity of PHV-based categorization to accurately assess muscular development and performance. The CMJ proves to be a practical tool for the long-term monitoring of motor development, particularly during prepubescence.

1. Einleitung

Die Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung (F-V-Beziehung) ist ein entscheidender Indikator für die Muskelfunktion und gibt Aufschluss darüber, welche Leistung ein Muskel unter verschiedenen Widerständen erbringen kann. Das F-V-Profil beschreibt den Zusammenhang zwischen Kontraktionsgeschwindigkeit und erzeugter Muskelkraft und wird als F-V-Kurve dargestellt (Cormie et al., 2011). Je höher die Geschwindigkeit des kontrahierenden Skelettmuskels, desto geringer die gemessene Kraft. Umgekehrt steigt die gemessene Kraft des Skelettmuskels bei niedriger Geschwindigkeit (Fenwick et al., 2017).

Die F-V-Beziehung wird aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet. Alcazar et al. (2018) untersuchten unter anderem den Zusammenhang spezifischer funktioneller Defizite im Alter und der Lebensqualität. Gemäß Nishikawa & Huck (2021) bedient sich auch die Robotik bei ihren Bemühungen, Prothesen mit möglichst natürlicher Funktionalität zu entwickeln. Die aktuelle sportwissenschaftliche Forschung nutzt das F-V-Profil, um individuellere Anpassungen des Trainings zu fördern. Unter anderem wird die Verbesserung der Sprungkraft (Jiménez-Reyes et al., 2019; Zubčić & Vučetić, 2022) und der Sprintperformance (Samozino et al., 2012) angestrebt sowie die muskuläre Ermüdung (D. A. Jones, 2010) analysiert. Das Training basierend auf einem zugeschnittenen F-V-Profil hilft dem/der Sportler*in höhere Leistungen zu erzielen als die Anwendung eines standardisierten Trainings (Valenzuela et al., 2021).

Die Ermittlung des F-V-Profils gelingt mittels einer Vielzahl an Testmethoden und soll in der Sportwissenschaft Aufschluss über den aktuellen Leistungsstand geben. Ob mit Sprungtests (Jiménez-Reyes et al., 2017), Sprinttests oder Kraftübungen (Bosquet et al., 2010), alle stellen fest, ob ein F-V-Defizit im Bereich Kraft oder Geschwindigkeit vorliegt. Standardisierte Richtlinien zur Ermittlung des F-V-Profils existieren laut aktueller Studienlage noch nicht, sollen jedoch Arbeit zukünftiger Forschung werden (Alcazar et al., 2022).

Moderne technische Geräte ermöglichen die Erhebung und Analyse des F-V-Profils. Isokinetische Diagnose- und Trainingsgeräte haben sich dabei als Goldstandard zur Bestimmung der Muskelleistung etabliert (Zöger et al., 2025). Darüber hinaus finden die sogenannten „Isokineten“ Anwendung in der Identifikation muskulärer Dysbalancen (Belhaj et al., 2016), der Leistungsdiagnostik im Spitzensport (Wilkošz et al., 2021), sowie in der Untersuchung altersbedingter Veränderungen der Muskelkraft (Ly & Handelsman, 2002). Neben isokinetischen Systemen können auch weitere Messinstrumente wie Kraftmessplatten (Jiménez-Reyes et al., 2014a, 2014b) oder Positionssensoren (Martínez-Cava et al., 2020) zur Erfassung des F-V-Profils eingesetzt werden. Die Nutzung der Kraftmessplatte erfordert

Sprungversuche mit Zusatzgewichten (Pleša et al., 2024), welche jedoch insbesondere im Kindes- und Jugendbereich Durchführungsschwierigkeiten mit sich bringen kann.

Die Beurteilung der muskulären Entwicklung mittels F-V-Profil im Kindes- und Jugendalter stellt eine bedeutsame Messgröße dar. Einerseits dient sie dazu, ein umfassendes Bild der muskulären Entwicklung von Heranwachsenden zu erstellen und normative Daten abzuleiten (Segar & Thorstensson, 2000). Andererseits ermöglicht sie im Leistungssport eine optimierte Trainingssteuerung, um die Leistungsfähigkeit gezielt zu fördern. Die sportmotorische Fähigkeit Kraft etwa, nimmt mit dem Einsetzen der Pubertät zu (Menzi et al., 2007), wodurch Trainingsreize in dieser Entwicklungsphase unterschiedliche Auswirkungen zeigen können (Behringer, 2017).

Bisher unklar ist, ob sich die Entwicklung der muskulären Leistungsfähigkeit in der Pubertät über eine Erhöhung der Kontraktionsgeschwindigkeit („schnell vor stark“), der Maximalkraft („stark vor schnell“) oder harmonisch (zeitgleicher Steigerung beider Parameter) realisiert. Fernández-Galván et al. (2022) untersuchte die F-V-Beziehung von jugendlichen, männlichen Fußballspielern mittels Sprint-Tests. Die Ergebnisse der Querschnittsstudie deuten auf eine Erzielung hoher Bewegungsgeschwindigkeiten erst nach vollständiger Entwicklung der Maximalkraft hin. Diese Erkenntnis hat trotz ihrer Limitationen wichtige Implikationen für die Trainingsgestaltung junger Athlet*innen und deutet an, die F-V-Beziehung als möglichen Indikator für das biologische Alter nutzen zu können. Sprinttestungen sind jedoch allgemein als schwer standardisierbar bekannt und lassen Interpretationsspielraum im Hinblick auf die Muskelphysiologie der Jugendlichen.

Einer/m trainierten Athlet*in gegenübergestellt sind Ableitungen für die muskuläre Entwicklung untrainierter Kinder über die F-V-Kurve oftmals nur unter Laborbedingungen möglich (Reznar & Bogoevski, 2022). Die Durchführungsdauer in Studiendesigns wie jenes von Segar & Thorstensson (2000) oder die Komplexität von Reznar & Bogoevski (2022) scheinen nur einige von vielen Limitationen darzustellen. Bisher mangelt es an validierten, vereinfachten, Methoden, die eine Feldanwendung für untrainierte Kinder ermöglicht. Um muskuläre Veränderungen außerhalb eines standardisierten Laborsettings auch für untrainierte Kinder zu ermöglichen, bedarf es weiterer Forschungsarbeit.

Um geeignete Messverfahren für untrainierte Kinder im Feld zu entwickeln, ist ein grundlegendes Verständnis der muskulären Entwicklung erforderlich.

2.Theoretische Grundlage

2.1 Muskuläre Entwicklung und physiologische Grundlagen

2.1.1 Bedeutung der muskulären Entwicklung im Kindes- und Jugendalter

Die muskuläre Entwicklung im Kindes- und Jugendalter stellt eine zentrale Grundlage für eine Vielzahl von Aspekten dar, die von der allgemeinen Gesundheit über die motorische Kompetenz bis hin zur sportlichen Leistungsfähigkeit reichen (Faigenbaum et al., 2013; Granacher et al., 2016). Die Muskelkraftentwicklung im Kindes- und Jugendalter ist essenziell für die Ausführung alltäglicher Bewegungen, die Aufrechterhaltung einer gesunden Körperhaltung und die Prävention von Verletzungen (Lloyd & Oliver, 2012). Darüber hinaus hat sie weitreichende Auswirkungen auf das Aktivitätsniveau, die soziale Partizipation und das Selbstwertgefühl (Tremblay et al., 2002). Kinder und Jugendliche mit einer gut entwickelten Muskulatur neigen dazu, aktiver zu sein, was wiederum positive Effekte auf die kardiovaskuläre Gesundheit, die Knochendichte und die psychische Stabilität hat (Janssen et al., 2005).

Unzureichende Muskelkraft kann hingegen zu einem Teufelskreis führen, in dem Bewegungsmangel und eine reduzierte motorische Kompetenz das Verletzungsrisiko erhöhen und die Teilhabe am sozialen Leben erschweren. Es ist daher von großer Bedeutung, die muskuläre Entwicklung von Kindern und Jugendlichen im Blick zu behalten und gezielte Maßnahmen zur Förderung der Muskelkraft zu ergreifen, insbesondere in Anbetracht der zunehmenden Inaktivität im Berufsleben und des Rückgangs körperlicher Aktivität in der modernen Gesellschaft (Strong et al., 2005). Um die muskuläre Entwicklung im Kindes- und Jugendalter adäquat beurteilen zu können, ist eine Einordnung in die verschiedenen Entwicklungsphasen unerlässlich: Kindheit, Präpubertät und Pubertät (Lloyd & Oliver, 2012). Jede dieser Phasen ist durch spezifische physiologische Veränderungen gekennzeichnet, die sich auf die Muskelkraft und die neuromuskuläre Funktion auswirken (Malina et al., 2004). Während in der Kindheit vor allem das Muskelwachstum und die Entwicklung der neuromuskulären Koordination im Vordergrund stehen, kommt es in der Pubertät zu einem rasanten Anstieg der Muskelmasse und -kraft, der vor allem durch hormonelle Einflüsse gesteuert wird (Menzi et al., 2007).

2.1.2 Physiologische Grundlagen der Kraftentwicklung

Die physiologischen Grundlagen der Kraftentwicklung im Kindes- und Jugendalter sind komplex und umfassen eine Vielzahl von Faktoren, die von genetischen Dispositionen über hormonelle Einflüsse bis hin zu Umwelteinflüssen reichen (Behringer, 2017). Grundlegend für die Kraftentwicklung ist das Muskelwachstum, welches sowohl durch eine Zunahme der Muskelzellgröße (=Hypertrophie) als auch durch eine Vermehrung der Muskelzellen (=Hyperplasie) erfolgen kann, wobei der genaue Anteil beider Mechanismen noch nicht vollständig geklärt ist (MacDougall et al., 1980).

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Zusammensetzung der Muskelfasern, die sich in Typ-I- (langsam zuckend, ausdauernd) und Typ-II-Fasern (schnell zuckend, kraftvoll) unterteilen lassen. Das Verhältnis dieser Fasertypen ist genetisch vorherbestimmt, kann aber durch Training beeinflusst werden (Andersen et al., 2000). Insbesondere die Typ-II-Fasern sind für die Entwicklung von Schnellkraft und Maximalkraft von Bedeutung, weshalb eine gezielte Förderung dieser Fasertypen im Rahmen des Trainings angestrebt wird (Fry et al., 2003).

Eine Schlüsselrolle bei der Kraftentwicklung im Kindes- und Jugendalter spielen die Hormone, insbesondere das Wachstumshormon Somatotropin und die Geschlechtshormone - Testosteron bei Jungen, sowie Östrogen bei Mädchen. Diese Hormone fördern das Muskelwachstum, die Proteinsynthese und die Knochendichte und tragen somit maßgeblich zur Zunahme der Muskelkraft bei (Menzi et al., 2007). Insbesondere der Testosteronspiegel korreliert stark mit der Zunahme der Muskelmasse und -kraft während der Pubertät, was zu den deutlichen Geschlechtsunterschieden in der körperlichen Leistungsfähigkeit beiträgt (Tanner, 1962).

Neben den genannten Faktoren spielen auch neuromuskuläre Anpassungen eine entscheidende Rolle bei der Kraftentwicklung. Dazu gehören eine verbesserte Ansteuerung der Muskeln, eine synchronere Aktivierung der Muskelfasern und eine effizientere intermuskuläre Koordination (Arnold, 1997). Durch gezieltes Training können diese neuromuskulären Anpassungen gefördert werden, was zu einer Steigerung der Muskelkraft führt, auch ohne, dass es zu einer Zunahme der Muskelmasse kommt (Moritani & deVries, 1979).

Besonders hervorzuheben ist die Bedeutung der normierten Kraftwerte (=Kraft in Nm pro Kilogramm Körpergewicht) für die Beurteilung der Kraftentwicklung im Kindes- und Jugendalter. Da Kinder und Jugendliche kontinuierlich wachsen und an Körpergewicht zunehmen, ist es wichtig, die absolute Muskelkraft in Relation zum Körpergewicht zu setzen, um eine valide Aussage über die relative Kraftfähigkeit treffen zu können (Meylan et al., 2014). Eine Zunahme der absoluten Muskelkraft bedeutet nicht zwangsläufig eine

Verbesserung der relativen Kraftfähigkeit, da diese durch das zunehmende Körpergewicht kompensiert werden kann. Die normierte Kraft ermöglicht somit einen besseren Vergleich zwischen verschiedenen Altersgruppen und Geschlechtern und erlaubt eine präzisere Beurteilung der individuellen Leistungsentwicklung (Meylan et al., 2015). Während die statische Maximalkraft (F_{max}) allein bereits Aufschluss über die muskuläre Entwicklung gibt, ermöglicht erst die Einbettung in das F-V-Profil ein umfassendes Verständnis der Leistungsfähigkeit unter unterschiedlichen Belastungsbedingungen (Samozino et al., 2012).

2.2 Die Kraft-Geschwindigkeits-Kurve / Die Hill'sche Kurve

2.2.1 Theoretische Grundlagen

Die F-V-Kurve oder eben auch Hill'sche Kurve stellt ein zentrales Konzept zur Analyse der muskulären Leistungsfähigkeit dar und ist zurückzuführen auf dem britischen Physiologen A. V. Hill, welcher die Beziehung zwischen der Kraft, die ein Muskel erzeugen kann, und der Geschwindigkeit, mit der er sich verkürzt, beschreibt. In seiner wegweisenden Studie stellte Hill (1938) fest, dass die Kraft, die ein Muskel erzeugt, bei zunehmender Verkürzungsgeschwindigkeit abnimmt. Die Kurve, die diese Beziehung darstellt, ist hyperbolisch geformt. Bei maximaler Geschwindigkeit ist die erzeugte Kraft minimal, während bei maximaler Kraft die Verkürzungsgeschwindigkeit null ist, was eine isometrische Kontraktion darstellt. Die „Hill-Gleichung“ lautet:

$$(F + a) (v + b) = (P_0 + a) b$$

F	... momentane Kraft des Muskels
v	... momentane Verkürzungsgeschwindigkeit
P_0	... maximale isometrische Kraft (bei $v = 0$)
$a \ \& \ b$	... Konstanten, die die Form der Kurve bestimmen und von den mechanischen Eigenschaften des Muskels abhängen

Hill führte Experimente an isolierten Froschmuskeln durch und fand heraus, dass die Form der Kurve durch die mechanischen und biochemischen Eigenschaften des Muskels, insbesondere die Arbeit der Aktin-Myosin-Kreuzbrücken, bestimmt wird (Hill, 1938).

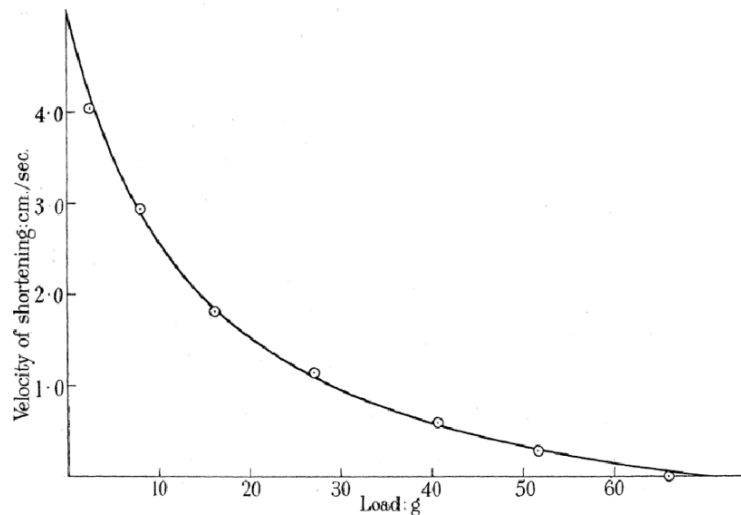


Abbildung 1: Hill'sche Kurve
Quelle: Hill, 1938, S.177

Die F-V-Kurve stellt einen negativen Zusammenhang zwischen konzentrischer Kraft und Kontraktionsgeschwindigkeit dar und beschreibt im Allgemeinen die Beziehung zwischen der Kraft, die ein Muskel erzeugen kann, und der Geschwindigkeit seiner Kontraktion (Alcazar et al., 2019; Hahn, 2008). Die Kurve beschreibt ein breiteres Konzept, welches nicht nur die hyperbolische Beziehung bei konzentrischen Kontraktionen umfasst, sondern auch die Kraft bei isometrischen und exzentrischen Kontraktionen einbezieht.

Die Bewegungsgeschwindigkeit nimmt kontinuierlich ab und erreicht bei der der Maximalkraft einen isometrischen Zustand. Während die Kraft ihr vorläufiges Maximum erreicht, beträgt die Geschwindigkeit null. Eine noch größere Kraft kann jedoch erzeugt werden, wenn die äußere Last so hoch ist, dass der aktivierte Muskel exzentrisch gedehnt wird. In diesem Fall können Reflexaktivitäten und passive Strukturen zu einer Erhöhung des Kraftniveaus führen (Alt et al., 2023).

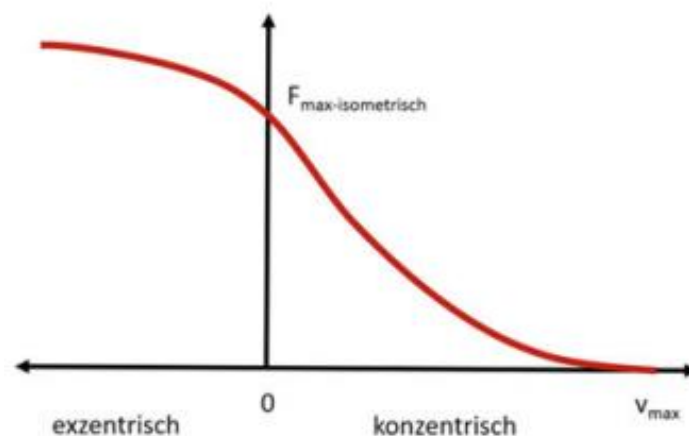


Abbildung 2: Kraftmodell mit exzentrisch, isometrisch und konzentrischem Verlauf
Quelle: Alt et al., 2023, S.14)

2.2.2 Die Kraft-Geschwindigkeits-Kurve in der Praxis / Die in Vivo-Beziehung

In-vivo-Messungen, also Messungen am lebenden Objekt, der F-V-Relation unterscheiden sich grundlegend von Untersuchungen an isolierten Muskelproben, da sie durch komplexe physiologische und biomechanische Störfaktoren beeinflusst werden.

Studien an einer isolierten Muskelprobe eines Froschmuskels deuten darauf hin, dass die F-V-Beziehung einer doppelten Hyperbel ähnelt (Edman, 1988). Dies könnte mit den kinetischen Eigenschaften der Myofilament-Kreuzbrückenbildung zusammenhängen.

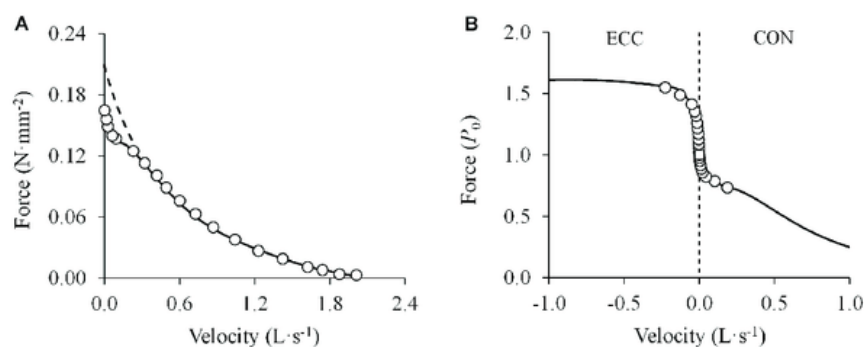


Abbildung 3: F-V-Beziehung der Frosch-Schienbeinmuskelfaser
Quelle: Alcazar et al., 2019, S.7

Alcazar et al. (2019) weisen darauf hin, dass die wissenschaftliche Diskussion zur genauen Form der F-V-Beziehung noch nicht abgeschlossen ist. Während die traditionelle Auffassung auf Hill (1938) zurückgeht, der die F-V-Beziehung als rechteckige Hyperbel beschrieb, kommen neuere Analysen zu anderen Ergebnissen. Alcazar et al. (2019) überprüften die Daten von Dern et al. (1947), die maximalen, explosiven Kontraktionen der Ellenbogenbeugemuskeln gegen unterschiedliche Widerstände untersuchten. Sie beobachteten, dass, wenn Ermüdungsversuche ausgeschlossen wurden, die Drehmomentwerte bei Belastungen über 40% eine nahezu lineare Beziehung zeigten, wohingegen bei geringeren Belastungen eine kurvilineare Form auftrat. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die F-V-Beziehung komplexer ist und möglicherweise je nach Belastungsbereich unterschiedliche Muster aufweist.

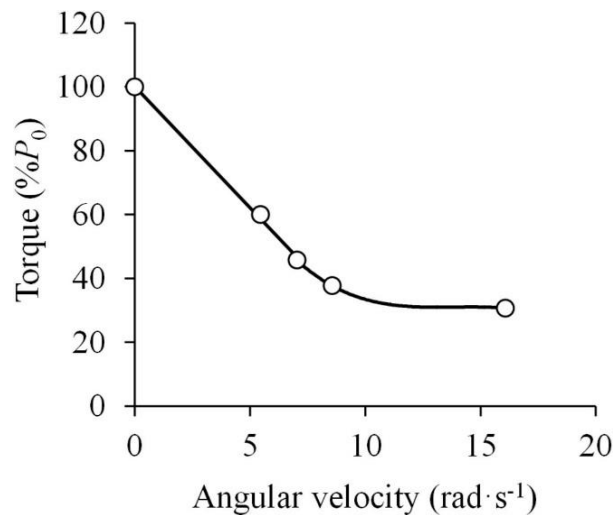


Abbildung 4: kurvilinearer Verlauf der F-V-Beziehung
Quelle: Alcazar et al., 2019, S.5

Während bei präparierten Muskelfasern (z. B. Frosch-Schienbeinmuskeln) unter kontrollierten Bedingungen primär die intrinsischen Myofilament-Eigenschaften erfasst werden, dominieren in lebenden Systemen neuromuskuläre Aktivierungsmuster (Alcazar et al., 2019; Hahn, 2008), dynamische Hebelarmänderungen (Alcazar et al., 2019; Bobbert, 2012) und elastische Sehneneigenschaften (Herzog et al., 2000; Rassier & Herzog, 2004).

In-vivo-Messungen der Kraft-Geschwindigkeits-Relation werden maßgeblich durch die eben beschriebenen biomechanischen und physiologischen Störfaktoren verzerrt, die in isolierten Muskelpräparaten nicht auftreten. Während hyperbolische F-V-Beziehungen (Hill, 1938) in vitro dominieren, zeigen Humanstudien an mehrgelenkigen Übungen scheinbar lineare Verläufe (Alcazar et al., 2018; Jaric, 2015).

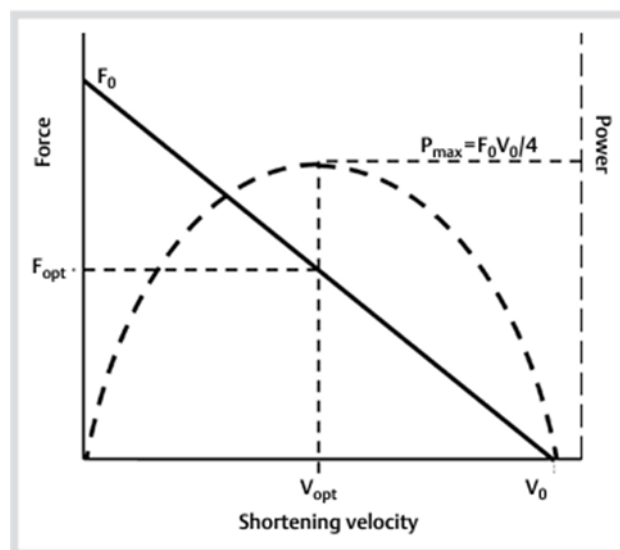


Abbildung 5: vereinfachte Darstellung der F-V-Beziehung inkl. Leistungsparabel
Quelle: Karic, 2015, S.700

Diese Diskrepanz lässt sich auf einige Mechanismen zurückführen:

Muskelphysiologische Veränderungen während der Testung:

Während konzentrischer Kontraktionen verändern sich die Momentarme (z. B. des M. quadriceps von 4,5 cm auf 3,2 cm bei Knieextension), was das Drehmoment um bis zu 29 % reduziert (Bobbert, 2012). Gleichzeitig verschieben sich die Sarkomerlängen außerhalb des optimalen Bereichs (2,5–2,8 μm), was die Aktin-Myosin-Überlappung um bis zu 13 % verringert, und die Spitzenkraft unterschätzt (Herzog et al., 2000; Reeves & Narici, 2003).

Methodische Limitationen:

Humanstudien erfassen typischerweise nur 40–90 % der maximalen isometrischen Kraft (P_0), wodurch hyperbolische Abweichungen bei Extremwerten ($<40\%$ oder $>90\%$ P_0) unentdeckt bleiben (Alcazar et al., 2018). Dieser Effekt wird durch neuromuskuläre Aktivierungsdefizite verstärkt: Selbst bei Maximalkraft erreichen Probanden selten $>95\%$ der motorischen Rekrutierung (Hahn, 2008).

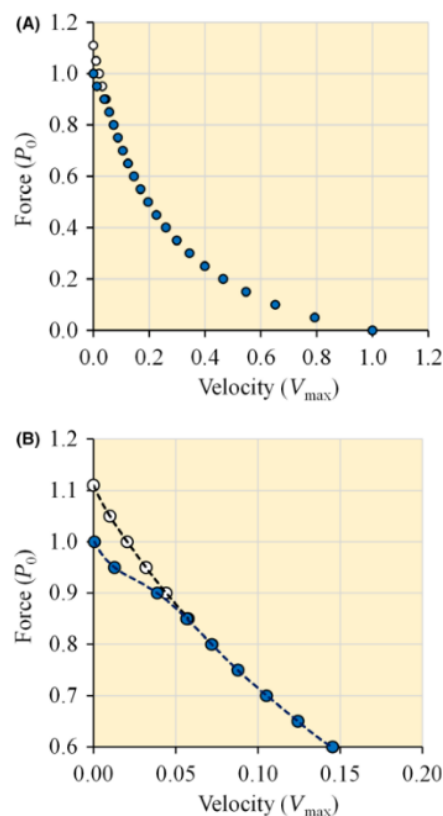


Abbildung 6: Testung am Menschen an der Beinpresse inkl. Abweichung bei hohen Kräften bzw. niedrigen Geschwindigkeiten
Quelle: Alcazar et al., 2018, S.2

2.2.3 Empfehlungen zur Ermittlung der F-V-Kurve in Vivo

Alcazar et al. (2019) spricht Empfehlungen aus, um die Standardisierung der Bewertung von F-V-Daten beim Menschen zu verbessern und somit auch letztlich eine einheitliche wissenschaftliche Ansicht zum Thema der Form der F-V-Kurve wiedergeben zu können:

- *Die ProbandInnen sollten mit dem Testablauf vertraut sein. Mindestens zwei Sitzungen für die konzentrische (Alcazar et al., 2018) und vier Sitzungen für die exzentrische (Hahn, 2008) F-V-Beziehung müssten erforderlich sein, um Ungenauigkeiten zu minimieren.*
- *Die F-V-Beziehung sollte, solange weitere Forschung nichts neues ergibt, in einem möglichst großen Bereich von Kräften und Geschwindigkeiten erhoben werden.*
- *Die Erfassung von F-V-Daten bei unterschiedlichen Gelenkwinkeln kann aufgrund variierender Muskellängen zu Verzerrungen führen, besonders bei konzentrischen Kontraktionen. Ultraschall zur Kontrolle der Muskellänge oder die Erfassung der Daten am Punkt der Spitzenkraft kann solche Verzerrungen minimieren (Fontana et al., 2014; Reeves & Narici, 2003).*
- *Um sicherzustellen, dass die Kraft- und Drehmomentwerte während der Muskelverlängerung korrekt erfasst werden, wird empfohlen, vor jeder exzentrischen Kontraktion einen Aktivierungszustand von mindestens 95% der isometrischen Kraft zu erreichen (Hahn, 2008).*

2.2.4 Ableitungen für die Leistungsdiagnostik / Die Leistungsparabel

Die von Alcazar et al. (2019) vorgeschlagenen Standardisierungen bilden die methodische Grundlage, um eine leistungsrelevante Information von Muskeln und Muskelsystemen unter zu Hilfenahme einer Leistungsparabel valide abzubilden. Nur durch präzise F-V-Daten, die über einen großen F-V-Bereich erhoben werden, lässt sich zum Beispiel ein optimaler Leistungsbereich von Sportler*innen exakt bestimmen.

Die Leistungsparabel veranschaulicht, wie sich die Leistung eines Muskels in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und dem Widerstand verändert. Typischerweise erreicht sie ihr Maximum bei mittleren Widerständen und Geschwindigkeiten, während bei sehr hohen oder niedrigen Widerständen eine geringere Leistung erzeugt wird. Seow & Seow (2022)

illustrieren die typische Form dieser Parabel: Die Leistung steigt zunächst mit zunehmendem Widerstand, bis ein Höhepunkt erreicht wird, und fällt danach bei weiter steigenden Widerständen wieder ab. Die Abbildung zeigt, dass die Muskelleistung durch das Zusammenspiel von Kraft und Geschwindigkeit bestimmt wird, wobei bei optimalem Widerstand eine maximale Leistung generiert werden kann. In der Trainingswissenschaft wird dieses Erkenntnis genutzt, um Trainingsprogramme so zu gestalten, dass Muskeln gezielt in einem Bereich trainiert werden, der die Leistung optimiert und somit die sportliche Leistung verbessert.

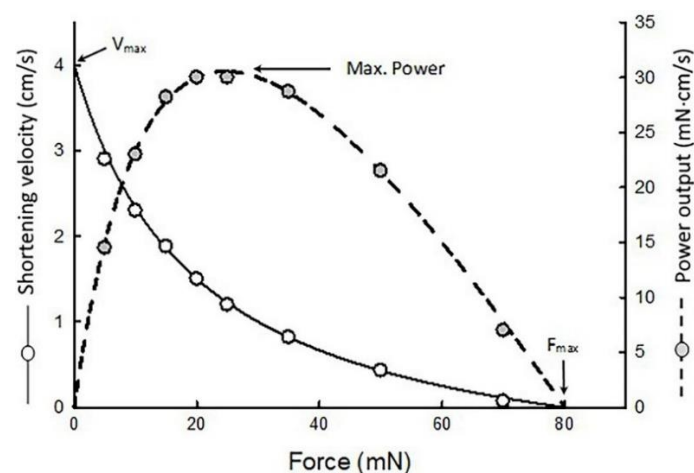


Abbildung 7: Die F-V-Kurve inkl. Leistungskurve (strichliert)
Quelle: Seow & Seow, 2022, S.3

Die F-V-Kurve erlaubt Ableitungen verschiedener Parameter, die wichtige Informationen über die muskuläre Leistungsfähigkeit liefern (Haff & Nimphius, 2012; Morin & Samozino, 2016):

Maximalkraft (F_{max}) Die theoretisch maximale Kraft, die ein Muskel bei null Geschwindigkeit erzeugen kann.

Maximalgeschwindigkeit (V_{max}) Die theoretisch maximale Geschwindigkeit, mit der sich ein Muskel bei null Last verkürzen kann.

Maximale Leistung (P_{max}): Die maximale Leistung, die ein Muskel erzeugen kann, typischerweise bei einer mittleren Kraft und Geschwindigkeit.

Diese Parameter können **normiert** werden, um die relativen Unterschiede in der Muskelkraft und -leistung zwischen verschiedenen Individuen und Altersgruppen zu berücksichtigen (Meylan et al., 2014).

2.2.5 Empfohlene Standardisierung von Kraft-Geschwindigkeits-Parametern im Kindes- und Jugendalter: Körpergewicht und biologische Reifung als Vergleichsbasis

Der aktuelle Forschungsstand betont, dass die Bewertung von Parametern wie maximaler F_{max} , P_{max} und V_{max} im Rahmen der F-V-Beziehung bei Kindern und Jugendlichen normiert auf das Körpergewicht erfolgen sollte, um alters- und entwicklungsbedingte Unterschiede valide vergleichen zu können. Besonders im Kindes- und Jugendalter, in dem das absolute Körperwachstum und die individuelle biologische Reifung stark variieren, bietet die Relativierung auf das Körpergewicht eine objektive Grundlage, um die tatsächliche muskuläre Entwicklung und Leistungsfähigkeit abzubilden (Meylan et al., 2014; Nikolaidis, 2012). So zeigen Studien, dass die relative Kraft bereits im Alter von 10 bis 12 Jahren um bis zu 25 % steigen kann, ohne dass eine signifikante Zunahme der Muskelmasse vorliegt – ein Hinweis darauf, dass neuronale Anpassungen und verbesserte intermuskuläre Koordination in dieser Phase dominieren (Meylan et al., 2014; Nikolaidis, 2012).

Mit dem Einsetzen der Pubertät, die durch hormonelle Veränderungen und einen Wachstumsschub gekennzeichnet ist, steigt die muskuläre Trainierbarkeit deutlich an. Menzi et al. (2007) konnten zeigen, dass Jugendliche zu Beginn pubertärer Veränderungen gezielt trainieren können, um die Entwicklung ihrer Muskelkraft zu optimieren, da in dieser sensiblen Wachstumsphase die Anpassungsfähigkeit des neuromuskulären Systems besonders hoch ist. Die Pubertät, die bei Mädchen meist zwischen dem 10. und 16. Lebensjahr und bei Jungen zwischen dem 12. und 18. Lebensjahr einsetzt, ist durch eine verstärkte Ausschüttung von Östrogenen bzw. Testosteron geprägt, was zu einer deutlichen Zunahme der Muskelmasse und -kraft, insbesondere bei Jungen, führt. Diese biologischen Unterschiede machen es notwendig, neben der Normierung auf das Körpergewicht auch die Einteilung der untersuchten Gruppen nach dem Reifestatus – etwa anhand der Peak-Height-Velocity (PHV) und dem damit verbundenen Maturity Offset (MO) – vorzunehmen, da das chronologische Alter allein keine zuverlässige Aussage über den biologischen Entwicklungsstand zulässt (Galantine et al., 2024; Yapici et al., 2022).

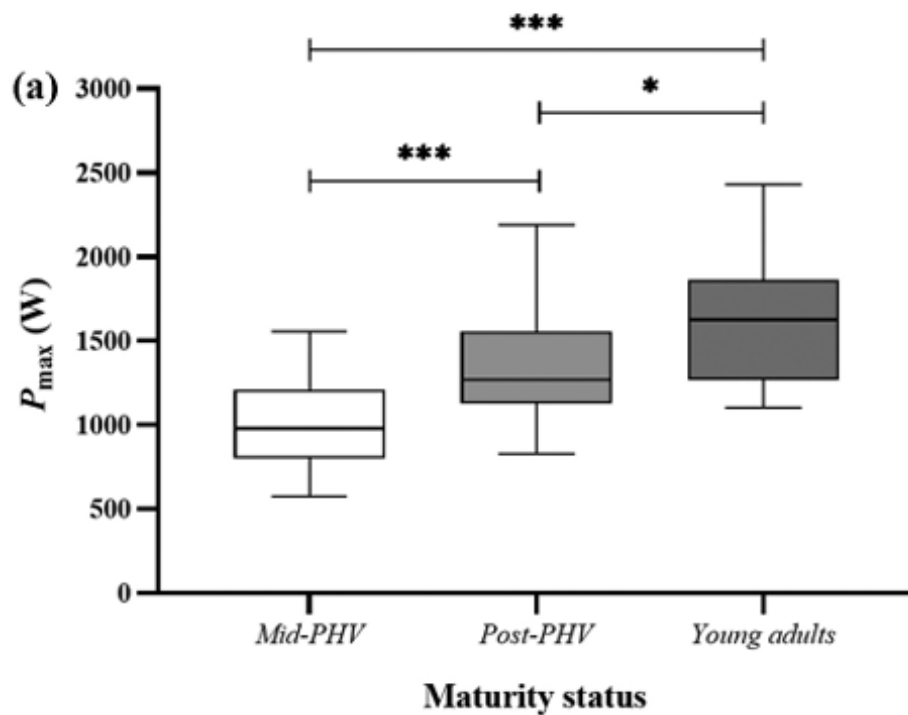


Abbildung 8: Zusammenhang des Reifestatus und der maximal erzeugten Kraft
Quelle: Galantine et al., 2024, S.808

Untersuchungen an jugendlichen Fußballspielern verdeutlichen, dass mit steigendem Alter sowohl die maximal erreichbare Geschwindigkeit als auch die aufgebrachte Kraft zunehmen, wobei ältere Athleten im Durchschnitt höhere Werte erzielen als jüngere (Nikolaidis, 2012). Gleichzeitig verschiebt sich mit zunehmendem Alter das Verhältnis von Geschwindigkeit zu Kraft zugunsten der Kraftentwicklung, was eine Anpassung der Trainingsschwerpunkte im Jugendalter nahelegt (Nikolaidis, 2012). Das F-V-Profil hat sich dabei als hilfreiches Instrument erwiesen, um die individuellen Entwicklungsverläufe während der Pubertät zu dokumentieren und gezielt Trainingsreize zu setzen, die den jeweiligen biologischen Reifegrad berücksichtigen (Meylan et al., 2015).

Aktuelle Studien unterstreichen, dass die Zuordnung zu Reifegruppen anhand der PHV und die Körpergewichtsnormierung entscheidend sind, um die tatsächlichen Leistungsunterschiede und Entwicklungspotenziale zwischen Kindern und Jugendlichen objektiv zu erfassen und Trainingsprogramme entsprechend anzupassen (Galantine et al., 2024; Yapici et al., 2022). Nur so lassen sich die komplexen Wechselwirkungen muskulärer Entwicklung zwischen Wachstum, Reifung und Training im Jugendalter wissenschaftlich erfassen.

2.3 Die Peak Height Velocity und der Maturity Offset

2.3.1 Definition der Peak Height Velocity und des Maturity Offset

Mirwald et al. (2002) entwickelten die Schätzmethode zur Bestimmung der körperlichen Reife, die eine nicht-invasive Herangehensweise darstellt. Der PHV dient der präzisen Ermittlung des Zeitpunkts des maximalen Längenwachstums des Körpers in der Kindheit entspricht, sowie der Bestimmung des zeitlichen Abstands bis zum Eintritt der PHV, was als MO bekannt ist. Die PHV-Messung ermöglicht eine Schätzung des Wachstumszeitpunkts mit einer Genauigkeit von +/- einem Jahr und wird in verschiedenen Bereichen angewendet, darunter zur Diagnose und Behandlung von Skelettwachstumsstörungen (Boeyer et al., 2018). Ebenso nutzte sie Lima et al. (2024), um die Entwicklung junger Athlet*innen zu bewerten.

Die PHV ist ein markanter Zeitpunkt im Leben eines Kindes und signalisiert eine Reihe hormoneller, physiologischer und anatomischer Veränderungen, die den Übergang in die Pubertät einleiten. Dieser Wachstumsschub tritt bei Mädchen normalerweise im Alter von 10 bis 12 Jahren (durchschnittlich 11,77 Jahre) und bei Jungen im Alter von 12 bis 14 Jahren (durchschnittlich 13,45 Jahre) auf. Die Dauer des Wachstumsprozesses variiert und kann von einigen Wochen bis zu mehreren Monaten reichen. Vor dem Eintritt in die Pubertät entwickeln sich Jungen und Mädchen in ähnlichem Tempo (Mirwald et al., 2002).

Laut Malina et al. (2004) beginnt die Phase der PHV mit einer schnellen und deutlichen Zunahme der Beinlänge, welche vorausgehend der Verlängerung des Rumpfes folgt. Diese raschen Veränderungen in der Anthropometrie, insbesondere im Verhältnis von Bein- und Rumpflänge, führen zwangsläufig zu einer Verschiebung der Proportionen zwischen Körpergröße und Körpergewicht. In der Folge resultiert diese Veränderung in einem Anstieg des Body-Mass-Index (BMI), der als Maß für die Körperzusammensetzung in diesem Entwicklungsstadium herangezogen wird.

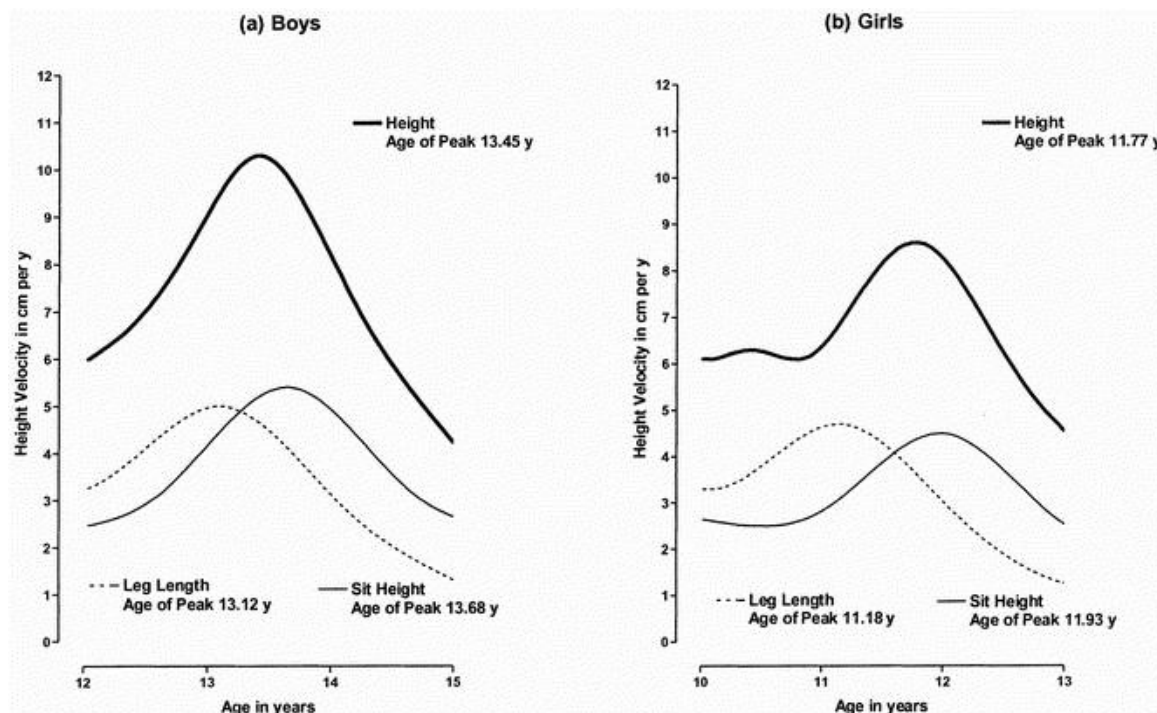


Abbildung 9: Entwicklung der PHV bei Jungen und Mädchen inkl. Beinlänge und Sitzhöhe
Quelle: Mirwald et al., 2002, S.690

Die London Bridge Medicine (LBS Movement, 2022) beschreibt signifikante Veränderungen rund um den Zeitpunkt der PHV:

Hormonell:

Mädchen produzieren Östrogen und Progesteron, Jungen Testosteron.

Sexuelle Merkmale:

Mädchen entwickeln Brüste und breitere Hüften, Jungen bekommen tiefere Stimmen und Muskelwachstum.

Wachstum:

Das Knochenwachstum beschleunigt sich, und die Muskelmasse nimmt zu.

Körperliche Merkmale:

Stärkere Zunahme an Stärke und Ausdauer bei Jungen, jedoch bleiben sie oft weniger flexibel als Mädchen.

2.3.2 Unterschiede der körperlichen Entwicklung zwischen trainierten und untrainierten Kindern

Die Meta-Analyse von Lima et al. (2024) untersuchte das Alter des PHV bei jungen männlichen Athleten und fand ein durchschnittliches PHV-Alter von 13,1 Jahren, welches je nach Sportart variierte. Eine Vielzahl an Studien konzentriert sich auf Fußballspieler, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Sportarten einschränkt. Zu berücksichtigen ist, dass das PHV bei jungen Athlet*innen in der Regel früher auftritt als bei Kindern der allgemeinen Bevölkerung, die nicht regelmäßig und intensiv Sport treiben. Dieses frühere Auftreten des Wachstumsschubs könnte auf die körperlichen Anforderungen und das intensive Training, das die jungen Athlet*innen absolvieren, zurückzuführen sein, da diese Faktoren die Reifung beschleunigen könnten.

Um die komplexen Veränderungen der muskulären Leistungsfähigkeit während des Wachstums und insbesondere rund um den Zeitpunkt des PHV adäquat zu erfassen, ist der Einsatz validierter und standardisierter Messmethoden unerlässlich. Während die Bestimmung des PHV und des MO wichtige Informationen über den biologischen Reifegrad liefern und damit die Einordnung individueller Entwicklungspfade ermöglicht (Malina et al., 2004; Mirwald et al., 2002), bedarf es zur objektiven Quantifizierung der Muskelkraft und ihrer Entwicklung spezifischer Testverfahren. In der sportwissenschaftlichen Forschung und der klinischen Praxis haben sich hierfür insbesondere laborbasierte Methoden wie die isokinetische Kraftmessung etabliert, da sie eine präzise und differenzierte Analyse der muskulären Leistungsfähigkeit über verschiedene Kontraktionsformen hinweg erlauben.

2.4 Methoden zur Feststellung muskulärer Entwicklungen im Kindes- und Jugendalter

Die Erfassung muskulärer Entwicklungen im Kindes- und Jugendalter umfasst sowohl laborbasierte als auch praxisnahe Feldmethoden.

2.4.1 Labormethoden: Isokinetische Messung als Goldstandard

Isokinetische Kraftmessungen gelten als Goldstandard in der objektiven Erfassung der Muskelkraft bei Kindern und Jugendlichen (Ayalon et al., 2000; Wiggin et al., 2006). Das Grundprinzip besteht darin, Bewegungen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit gegen einen variablen Widerstand auszuführen, wobei das System den Widerstand dynamisch anpasst, um die Geschwindigkeit über den gesamten Bewegungsumfang stabil zu halten (De Ste Croix et al., 2003). Dies ermöglicht die präzise Bestimmung der maximalen Kraftentfaltung in jedem Gelenkwinkel sowie die Erfassung konzentrischer, exzentrischer und isometrischer Muskelaktionen (Drouin et al., 2004).

Isokinetische Messungen zeichnen sich durch eine hohe Standardisierbarkeit und Zuverlässigkeit aus. In Studien mit Kindern wurden für die Kraftmessung der Knie- und Hüftmuskulatur sogenannte ICC-Werte (Intraklassen-Korrelationskoeffizienten) zwischen 0,79 und 0,96 festgestellt, besonders bei moderaten Winkelgeschwindigkeiten wie 60°/s (De Ste Croix et al., 2003; Kellis et al., 1999). Der ICC-Wert ist ein statistisches Maß, das angibt, wie ähnlich oder übereinstimmend die Messergebnisse sind, wenn eine Messung mehrfach oder von verschiedenen Personen durchgeführt wird. Ein Wert nahe 1 bedeutet, dass die Ergebnisse fast identisch sind und die Messung sehr zuverlässig ist. Werte im Bereich von 0,79 bis 0,96 zeigen also, dass die isokinetischen Messungen eine hohe Wiederholbarkeit und Verlässlichkeit aufweisen. Die Validität wurde durch signifikante Korrelationen mit funktionellen Parametern wie Sprunghöhe ($r = 0,72-0,85$) und Muskelquerschnitt ($r = 0,68-0,91$) bestätigt (Haff & Nimphius, 2012).

Ein entscheidender Vorteil isokinetischer Systeme ist die Erkennung muskulärer Dysbalancen. Seitenunterschiede von größer als 10 % im Kniestrecker-Drehmoment gelten als klinisch relevant und korrelieren mit einem erhöhten Verletzungsrisiko (Drouin et al., 2004). Zudem ermöglicht die Variation der Winkelgeschwindigkeiten (z. B. 60°/s für Maximalkraft, 240°/s für Schnellkraft) eine differenzierte Analyse muskulärer Eigenschaften (Maffiuletti et al., 2016).

Trotz dieser Vorteile weisen isokinetische Methoden Limitationen auf: Der hohe Gerätepreis (jenseits der 50.000 €), die begrenzte Verfügbarkeit spezialisierter Labore und der zeitliche Aufwand (mehr als 30 Minuten pro Testung) schränken ihre Praxistauglichkeit ein (Kellis et al., 1999). Zudem zeigt die Übertragbarkeit in die Realität Schwächen, da standardisierte Laborbedingungen nur begrenzt sportartspezifische Bewegungen abbilden (Haff & Nimphius, 2012). Studien belegen, dass die Motivation der Proband*innen – insbesondere bei Kindern unter 12 Jahren – die Ergebnisse signifikant beeinflussen kann (Schwankungsbreite um die Ergebnisse des Mittelwertes/CV-Wertes = 8–12 % bei ungeübten Testpersonen) (Maffiuletti et al., 2016).

Zusammenfassend bieten isokinetische Messungen unübertroffene Präzision, bleiben jedoch aufgrund ihrer Komplexität und Kosten primär Forschungswerkzeuge (Wiggin et al., 2006). Für Felduntersuchungen oder breit angelegte Screening-Programme im Kindes- und Jugendalter sind sie nur bedingt geeignet.

2.4.2 Feldmethoden: Sprungtests und die Kraftmessplatte

Meylan (2012) beschreibt die Abfolge von exzentrischen und darauffolgend konzentrischen Muskelaktionen als eine typische Bewegungsform im Athletiktraining. Diese Kombination, besser bekannt als **Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus (DVZ)**, ist ein wesentlicher biomechanischer Prozess, der in zahlreichen dynamischen Bewegungen wie Sprüngen,

Sprints und schnellen Richtungswechseln eine entscheidende Rolle spielt (Komi, 2000). Er besteht aus drei aufeinanderfolgenden Phasen:

Exzentrische Phase

Während dieser Phase wird der Muskel verlängert, während er gegen eine äußere Kraft arbeitet. Dies kann beim Absenken eines Gewichts oder bei einem schnellen Dehnen des Muskels geschehen. Diese Phase ist wichtig, um Energie in der Muskel-Sehnen-Einheit zu speichern und die Muskelfasern vorzubereiten.

Isometrische Phase

Diese Phase ist ein kurzer Übergangszeitraum, in dem der Muskel seine Länge beibehält, bevor die konzentrische Phase beginnt. Hier wird die im exzentrischen Teil gespeicherte elastische Energie kurzzeitig stabilisiert.

Konzentrische Phase

In dieser Phase verkürzt sich der Muskel, um eine Kraft auf die äußere Last auszuüben oder eine Bewegung zu erzeugen. Diese Phase nutzt die elastische Energie, die in der exzentrischen Phase gespeichert wurde, um die Effizienz und Kraft der Bewegung zu erhöhen.

Der DVZ ermöglicht es dem Körper, Bewegungen mit größerer Kraft und Effizienz auszuführen, indem er die gespeicherte elastische Energie nutzt.

Der **Counter-Movement-Jump (CMJ)** macht sich das Prinzip des DVZ zu Nutze, wobei verschiedene Werte ermittelt werden, die wichtige Informationen über die Leistungsfähigkeit und Explosivkraft von Personen liefern. Beim CMJ startet der/die Proband*in aus einer stehenden Position und nutzt dabei eine vorhergehende tiefe Hocke, um maximalen Antrieb zu erzeugen.

Die **Kraftmessplatte (KMP)** wird als Goldstandard unter den Sprungmesssystemen betrachtet und bietet eine äußerst präzise und zuverlässige Methode zur Erfassung dieser dynamischen Bewegungen, wie zum Beispiel dem CMJ (Eins-A-Coaching, 2023). Sie misst die aufgewendete Kraft mittels eines piezoelektrischen Kraftsensors und erlaubt es, eine Vielzahl an Parametern genau zu erfassen. Dazu gehört die Fmax, die Pmax, die Sprunghöhe, sowie die maximale Geschwindigkeit während des Absprunges (Vmax at take-off) (Merrigan et al., 2022).

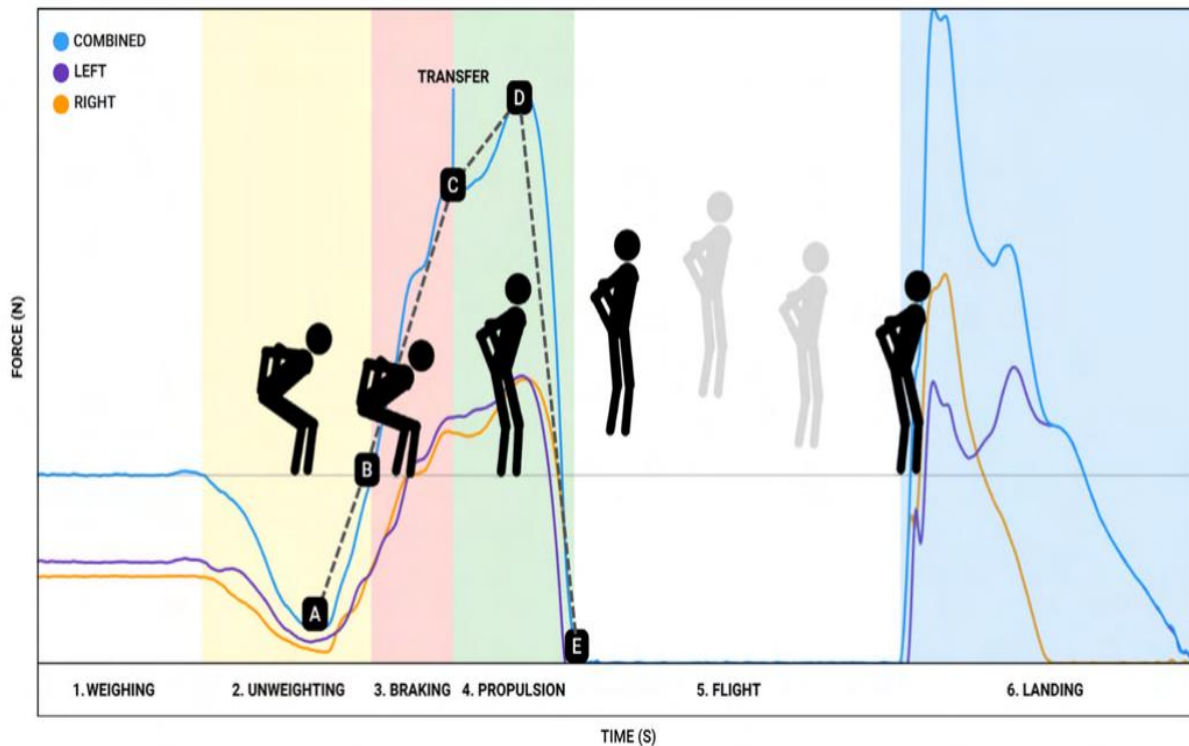


Abbildung 10: CMJ inkl. unilateraler Erfassung der Beinkraft
Quelle: Berberet et al., 2024, S.5

Feldmethoden wie der CMJ auf Kraftmessplatten haben sich als praktikable Alternativen zu laborbasierten Verfahren etabliert, um die muskuläre Leistungsfähigkeit im Kindes- und Jugendalter zu erfassen (Markovic et al., 2004). Studien zeigen außerdem, dass die Sprunghöhe signifikant mit der isokinetischen F_{max} korreliert ($r = 0,67-0,82$), insbesondere bei normierten Werten (F_{max}/KG ; (Meylan et al., 2015).

Die Vorteile von Feldmethoden liegen in ihrer Alltagsnähe, geringen Kosten und hohen Akzeptanz bei Kindern und Jugendlichen. Im Gegensatz zu komplexen Laborsystemen erfordern Sprungtests keine aufwendige Kalibrierung und können in Turnhallen oder Sportplätzen durchgeführt werden (King-Dowling et al., 2024), was eine große Anwendung im Breiten- und Leistungssport ermöglicht (Jones et al., 2021). Zudem erlauben sie die Erfassung sportartspezifischer Bewegungsmuster, etwa im Rahmen von Sprints oder Richtungswechseln, die in isokinetischen Tests nicht abgebildet werden können (Smajla et al., 2022).

Allerdings unterliegen Feldmethoden größeren Störeinflüssen. Technikvariabilität, Umgebungsfaktoren (z. B. Bodenbeschaffenheit) und motivationale Schwankungen können die Reliabilität der Ergebnisse beeinträchtigen ($CV = 6-12\%$; (Maffiuletti et al., 2016).

Trotz dieser Limitationen bieten CMJ-basierte Testungen wertvolle Einblicke in die muskuläre Entwicklung. Studien zeigen, dass normierte Parameter wie P_{max}/KG und F_{max}/KG altersunabhängige Vergleiche ermöglichen und somit die biologischen Reifungsprozesse isoliert betrachten können (Meylan et al., 2014; Samozino et al., 2012). So korrelieren normierte CMJ-Leistungswerte bei präpubertären Kindern stark mit isokinetischen Messungen ($r = 0,74-0,89$), während postpubertäre Jugendliche aufgrund hormonell bedingter Hypertrophie höhere absolute Kraftwerte zeigen (Meylan et al., 2015).

Ein direkter Vergleich von Feld- und Labormethoden lohnt sich, um zu prüfen, inwieweit vereinfachte Tests muskuläre Entwicklungen abbilden können, die bisher nur im Labor quantifiziert wurden. Beispielsweise könnte die normierte F_{max} aus dem CMJ Aufschluss darüber geben, ob Kinder während der Pubertät nicht nur proportional zum Körpergewicht, sondern darüber hinaus stärker werden – ein Phänomen, das in isokinetischen Studien nachgewiesen wurde (Seger & Thorstensson, 2000). Ebenso lässt sich die Entwicklung der neuromuskulären Koordination über die Rate of Force Development (RFD) im CMJ analysieren, die bei Jugendlichen nach dem PHV signifikant ansteigt (Morin & Samozino, 2016).

Zukünftige Forschung sollte daher untersuchen, ob normierte Leistungsparameter (P_{max}/KG , F_{max}/KG , V_{max} at takeoff) aus Feldtests ähnliche Entwicklungsmuster zeigen wie laborgestützte Messungen. Dies würde nicht nur die Validität von Feldmethoden stärken, sondern auch langfristige Monitoring-Programme ermöglichen, um individuelle Entwicklungen während sensibler Wachstumsphasen zu beobachten.

2.5 Stand der Forschung und Forschungslücke

Längsschnittstudien belegen, dass präpubertäre Kinder ihre Muskelkraft primär proportional zum Körpergewicht entwickeln, ohne qualitative neuromuskuläre Verbesserungen (De Ste Croix et al., 2003; Seger & Thorstensson, 2000). Isokinetische Messungen zeigen, dass die F_{max} im Alter von 10–13 Jahren linear mit der Körpermasse korreliert ($r = 0,82-0,91$), während die F_{max}/KG stabil bleiben ($p > 0,05$; (Meylan et al., 2015). Diese Befunde deuten auf einen rein morphologischen Anpassungsmechanismus hin: Kinder werden stärker, weil sie schwerer werden – nicht aufgrund von Hypertrophie oder verbesserter neuromuskulärer Effizienz.

Die unveröffentlichte Querschnittstudie von Reznar & Bogoevski (2022) bestätigt dieses Muster in einem Laborsetting. Bei 52 präpubertären Jungen (10–14 Jahre) stieg die isometrische Maximalkraft (T_0) zwischen der jüngsten (Gruppe 1: 131 ± 33 Nm) und ältesten Altersgruppe (Gruppe 3: 228 ± 40 Nm) signifikant an ($F(2,51) = 31,83$; $p < 0,001$). Doch nach Normierung auf das Körpergewicht verschwanden diese Unterschiede vollständig (rel_T_0 : $3,54 \pm 0,65$ vs. $3,89 \pm 0,49$ Nm/kg; $p = 0,216$). Auch die P_{max} zeigte nur in absoluten Werten

einen Anstieg (+62 % von Gruppe 1 zu 3; $p < 0,001$), nicht aber normiert (rel_Pmax : $21,4 \pm 2,6$ vs. $21,9 \pm 1,9$ W/kg; $p = 0,672$).

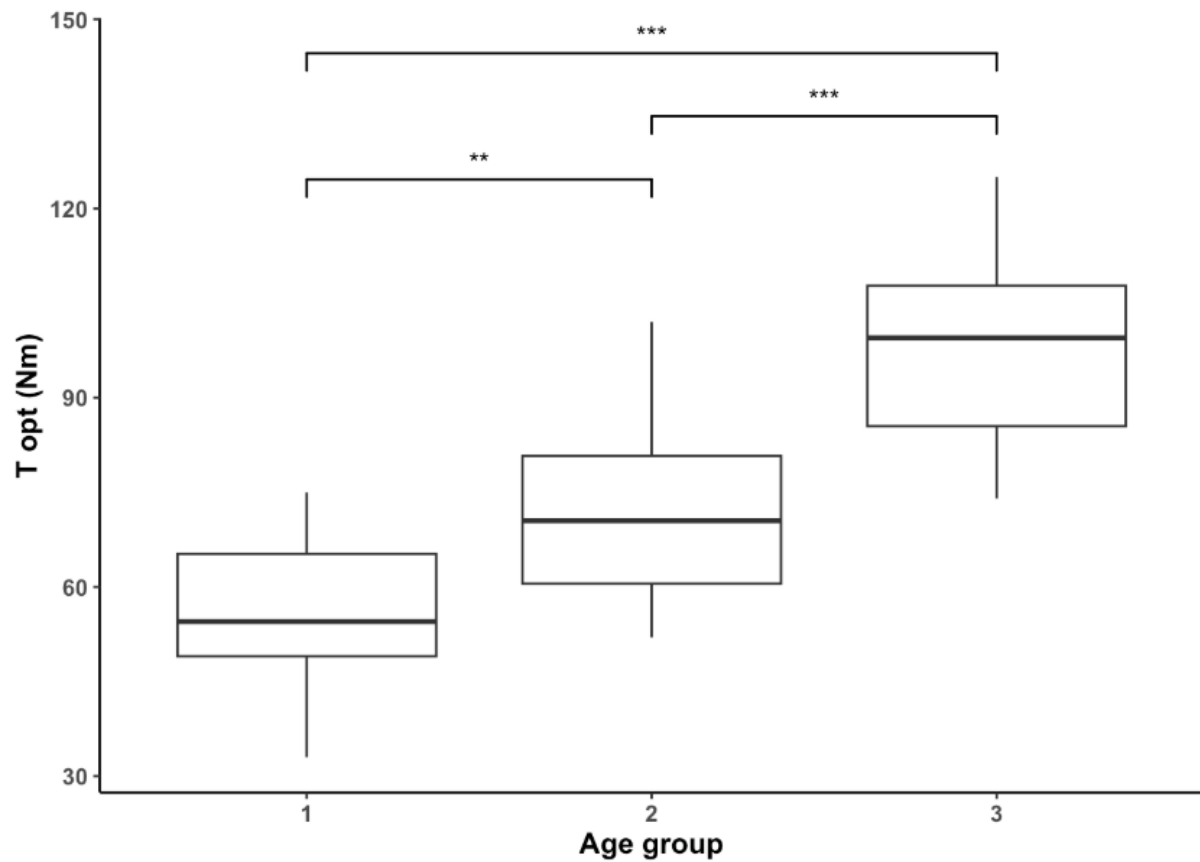


Abbildung 11: Unterschiede der isometrischen Maximalkraft
Quelle: Reznar & Bogoevski 2022

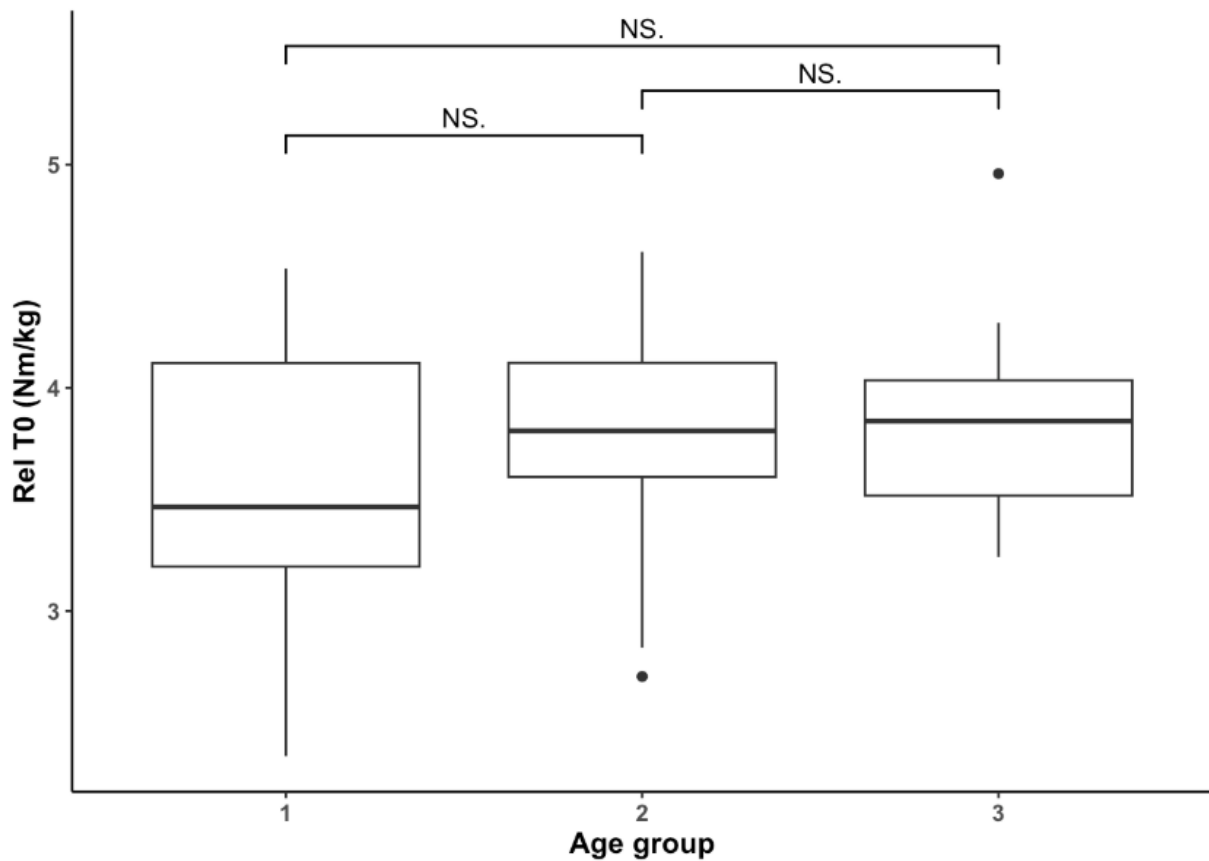


Abbildung 12: Unterschiede isometrische Maximalkraft normiert auf das Körpergewicht
Quelle: Reznar & Bogoevski, 2022

Kritisch ist die fehlende Entwicklung der Kontraktionsgeschwindigkeit (V_0): Trotz Alterszunahme blieb V_0 in allen Gruppen unverändert (529 ± 207 vs. 507 ± 219 °/s; $p = 0,728$). Dies unterstreicht, dass präpubertäre Kraftzuwächse ausschließlich auf Massenzunahme zurückgehen – ein Befund, der sich mit früheren Längsschnittdaten deckt (Lloyd & Oliver, 2012).

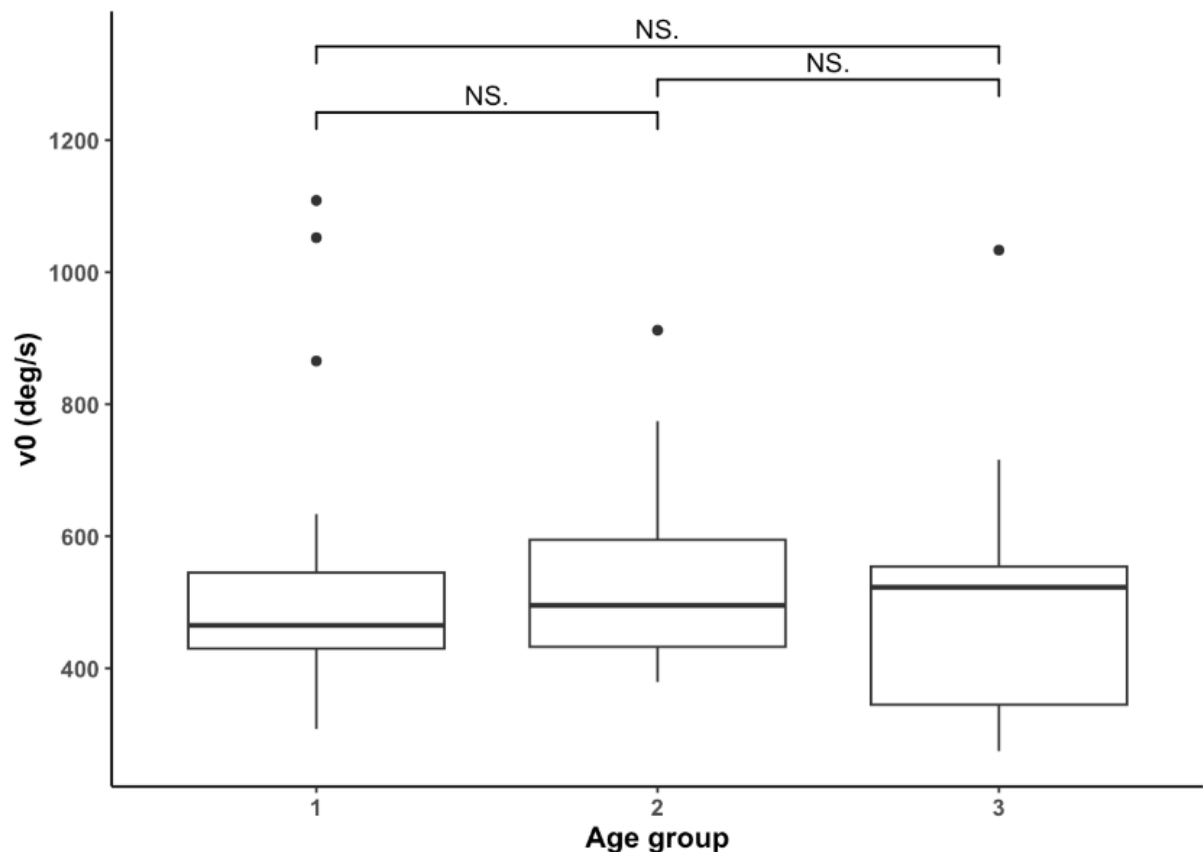


Abbildung 13: Unterschiede der maximal möglichen Geschwindigkeit über die Altersgruppen
Quelle: Reznar & Bogoevski, 2022

Die Querschnittstudie von Reznar & Bogoevski (2022) bestätigt, dass trotz signifikanter absoluter Kraftzuwächse (+14 % isometrische Maximalkraft) bei Jungen im Alter von 10–14 Jahren alle Unterschiede nach Normierung auf das Körpergewicht verschwinden. Selbst die Pmax stieg nur absolut, nicht jedoch normiert.

Diese Ergebnisse unterstreichen, dass präpubertäre Kraftentwicklung primär durch Massezunahme getrieben ist – ein Muster, das Feldmethoden wie der CMJ theoretisch abbilden sollten, sofern sie normierte Parameter (F_{max}/KG , P_{max}/KG) beleuchten.

Tatsächlich korrelieren CMJ-basierte Kraftwerte stark mit isokinetischen Messungen wenn sie auf das Körpergewicht normiert werden (Meylan et al., 2015). Gleichzeitig fehlt präpubertär jede Entwicklung der Kontraktionsgeschwindigkeit welche zum Beispiel bei einem CMJ die Vmax at take off beschreiben würde. Das bedeutet, dass auch sportmotorische Tests wie Sprints oder Sprünge keine Geschwindigkeitszuwächse erfassen sollten, solange keine Pubertätseffekte vorliegen. **Diese Erkenntnisse legen nahe, dass Feldtestungen vergleichbare Aussagen zur muskulären Entwicklung der gleichen Versuchsgruppe wie der isokinetische Goldstandard liefern sollten, sofern, die Leistungsdaten auf das**

Körpergewicht normiert sind und der biologischer Reifegrad mittels PHV/MO wird berücksichtigt (Lloyd & Oliver, 2012).

2.6 Zielsetzung und Forschungsfrage

Vor dem Hintergrund der dargestellten Forschungslücke zielt diese Arbeit darauf ab, die Validität der Feldtestung „CMJ auf der KMP“ zur Erfassung der muskulären Entwicklung den Ergebnissen am Isokineten gegenüberzustellen. Basierend auf den Ergebnissen der unveröffentlichten Querschnittstudie von (Reznar & Bogoevski, 2022), die im Labor mittels Isokineten keine Leistungssteigerungen präpubertärer Kinder nach Normierung auf das Körpergewicht nachweisen konnte, soll mit der gleichen Stichprobe untersucht werden, ob die Feldmethode ähnliche Muster abbilden können. Konkret geht es darum, zu prüfen, ob die normierten Kraft-Geschwindigkeits-Parameter (F_{max}/KG , P_{max}/KG), sowie die V_{max} at take off aus dem CMJ vergleichbare Aussagen zur Muskelentwicklung liefern wie der isokinetische Goldstandard.

Die zentrale Forschungsfrage lautet:

Kann eine Feldtestung (CMJ auf KMP) die muskuläre Entwicklung von Kindern im Alter von 10–13 Jahren ähnlich valide abbilden wie der isokinetische Goldstandard?

Zur Beantwortung dieser Frage werden folgende Teilaspekte analysiert:

- Einfluss des biologischen Reifegrads (PHV, MO) durch Erstellung von Altersgruppen
- Vergleich der isokinetischen Maximalkraftwerte am Isokinet (T_0) und der Maximalkraft auf der Kraftmessplatte beim CMJ (F_{max}), sowie beide Werte über die Altersgruppen normiert auf das Körpergewicht (T_0/Kg bzw. F_{max}/Kg).
- Vergleich der maximalen Leistungswerte normiert auf das Körpergewicht (P_{max}/kg) – dem Gegenüber die Peak Power normiert auf der Kraftmessplatte
- Vergleich der maximalen Kontraktionsgeschwindigkeit am Isokineten (V_0), gegenüber der V_{max} at take-off auf der Kraftmessplatte (V_{max} at take-off)

Präpubertäre Kinder zeigten keine signifikanten Veränderungen der normierten Kraft- und Leistungswerte (F_{max}/KG , PeakPower), da ihre Muskelentwicklung proportional zum Körpergewicht verläuft. Gleichzeitig bleibt die Kontraktionsgeschwindigkeit (V_0 at take-off) unverändert, unabhängig vom verwendeten Testverfahren.

Die praktische Relevanz dieser Arbeit liegt in der Entwicklung eines standardisierten Feldtest-Protokolls, welches ermöglicht, muskuläre Entwicklungen auch außerhalb von Laboren zu beobachten. Sollte der CMJ auf der KMP ähnliche Erkenntnisse wie auf dem Isokineten zeigen, könnten kostengünstige und zugängliche Feldmethoden langfristig die Grundlage für alters- und reifegradangepasste Beobachtungsprogramme bilden – insbesondere in der sensiblen Phase der Präpubertät, in der gezielte Interventionen langfristige Leistungsentwicklungen fördern (Behringer, 2017; Lloyd & Oliver, 2012).

Methodisch stützt sich die Arbeit auf die bereits durchgeführte isokinetische Testung derselben Stichprobe, ergänzt durch CMJ-Messungen auf einer Kraftmessplatte. Durch den direkten Vergleich beider Methoden wird überprüft, ob Felddaten die laborgestützten Erkenntnisse zur rein gewichtsabhängigen Kraftentwicklung replizieren.

3 Methodik

3.1 Studiendesign

Die vorliegende Studie befasst sich mit der Gegenüberstellung von Laborergebnissen zu Feldtestungen auf der Kraftmessplatte (3D Kraftmessplatte, Kistler GmbH, Wien, Österreich). Es wurden Kraft- und Sprunghöhen-Werte erhoben und mittels Aufteilung in Altersgruppen analysiert und verglichen.

Insgesamt nahmen 67 Kinder im Alter von 10 bis 14 Jahren an der Studie teil, darunter 12 Mädchen und 55 Jungen, die unterschiedliche Entwicklungsstadien repräsentieren. Diese Kinder wurden sorgfältig ausgewählt und waren in einem breiten Spektrum sportlich aktiv, wobei jedoch keine sportliche Vorerfahrung Voraussetzung für die Teilnahme war. Die Datenerhebung fand im Trainingswissenschaftlichen Labor der Universität Wien statt, welches am Institut für Sport- und Bewegungswissenschaft angesiedelt ist und optimale Laborbedingungen für diese Art von Untersuchungen bietet.

Die in dieser Studie erfassten Messdaten zu den körperlichen Leistungsparametern wurden einmalig und ohne weitere Intervention erfasst, wodurch der aktuelle physische Zustand der Teilnehmer präzise abgebildet werden konnte. Mittels standardisierter Testverfahren wurde eine Vielzahl von Leistungsmerkmalen erhoben, um differenzierte Erkenntnisse zu erlangen, wie sich die körperliche Leistungsfähigkeit in den verschiedenen Stadien der körperlichen und biologischen Reifung entwickelt. Ein wesentlicher Schwerpunkt der Untersuchung lag auf der Analyse der Korrelationen zwischen verschiedenen Leistungsdaten wie Muskelkraft, Sprungkraft, Körpergewicht und Größe sowie dem Reifegrad der Kinder, um ein umfassendes Bild der physischen Entwicklung zu gewinnen.

3.2 Teilnehmer*innen

Die erste Rekrutierungsversuch von Teilnehmer*innen erfolgte über Schulen, jedoch konnten durch die Testung außerhalb der Schule keine Teilnehmer*innen für die Studie gewonnen werden. Im zweiten Anlauf wurde der Fokus auf umliegende Sportvereine gelegt - primär Fußball- und Turnvereine. Den Vereinen wurde die Testbatterie als aktuelle Leistungsüberprüfung in den Wintermonaten vorgestellt, in denen keine Saisonspiele stattfanden. Darüber hinaus hatten die Erziehungsberechtigten die Möglichkeit, die erhobenen Daten nach Abschluss der Tests individuell anzufordern.

Die Teilnahme an der Studie unterlag bestimmten Ausschlusskriterien. Die Teilnehmer mussten zum Testzeitpunkt zwischen 10 und 14 Jahren alt sein, gesundheitlich in gutem Zustand sein und mindestens eine Stunde für die Testbatterie sowie die Anfahrt einplanen. Des Weiteren war die Unterzeichnung der TeilnehmerInnen sowie der Einwilligungserklärung

erforderlich. Mit ihrer Unterschrift erklärten sich sowohl die Erziehungsberechtigten als auch die Teilnehmer*innen bereit, an der Studie teilzunehmen. Zudem stimmte der/die Proband*in durch ihre Unterschrift zu, dass die im Rahmen der Studie erhobenen Daten aufgezeichnet und ausgewertet werden.

Die Stichprobe zeigte durch Umstellung des Rekrutierungsprozesses von Schulen auf Sportvereine gezwungenermaßen einen erhöhten Anteil an Kindern mit mehreren Sportstunden außerhalb des regulären Turnbetriebes an der Schule. Die untenstehende Tabelle verdeutlicht den erhöhten Anteil an sportbegeisterten Teilnehmer*innen. Die Informationen zur Mitgliedschaft in einem Sportverein wurden zusätzlich im Masterfile aufgezeichnet und stellen nur eine grobe Einteilung dar. Die Informationen wurden nicht für die wissenschaftliche Auswertung genutzt.

sportliche Betätigung z.TzP	Mädchen	gültige %	kumm. %	Jungen	gültige %	kumm. %
Kein Mitglied in einem Sportverein	3	25,00	25,00	12	21,82	21,82
Mitglied in einem Sportverein (Trainings & Wettkämpfe 2-3x die Woche)	2	16,67	41,67	25	45,45	67,27
Mitglied in einem Sportverein (Trainings & Wettkämpfe 4-5x die Woche)	7	58,33	100,00	18	32,73	100,00
Summe	12	100,00	100,00	55	100,00	100,00

Tabelle 1: sportliche Betätigung der Teilnehmer*innen zum Testzeitpunkt

Das Ziel 50 Buben und 50 Mädchen im Alter von 10 – 14 Jahren zu testen, sowie etwa 10 Kinder pro Jahrgang und biologischem Geschlecht wurde somit nicht erreicht. Es wurden weitaus mehr Buben (55) als Mädchen (12) der Testung unterzogen.

Im Rahmen der Studie stellte sich heraus, dass unter den Probanden kein 14-jähriger Junge vertreten war. Die Rekrutierung von Jungen in diesem Alter erwies sich als herausfordernd, da die Pubertät oft mit veränderten Interessen und Prioritäten einhergeht. Darüber hinaus wurde während des Rekrutierungsprozesses beobachtet, dass Jugendliche in diesem Alter häufig nicht mehr von ihren Eltern begleitet wurden. Diese Beobachtung könnte ebenfalls auf die Schwierigkeiten bei der Rekrutierung älterer Jungen hinweisen, da die Eltern die Freizeitgestaltung ihrer Jugendlichen in dieser Phase des Heranwachsens zunehmend weniger beeinflussen und die Jugendlichen selbstständigere Entscheidungen treffen. In Kapitel 4 Ergebnisse wird noch näher auf die Auswertung der erfassten Daten eingegangen.

3.3 Versuchsbedingungen und Materialien

Die Studie wurde in Laborsettings im Trainingswissenschaftlichen Labor der Universität Wien, am Institut für Sport- und Bewegungswissenschaft, durchgeführt. Folgende Materialien und Geräte wurden verwendet:

- Kraftmessplatte: 3D Kraftmessplatte, Kistler GmbH, Wien, Österreich
- Fahrrad Heimtrainer: Bike Speed 5, Kettler, Frankfurt, Deutschland
- Software: Myoresearch MR3, Noraxon, Scottsdale, AZ
- Stadiometer mit Waage: Seca 216 (Stadiometer) und Seca 877 (Waage), Seca, Hamburg, Deutschland
- Hocker: ohne Lehne, 44cm Sitzhöhe

3.4 Messverfahren

Die Teilnehmer*innen wurden zunächst den anthropometrischen Messungen unterzogen. Hierbei wurden die Proband*innen in Kleidung gewogen und ihre Körpergröße mithilfe eines geeichten Stadiometers präzise gemessen. Alle erhobenen anthropometrischen Daten wurden direkt und anonymisiert in eine zentrale Masterdatei (Excel, Word, 2019) übertragen, die als Grundlage für die spätere Datenanalyse diente. Die Angaben zu Gewicht und Körpergröße wurden in Kilogramm bzw. Zentimeter erfasst, um eine einheitliche und genaue Darstellung der Daten sicherzustellen.

Im Anschluss an die Messungen wurde ein fünfminütiges Aufwärmprogramm auf dem Fahrradergometer durchgeführt. Die Belastung betrug dabei eine vorgegebene Wattzahl von 1 Watt pro Kilogramm Körpergewicht der Proband*innen, um eine angemessene Aktivierung der Beinmuskulatur, sowie verbesserte Blutzirkulation zu erreichen. Direkt nach dem Aufwärmen folgte der Test der Sprungleistung. Die Proband*innen führten fünf aufeinanderfolgende CMJ auf der Kraftmessplatte aus. Die Wahl des CMJ als Messmethode erfolgte aufgrund seiner Eignung zur Erfassung der Sprungkraft und der muskulären Leistungsfähigkeit unter standardisierten Bedingungen. Zur Erhöhung der Validität und Reliabilität der gemessenen Sprungwerte wurden die Proband*innen im Vorfeld umfassend instruiert, wobei ihnen die Funktionsweise der Kraftmessplatte detailliert erklärt wurde. Dieser Ablauf umfasste die korrekte Durchführung der einzelnen Sprungphasen, wie das kontrollierte Wiegen in der Ausgangsposition, der Absprunghase und der abschließenden Landung. Zusätzlich wurde ein Probesprung zur Eingewöhnung und Technikoptimierung durchgeführt. Der beste Sprungversuch aus der Messreihe wurde anschließend für die Hauptanalyse verwendet, da er die Sprungkraft und damit das maximale Leistungsniveau der Probanden am besten widerspiegelte.

3.5 Ablauf der Datenerhebung

Erfassung der anthropometrischen Daten

Die Messungen der anthropometrischen Daten erfolgten nach standardisierten Protokollen, um eine hohe Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Daten sicherzustellen.

Größe und Gewicht

Größe und Gewicht der Kinder wurden mit einer Personenwaage inkl. Messstabes gemessen (Modell: Personenwaage BEK+C035X0400300-BODYBY). Dabei wurden die Kinder ohne Schuhe und in Sportbekleidung auf die Waage gestellt. Die Größe wurde in Zentimetern und das Gewicht in Kilogramm erfasst.

Sitzhöhe

Die Sitzhöhe wurde unter Verwendung eines Hockers gemessen. Die Kinder wurden angewiesen, gerade auf dem Hocker zu sitzen, wobei der Hinterkopf die Messtange berühren musste. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass das Auge und das Ohrloch horizontal auf einer Höhe lagen. Nach einem tiefen Einatmen wurde die Sitzhöhe am Maßband abgelesen und ebenfalls in Zentimetern notiert.

Aufwärmprogramm

Nach der Erhebung der anthropometrischen Daten absolvierten die TeilnehmerInnen standardisiertes Aufwärmprogramm auf dem Heimtrainer. Die Höhe des Sattels konnte von den ProbandInnen individuell eingestellt werden. Der Widerstand des Ergometers wurde auf der Grundlage von 1 Watt pro Kilogramm Körpergewicht eingestellt. Da das gemessene Körpergewicht nicht immer zu exakt einstellbaren Werten auf dem Ergometer führte, wurde der Widerstand auf den nächsthöheren 10-Watt-Schritt aufgerundet. Die Aufwärmphase dauerte fünf Minuten, wobei die ProbandInnen eine konstante Trittfrequenz einhielten.

Messung der CMJs

Für die Erfassung der Sprunghöhe mittels CMJ wurde das entsprechende Programm auf dem Computer eingerichtet und die richtige Hardware, dem Fall die Kraftmessplatte, ausgewählt. Vor Beginn der Messungen wurde den Teilnehmer*innen der Ablauf anhand eines Demonstrationssprungs erklärt. Dabei wurden sie angewiesen, die Hände in die Hüften zu stützen und sicherzustellen, dass sie nach der Landung mittig auf der Platte stehen bleiben, ohne von dieser herunterzusteigen. Um ein maximales Sprungergebnis zu erzielen, sollten die ProbandInnen bei jedem Sprung ausreichend tief in die Knie gehen und mit der Vorstellung springen, "mit dem Kopf durch die Decke" zu stoßen.

Nach einem Probedurchgang folgte die eigentliche Testphase mit fünf Sprüngen, zwischen denen jeweils eine Pause von 30 Sekunden eingehalten wurde. Gewertet wurden

ausschließlich korrekt ausgeführte Sprünge, wobei für die Auswertung der beste von den fünf Versuchen herangezogen wurde.

3.6 Datenanalyse

Die erhobenen anthropometrischen Daten wurden umfassend und systematisch in einer Masterdatei in Excel (Microsoft, 2021) organisiert, um eine präzise und übersichtliche Datengrundlage für die anschließende Analyse zu gewährleisten. Für jede teilnehmende Person wurde zunächst eine eindeutige Identifikationsnummer (ID) vergeben, die mit der Zahl 1 begann und für jede neue Eintragung fortlaufend erhöht wurde. In das Masterfile wurden detaillierte Variablen aufgenommen, darunter der exakte Testzeitpunkt (Datum in DD.MM.JJJJ-Format), das Alter der Proband*innen in Jahren, das aktuelle Körpergewicht (in Kilogramm), die Körpergröße (in Zentimetern) und die Oberkörperlänge (in Zentimetern). Zusätzlich wurden Geburtsdatum (DD.MM.JJJJ), Geschlecht und das exakte Alter zum Zeitpunkt der Testung erfasst, um eine bestmögliche Grundlage für alters- und geschlechtsspezifische Auswertungen zu schaffen. Weiterhin wurden wichtige Entwicklungsmarker, wie der Zeitpunkt des PHV und MO, sorgfältig dokumentiert, da sie essenzielle Kennzahlen für die Entwicklung und den Wachstumsfortschritt darstellen und Aufschluss über den Reifegrad der Kinder liefern.

Für die Auswertung der CMJ-Daten wurde die Sprunghöhe auf Basis des Kraftstoßes berechnet, wobei diese Berechnung mithilfe der Computersoftware direkt durchgeführt wurde. Die gewonnenen Ergebnisse der Sprungkraftmessungen wurden dann wiederum in das zentrale Masterfile übertragen, um alle Daten in einem einzigen, kohärenten Datensatz verfügbar zu haben. Zusätzlich zu den Sprunghöhen erfasste das Masterfile auch die maximal erzielte Kraft (in Newton) und die maximale Leistung (in Watt) bei den Sprüngen, da diese Parameter eine umfassendere Bewertung der muskulären Leistungsfähigkeit ermöglichen und differenzierte Einblicke in die körperliche Leistungsfähigkeit der Proband*innen bieten.

Für die statistische Analyse der gesammelten Daten wurde in erster Linie eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt, um die Unterschiede zwischen den Gruppen auf Signifikanz zu prüfen. In Fällen, in denen die Überprüfung der Normalverteilung der Daten eine Abweichung ergab, wurde als nichtparametrisches Verfahren der Kruskal-Wallis-Test angewendet, um die Robustheit der Ergebnisse sicherzustellen. Alle statistischen Berechnungen und Auswertungen wurden mit der Software SPSS Statistics 19 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) durchgeführt. Für alle Tests wurde ein Signifikanzniveau von 5% festgelegt ($\alpha = 0.05$), um eine verlässliche Interpretation der Ergebnisse zu gewährleisten und die statistische Aussagekraft der Studie zu maximieren.

3.7 Ethik und Datenschutz

Am 17. April 2022 wurde bei der Ethikkommission der Universität Wien ein Antrag zur Durchführung der Studie eingereicht. Dieser umfasste ein detailliertes Studiendesign, die Zielsetzung, Informationen zu den Studienteilnehmer*innen sowie Aspekte des Datenschutzes und potenzieller Folgen für die Beteiligten. Die Ethikkommission erteilte am 1. Juni 2022 ihre Zustimmung zur Durchführung der Studie. Der Beschluss ist unter „9. Anhang“ in der Arbeit zu finden.

Vor Beginn der Studie erhielten alle Teilnehmer*innen eine ausführliche schriftliche Einverständniserklärung, die umfassende Informationen zur Studie bereitstellte und deren Bedeutung verdeutlichte. Die Einverständniserklärung umfasste detaillierte Erläuterungen zum Zweck und den Zielen der Studie sowie zu den verschiedenen Untersuchungsabschnitten und dem Ablauf der Testungen. Neben einer Darstellung des erwarteten Nutzens für die Forschung und die Gesellschaft wurden auch die potenziellen Vorteile für die Teilnehmenden selbst angesprochen.

Zusätzlich enthielt die Erklärung genaue Angaben zu möglichen Risiken, Begleiterscheinungen und Beschwerden, die während der Teilnahme auftreten könnten. Ebenfalls gab es Hinweise auf mögliche Veränderungen im Lebensrhythmus der Teilnehmenden und deren Verpflichtungen, die sich durch die Teilnahme ergeben könnten. Es wurde auch auf die Bedingungen hingewiesen, unter denen die Teilnahme vorzeitig beendet werden könnte, zum Beispiel im Fall von gesundheitlichen Problemen oder falls die Teilnehmenden die Studie aus persönlichen Gründen nicht weiter fortsetzen möchten.

In Bezug auf die Datenerhebung und den Datenschutz wurden die Teilnehmer*innen eingehend darüber informiert, dass alle gesammelten Daten anonymisiert und streng vertraulich behandelt würden. Die Einverständniserklärung umfasste Informationen zur geplanten Verwendung der Daten, zur Anonymisierung und zu den Maßnahmen zum Schutz der Privatsphäre der Teilnehmenden. Außerdem wurde explizit auf eventuelle Kosten hingewiesen, die mit der Teilnahme verbunden sein könnten, ebenso wie auf etwaige Kostenerstattungen oder Vergütungen, die im Rahmen der Studie vorgesehen waren.

Um sicherzustellen, dass alle Teilnehmenden den Inhalt der Einverständniserklärung vollständig verstanden hatten, stand eine Ansprechperson zur Verfügung, an die sich die Teilnehmenden jederzeit bei Rückfragen oder Unklarheiten wenden konnten. Vor Beginn der eigentlichen Testungen wurde schließlich überprüft, dass die TeilnehmerInnen die Einverständniserklärung sorgfältig gelesen und unterzeichnet hatten, um eine informierte und freiwillige Teilnahme an der Studie sicherzustellen.

4 Ergebnisse

4.1 Proband*innen

Insgesamt wurden 67 Kinder im Alter von 10 – 14 Jahren zum Testzeitpunkt getestet. Davon waren 12 Mädchen und 55 Jungen. Zur weiteren Analyse wurden nur die Daten der männlichen Probanden herangezogen. Von 55 Jungen wurde bei einem Probanden ein schon positiver MO-Wert berechnet. Die restlichen 54 Jungen wiesen einen negativen MO-Wert auf. Der einzige positive MO-Wert wurde exkludiert, da er keiner Altersgruppe zugeordnet werden konnte.

In der untenstehenden Tabelle sieht man einen Überblick des Alters der Jungs zum Testzeitpunkt:

<i>Alter zum Testzeitpunkt^a</i>				
	Häufigkeit	Häufigkeit	gültige %	kum. %
	10	15	27,8	27,8
	11	9	16,7	44,5
	12	20	37,0	81,5
	13	10	18,5	100,0
	14	0	0	100,0
Gesamt		54	100,0	100,0

a. Geschlecht = m

Tabelle 2: deskriptive Statistik, Häufigkeiten Altersgruppen

Die Datensätze von sechs männlichen Probanden konnten nicht ausgewertet werden aufgrund fehlerhafter Aufzeichnung oder Nichteinhaltung des Testprotokolls. 48 Datensätze der Probanden im Alter von 10 – 13 Jahren zum Testzeitpunkt wurden für die statistische Auswertung freigegeben.

4.2 PHV und MO

Für alle 48 Probanden wurde die PHV erfasst, sowie der damit verbundene MO berechnet. Nach Überprüfung der PHV- und MO-Werte konnte bestätigt werden, dass keine Probanden aufgrund fehlender Daten ausgeschlossen werden mussten. Die PHV und MO wird zusätzlich zur deskriptiven Häufigkeitsstatistik graphisch als Histogramm dargestellt:

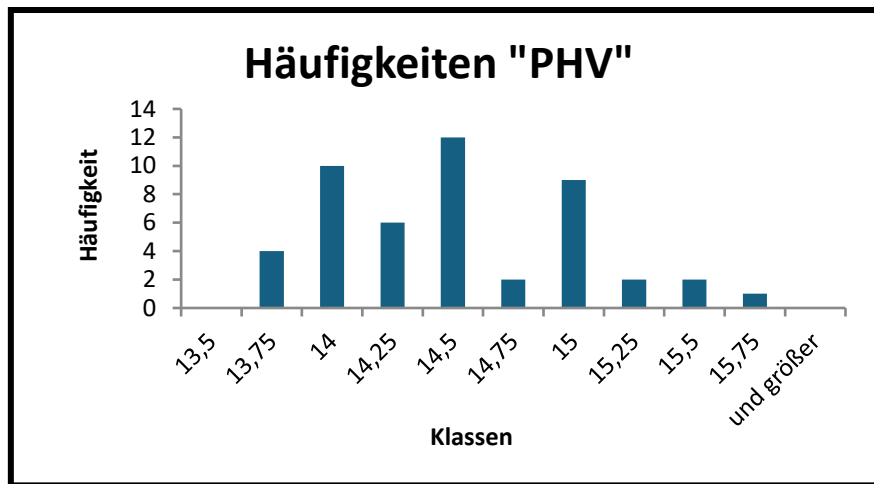


Abbildung 14: Häufigkeiten „PHV-Alter“ aller inkludierten Probanden

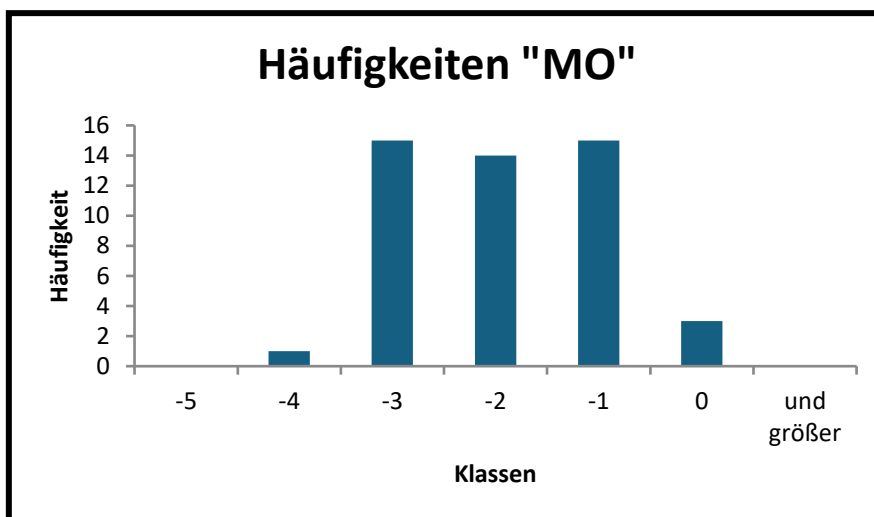


Abbildung 15: Häufigkeiten „MO“ aller inkludierten Probanden

Beruhend auf der deskriptiven Statistik kann die Auswertung des Datensatzes keine Aussagen über einen möglichen Knickpunkt bei Eintritt in die Pubertät, gemessen am MO, geben, noch Vergleiche zwischen den Geschlechtern tätigen. Die vorliegenden Daten können lediglich Unterschiede zwischen Altersgruppen in Bezug auf die CMJ-Kraft, CMJ-Sprunghöhe, sowie die CMJ-Kraft normiert auf das Körpergewicht der männlichen Probanden untersuchen.

4.3 Altersgruppen

Um Altersgruppen zu formen, wurden die MO-Werte aller Probanden z-transformiert. Die z-Werte geben an, wie viele Standardabweichungen Messwerte vom Mittelwert entfernt liegen. Durch die Normierung auf die Standardabweichung werden die Daten in standardisierte Form gebracht, was den Vergleich unterschiedlicher Personen und die Gruppeneinteilung vereinfacht.

Die Formel der z-Transformation:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

x = zu standardisierender Wert

μ = Mittelwert

σ = Standardabweichung

Es wurden drei Altersgruppen mittels z-Transformation ermittelt:

Altersgruppe 1 (AG 1): $z \leq -0.5$

Altersgruppe 2 (AG 2): $-0.5 < z < 1$

Altersgruppe 3 (AG3): $z \geq 1$

Die Tabellen in Punkt 3.4 univariate Analyse der Altersgruppen zeigen die Aufteilung der Jungen nach jeweilig berechneten Altersgruppen (nach z-Transformation) in Bezug zu den errechneten Werten Maximalkraft, Sprungkraft, sowie Maximalkraft normiert auf das Gewicht:

4.4 Univariate Analyse der Altersgruppen

4.4.1 Analyse Maximalkraft

Werte Maximalkraft (N)									
Altersgruppen	Anzahl	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Q1	Median	Q3	IQR	Maximum
1	20	781	108	601	718	779	828	110	1045
2	18	967	123	748	904	977	1016	112	1163
3	10	1246	157	997	1134	1312	1377	244	1409

Tabelle 3: univariate Analyse: Maximalkraftwerte der drei geformten Altersgruppen

4.4.2 Analyse Sprunghöhe

Werte Sprunghöhe (cm)									
Altersgruppen	Anzahl	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Q1	Median	Q3	IQR	Maximum
1	20	26,4	4,0	20,9	24,0	25,2	28,4	4,4	35,1
2	18	27,1	5,3	18,1	23,5	26,6	29,0	5,6	38,8
3	10	28,6	4,1	22,4	25,7	29,6	31,3	5,6	34,2

Tabelle 4: univariate Analyse: Sprunghöhe der drei geformten Altersgruppen

4.4.3 Analyse Maximalkraft normiert

Werte Maximalkraft normiert auf Körpergewicht (N/kg)									
Altersgruppe n	Anzahl	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Q1	Median	Q3	IQR	Maximum
1	20	21,4	2,64	14,1	20,2	21,1	22,6	2,38	27,6
2	18	21,1	1,95	18,3	19,9	21,1	22,3	2,4	24,6
3	10	21,9	1,89	19,2	20,3	22,1	23,6	3,27	24,1

Tabelle 5: univariate Analyse: Maximalkraftwerte normiert für die drei geformten Altersgruppen

4.5 Absolute CMJ-Kraftentwicklung

Die Analyse der **maximalen CMJ-Kraft** zeigte signifikante Unterschiede zwischen den drei Altersgruppen (AG1–AG3). Der **Kruskal-Wallis-Test** bestätigte einen starken Alterseffekt ($\chi^2 = 29,91$, $p < 0,001$), mit linearem Anstieg der Kraft von AG1 zu AG3 (Jonckheere-Terpstra-Test: $p < 0,001$). Die **Bonferroni-korrigierten Paarvergleiche** verdeutlichten:

- AG1 vs. AG2: $p < 0,001$, $r = -0,46$
- AG1 vs. AG3: $p < 0,001$, $r = -0,94$
- AG2 vs. AG3: $p < 0,001$, $r = -0,68$

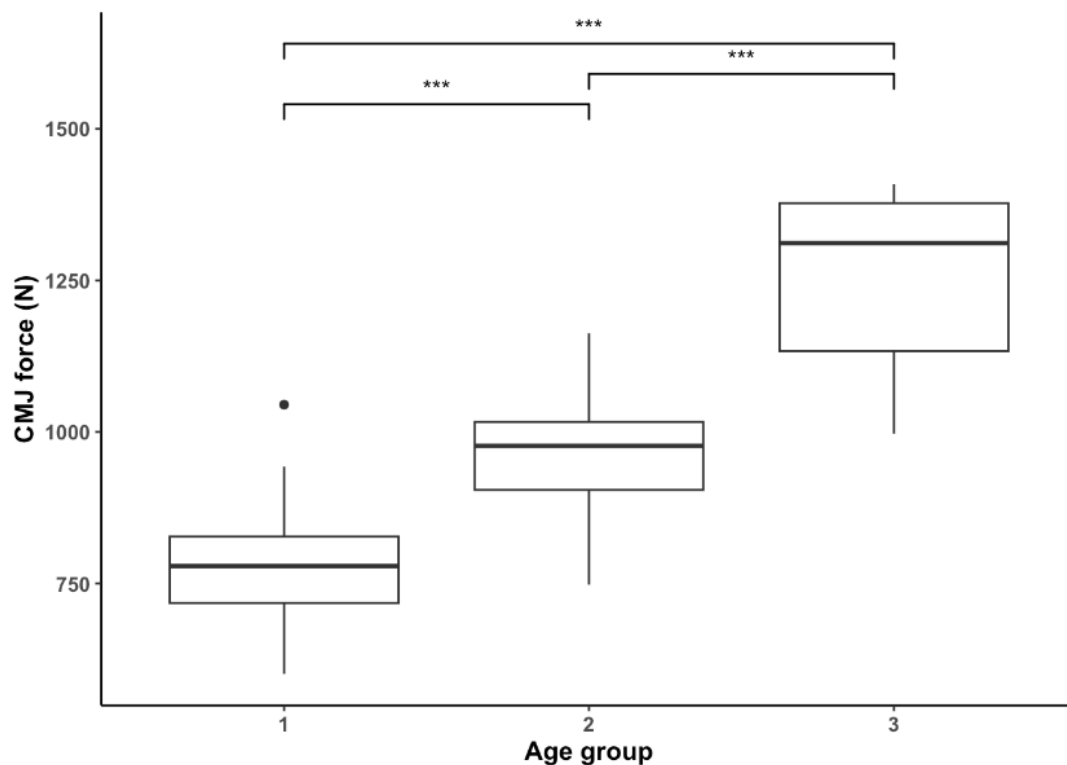


Abbildung 16: CMJ-Kraftwerte der drei Altersgruppen

Die **Bodenreaktionskräfte** stiegen unabhängig der Altersgruppen mit dem Alter an und korrelierten stark mit dem MO-Wert ($p < 0,001$, $r = 0,851$). Das Korrelationsdiagramm veranschaulicht den positiven Zusammenhang:

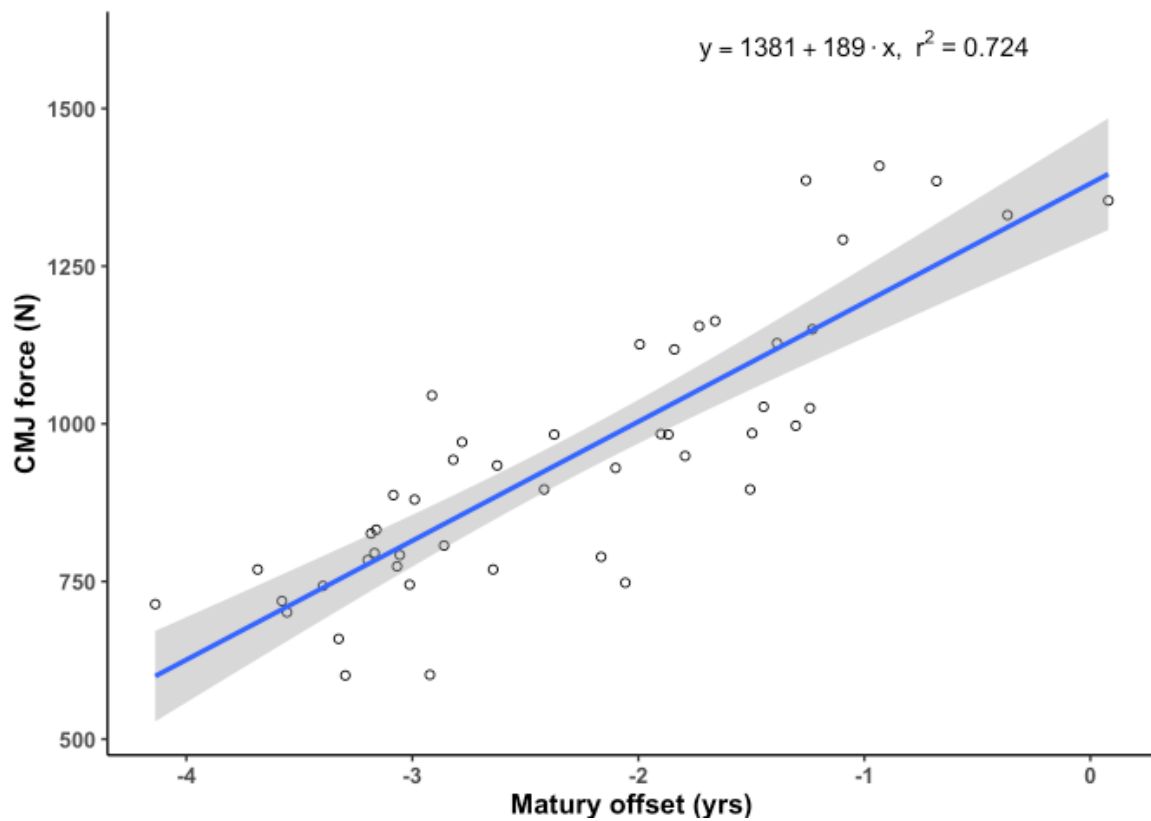


Abbildung 17: Korrelationsdiagramm MO / CMJ-Maximalkraft

Der Zusammenhang einer altersbedingten Verbesserung der Kraftleistung lässt noch keinen Schluss zu, ob eine überproportionale Steigerung in Abhängigkeit zum Körpergewicht zu beobachten ist. Hierfür war die Normierung auf das Körpergewicht, sowie die Betrachtung der Leistungsparameter $V_{\max}$ at takeoff (= maximale Geschwindigkeit, welche zum Zeitpunkt des Absprunges erreicht wird), der Sprunghöhe und der $P_{\max}/kg$ notwendig.

4.6 Normierte CMJ-Kraft und Leistungsparameter

Die auf das Körpergewicht normierte CMJ-Kraft zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen (ANOVA: $F(2,45) = 0,40$, $p = 0,672$)

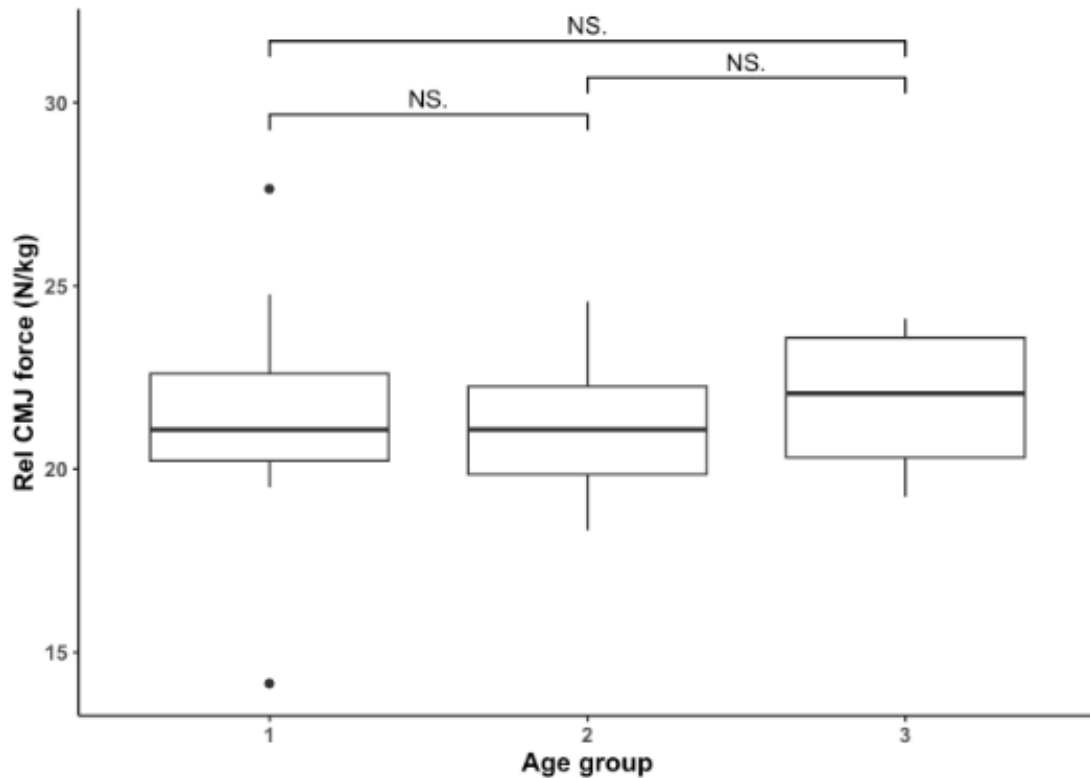


Abbildung 18: CMJ-Kraftwerte der drei Altersgruppen normiert auf das Körpergewicht

Auch die Vmax at takeoff blieb konstant (ANOVA: $F(2, 45) = 0,96$, $p = 0,389$).

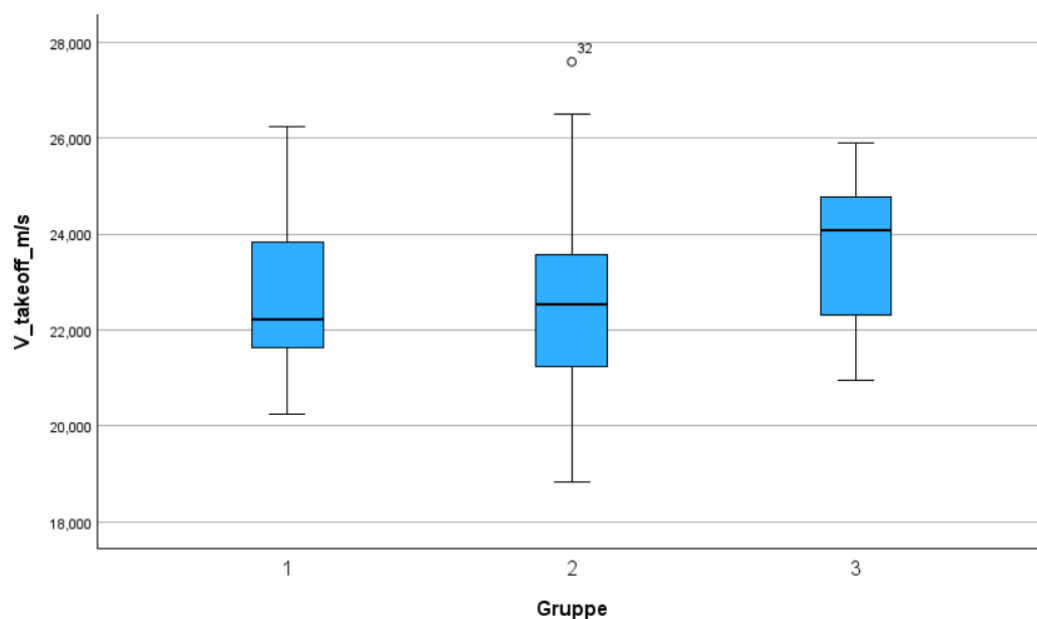


Abbildung 19: Boxplots der Vmax at takeoff

Die Sprunghöhe wies ebenfalls keine Veränderungen auf ($F(2,45) = 0,77$, $p = 0,471$).

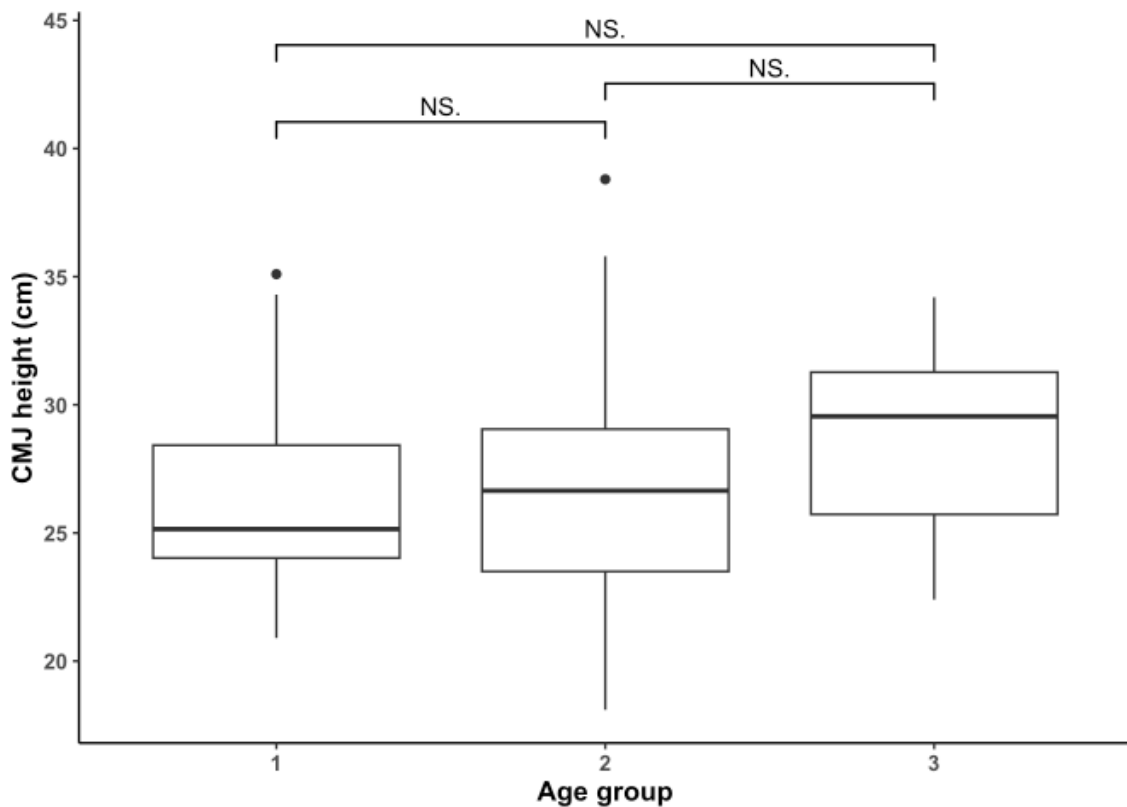


Abbildung 20: CMJ-Sprunghöhen der drei Altersgruppen

Die Ergebnisse folgen dem physikalischen Zusammenhang

$$V_{max} = \sqrt{2gh} \quad \text{und} \quad F_{max}(\alpha) = m \times g$$

, wobei die zunehmende Kraft ausschließlich die Körpergewichtszunahme kompensiert.

Die P_{max}/kg bestätigte dieses Muster ebenfalls: Der Kruskal-Wallis-Test ergab keine Gruppenunterschiede ($p = 0,546$), was auf eine rein gewichtsgetriebene Leistungsentwicklung hinweist.

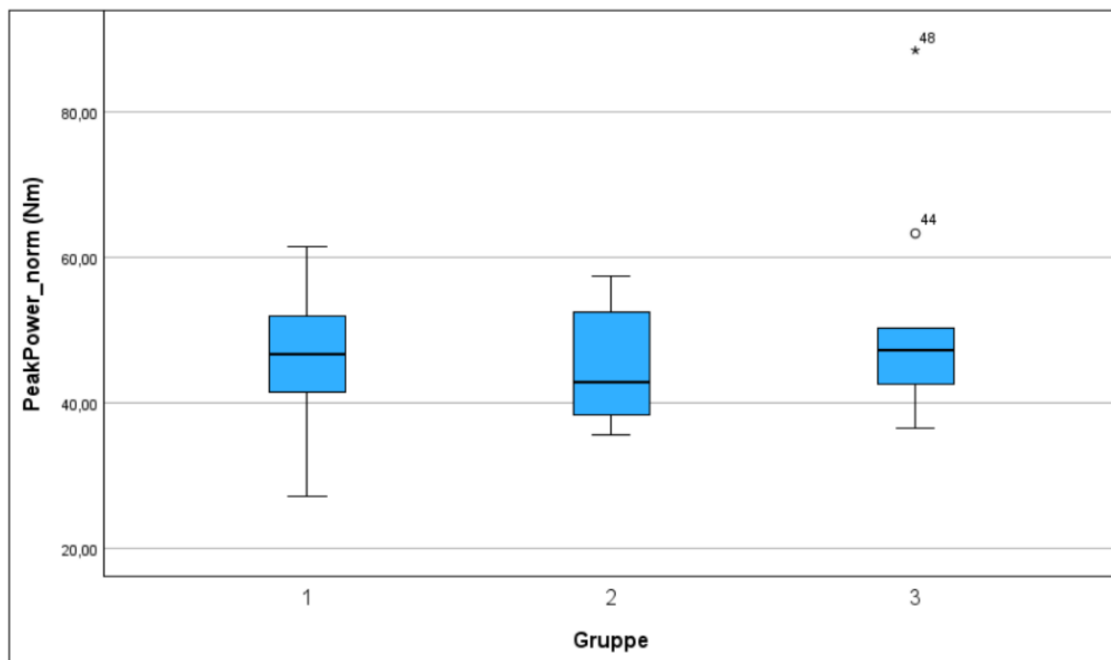


Abbildung 21: Boxplots der Pmax/kg

5 Diskussion und Ausblick

5.1 Interpretation der Ergebnisse

Die vorliegende Studie zeigt, dass präpubertäre Jungen ihre F_{max} im CMJ proportional zur Körpergewichtszunahme entwickeln, ohne überproportionale neuromuskuläre Anpassungen. Die absolute CMJ-Kraft stieg signifikant zwischen den Altersgruppen (AG1–AG3: 781 N → 1246 N; $p < 0,001$; Abb. 21), korrelierte jedoch stark mit dem MO ($r = 0,851$; Abb. 22).

Nach Normierung auf das Körpergewicht verschwanden diese Unterschiede vollständig (AG1: 21,4 N/kg vs. AG3: 21,9 N/kg; $p = 0,672$; Abb. 23). Dies bestätigt die Hypothese, dass präpubertäre Kraftzuwächse primär massengetrieben sind – ein Befund, der mit isokinetischen Labordaten (Reznar & Bogoevski, 2022; Abb. 11–13) und früheren Querschnittsstudien (Meylan et al., 2014; Seger & Thorstensson, 2000) übereinstimmt.

Feldmethoden vs. Labormethoden:

Die CMJ-basierte V_{max} at takeoff (2,1–2,3 m/s) und Sprunghöhe (26,4–28,6 cm; Abb. 26) blieben über alle Gruppen konstant ($p > 0,389$), was den physikalischen Zusammenhang

$$V_{max} = \sqrt{2gh} \quad \text{und} \quad F_{max}(\alpha) = m \times g$$

unterstreicht. Die Ergebnisse replizieren damit isokinetische Befunde, bei denen die P_{max}/kg ebenfalls stabil blieb (21,4–21,9 W/kg; $p = 0,546$; Abb. 28). Dies belegt, dass Feldtests wie der CMJ valide Aussagen zur muskulären Entwicklung liefern können – vorausgesetzt, die Daten werden körpergewichtsnormiert und biologischer Reifegrad mittels PHV/MO wird berücksichtigt.

5.2 Implikationen für Forschung und Praxis

Die Ergebnisse dieser Studie unterstreichen die Notwendigkeit, körpergewichtsnormierte Parameter zum Standard in der pädiatrischen Diagnostik zu machen. Wie bereits Meylan (2014) zeigte, verbirgt die alleinige Betrachtung absoluter Kraftwerte den Einfluss des Körperwachstums: Während die absolute CMJ-Kraft zwischen AG1 und AG3 um 59,5 % zunahm (781 N → 1246 N), blieben normierte Werte stabil (21,4 vs. 21,9 N/kg; $p = 0,672$). Dies bestätigt, dass präpubertäre Kraftentwicklung primär massengetrieben verläuft – ein Mechanismus, der in isokinetischen Studien (Reznar & Bogoevski, 2022) und Längsschnittanalysen (Lloyd & Oliver, 2012) repliziert wurde. Zukünftige Forschung sollte daher normierte Parameter prioritär erfassen, um Trainingseffekte von Wachstumseffekten zu isolieren.

Ein zweiter Schlüsselaspekt ist die PHV-basierte Kategorisierung. Chronologische Altersgruppen (z. B. 10–13 Jahre) ignorieren die Varianz des biologischen Reifegrads, die bei

Jungen gleichen Kalenderalters bis zu vier Jahre betragen kann (Malina et al., 2004). Die starke Korrelation zwischen MO und CMJ-Kraft ($r=0,851$; Abb. 22) zeigt, dass der Reifestatus die Kraftentwicklung stärker prägt als das chronologische Alter. Dies erfordert ein grundlegendes Umdenken hin zu biologischen Reifegruppen (prä-PHV, PHV, post-PHV), wie sie Galantine et al., (2024) in Sprintstudien erfolgreich anwandten. Nur so lassen sich interindividuelle Entwicklungsunterschiede valide berücksichtigen und Trainingsprogramme individualisieren.

In der präpubertären Phase dominieren neuromuskuläre Anpassungen die Kraftentwicklung, während hypertrophiebedingte Zuwächse erst post-PHV einsetzen (Behringer, 2017). Daher sollten Trainingsprogramme für Kinder unter MO=0 auf technische Fertigkeiten (z. B. Landemechanik, Bewegungskoordination) und intermuskuläre Synergien fokussieren – nicht auf Maximalkraftsteigerung. Studien belegen, dass präpubertäres Koordinationstraining die spätere Hypertrophiephase um bis zu 23 % effizienter macht (Lloyd & Oliver, 2012).

Der CMJ auf der Kraftmessplatte erweist sich als praktikables Tool für das Langzeitmonitoring der Muskelentwicklung, sofern zwei Bedingungen erfüllt sind:

- Normierung auf das Körpergewicht: Nur F_{max}/kg bzw. P_{max}/kg ermöglichen valide Vergleiche über Wachstumsphasen hinweg.
- Standardisierte Protokolle: Armposition (Hände in Hüftstützung), Kniewinkel ($\approx 90^\circ$ Flexion) und Aufwärmroutine (5 Min. bei 1 W/kg) minimieren technikbedingte Varianz.

5.3 Vergleich mit bestehender Literatur

Die Ergebnisse dieser Studie fügen sich nahtlos in den aktuellen Forschungsstand zur präpubertären Kraftentwicklung ein, während sie gleichzeitig kritische Impulse für die Interpretation von Feldmethoden liefern.

Replikation laborbasierter Befunde

Die Übereinstimmung mit Reznar & Bogoevski (2022) unterstreicht die Validität der Körpergewichtsnormierung: Sowohl im Isokineten (rel_T_0 : $p = 0,216$; Abb. 12) als auch im CMJ (rel_F_{max} : $p=0,672$; Abb. 18) zeigen präpubertäre Jungen keine signifikanten Steigerungen der normierten Kraft. Dies bestätigt, dass Feldtests bei standardisierter Durchführung vergleichbare Aussagen zur Muskelentwicklung liefern wie Labormethoden – vorausgesetzt, biologische Reifung (PHV/MO) und Körpergewicht werden kontrolliert. Die Stabilität der normierten P_{max}/kg (21,4–21,9 W/kg; Abb. 28) repliziert zudem Befunde von (Segar & Thorstensson, 2000), die in Querschnittsstudien an 10- bis 12-Jährigen ebenfalls keine neuromuskulären Sonderanpassungen nachweisen konnten.

PHV als Wendepunkt der muskulären Entwicklung

Die Ergebnisse stützen die These von Galantine et al. (2024), dass die PHV einen kritischen Wendepunkt in der F-V-Beziehung markiert. Während präpubertär die Kraft rein massengetrieben verläuft, belegen Längsschnittdaten an postpubertären Athleten eine Verschiebung der F-V-Kurve zu höheren Lasten (Abb. 8).

Methodische Limitationen und scheinbare Linearität

Die scheinbar linearen F-V-Beziehungen in vivo, wie sie Alcazar et al. (2019) beschreiben, werden durch die Daten dieser Studie teilweise bestätigt: Der lineare Anstieg der absoluten CMJ-Kraft (AG1–AG3: 781 N → 1246 N; Abb. 21) bei konstanter normierter Kraft (21,4–21,9 N/kg; Abb. 23) spiegelt die Vernachlässigung extremer Kraftbereiche (<40 % oder >90 % P_0) wider. Alcazar et al. (2018) demonstrieren, dass Humanstudien typischerweise nur 40–90 % der maximalen isometrischen Kraft erfassen – ein Bereich, in dem hyperbolische Abweichungen maskiert werden (Abb. 6). Die lineare Approximation ist somit ein Artefakt unvollständiger Messbereiche, nicht Ausdruck intrinsischer Muskeleigenschaften.

Kritische Auseinandersetzung mit linearen Modellen

Die Diskrepanz zu Jaric (2015), der lineare F-V-Modelle in der Sportpraxis befürwortet, offenbart einen Konflikt zwischen theoretischer Präzision und Anwendbarkeit. Während lineare Modelle einfache Trainingsempfehlungen ermöglichen (z. B. Fokus auf Kraft oder Geschwindigkeit), ignorieren sie die physiologische Komplexität der Muskelfunktion. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Testprotokolle über einen möglichst großen Kraft-Geschwindigkeits-Bereich zu standardisieren – ein Ansatz, den auch Samozino et al. (2012) fordern.

Implikationen für die Trainingssteuerung

Die Ergebnisse stehen im Einklang mit Meylan et al. (2014), die die Körpergewichtsnormierung als Schlüssel zur Differenzierung von Wachstums- und Trainingseffekten propagieren. Während präpubertär kein „Knickpunkt“ der Muskelqualität nachweisbar ist, belegen Studien an Jugendlichen post-PHV einen 13–18%igen Anstieg der spezifischen Kraft (Galantine et al., 2024). Dies legt nahe, dass hypertrophieorientiertes Training erst nach der PHV sinnvoll ist – eine Erkenntnis, die durch die Stabilität der normierten CMJ-Leistung (Abb. 28) untermauert wird.

5.4 Forschungsperspektiven

Um die Mechanismen der Kraftentwicklung im Kindes- und Jugendalter umfassend zu verstehen, sind Längsschnittstudien essenziell, die den „Knickpunkt“ des Übergangs von massengetriebener zu qualitätsgetriebener Muskeladaptation identifizieren. Dieser Zeitpunkt könnte 1–2 Jahre post-PHV liegen, parallel zur Peak Weight Velocity (PWV) und hormonellen Umstellungen (Testosteronanstieg bei Jungen, Östrogenspiegel bei Mädchen). Die PWV markiert die maximale Gewichtszunahme pro Jahr, der bei Jungen mit 13–14 Jahren und bei Mädchen mit 11–12 Jahren auftritt – ein kritischer Phasenübergang, in dem Hypertrophie und Sehnensteifigkeit die Kraftentwicklung dominieren (Round, 1999).

Zukünftige Studien sollten biologische Reifung vielschichtiger erfassen, indem sie die Pubertal Development Scale (PDS) nach Watzlawik (2009) mit etablierten anthropometrischen Methoden (z. B. PHV-Bestimmung nach Mirwald et al., 2002) kombinieren. Die PDS ermöglicht eine differenzierte Klassifikation in prä-, früh-, mittel-, spät- und postpubertäre Stadien anhand sekundärer Geschlechtsmerkmale (z. B. Schambehaarung, Brustentwicklung) und hormoneller Veränderungen (Koopman-Verhoeff et al., 2020). Durch die parallele Erhebung von PHV (Knochenalter-basierte Wachstumsdynamik) und PDS (morphologisch-hormonelle Reifung) entsteht ein präziseres Profil des biologischen Alters, das interindividuelle Entwicklungsunterschiede innerhalb chronologischer Altersgruppen abbildet.

Weiters sollten zukünftige Studien verschiedenartige Messungen (hormonelle Profile, Muskelbiopsien, DXA-Scans) integrieren, um zu klären, wodurch der Knickpunkt ausgelöst wird.

Geschlechtsspezifische Analysen müssen priorisiert werden, da Mädchen stagnierende Muskelmasse bei gleichzeitigem Anstieg der spezifischen Kraft zeigen – ein Effekt, der auf neuromuskuläre Reifung (verbesserte intermuskuläre Koordination, erhöhte Sehnensteifigkeit) zurückgeht (Galantine et al., 2024). Um diese Prozesse zu quantifizieren, sind größere Mädchenstichproben (≥ 30 pro Altersgruppe) notwendig, eventuell ergänzt durch Ultraschallmessungen der Patellarsehne und EMG-Analysen des M. quadriceps während des CMJ (Hahn, 2008; Herzog et al., 2000). Nur so lassen sich geschlechtsspezifische Entwicklungen erkennen, die der verzögerten Hypertrophie bei Mädchen Rechnung tragen.

Die Integration biomechanischer Parameter kann die Validität von Feldtests steigern: Muskelfaszikellängen-Messungen per Ultraschall decken Gelenkwinkel-bedingte Verzerrungen auf (Hager et al., 2020), während Inertialsensoren an Hüfte und Knöchel Bodenkontaktzeiten und Bewegungsökonomie erfassen (Fernandez-Fernandez et al., 2019). Diese Kombination ermöglicht es, die mechanische Effizienz des Dehnungs-Verkürzungs-

Zyklus (DVZ) präziser zu modellieren – ein Schlüsselparameter, der in präpubertären Studien bisher vernachlässigt wurde.

5.5 Gesellschaftliche Relevanz

Die vorliegenden Ergebnisse betonen eindrücklich die Notwendigkeit, alters- und reifegradgerechte Testverfahren im Schulsport und in der sportlichen Nachwuchsförderung einzusetzen. Insbesondere die Normierung der Kraftwerte, wie sie durch den CMJ auf der KMP ermittelt wurden, bietet eine wissenschaftlich fundierte Grundlage, um die muskuläre Entwicklung von Kindern und Jugendlichen objektiv zu beurteilen. Normierte CMJ-Werte können dabei als wertvolle Frühindikatoren für Entwicklungsverzögerungen dienen – etwa bei Kindern mit Adipositas oder motorischen Defiziten. In diesen Fällen ermöglicht die frühzeitige Identifikation von Abweichungen im F-V-Profil gezielte Interventionen, um gesundheitlichen Risiken und einer möglichen sozialen Ausgrenzung entgegenzuwirken.

Darüber hinaus bieten normierte Kraft- und Leistungsdaten die Möglichkeit, Talentförderung und Trainingssteuerung stärker an den individuellen biologischen Reifegrad anzupassen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die alleinige Orientierung am chronologischen Alter nicht ausreicht, um die tatsächliche Leistungsfähigkeit und das Entwicklungspotenzial von Kindern und Jugendlichen valide zu erfassen. Vielmehr ist es essenziell, den Reifestatus – beispielsweise mittels PHV und MO – in die Bewertung einzubeziehen. Auf diese Weise kann vermieden werden, dass biologisch spätreifende Kinder fälschlicherweise als leistungsschwach eingestuft werden, während frühreifende Kinder möglicherweise überbewertet werden. Eine solche differenzierte Betrachtung trägt dazu bei, Chancengleichheit in der sportlichen Entwicklung und Förderung zu gewährleisten.

Die Integration normierter Testverfahren in den schulischen und außerschulischen Sportunterricht bietet zudem die Möglichkeit, die motorische Entwicklung von Kindern und Jugendlichen systematisch zu dokumentieren und zu begleiten. Lehrkräfte und Trainer*innen erhalten dadurch objektive Anhaltspunkte, um individuelle Fördermaßnahmen zu planen, den Trainingsprozess zu evaluieren und die Wirksamkeit von Bewegungsangeboten zu überprüfen. Dies ist gerade vor dem Hintergrund zunehmender Bewegungsarmut und steigender Prävalenz von Übergewicht und Adipositas im Kindesalter von großer gesellschaftlicher Bedeutung.

Nicht zuletzt leisten die Ergebnisse dieser Studie einen Beitrag zur Entwicklung evidenzbasierter Empfehlungen für die Gestaltung von Testbatterien und Förderprogrammen im Kinder- und Jugendsport. Sie zeigen auf, dass einfache, standardisierte Feldtests wie der CMJ, sofern sie normiert und reifegradbasiert ausgewertet werden, eine praktikable und valide Alternative zu aufwendigen Labormethoden darstellen. Damit wird ein wichtiger Schritt hin zu

einer breiten, niederschweligen und wissenschaftlich abgesicherten Diagnostik vollzogen, die sowohl für die Prävention, Entwicklung als auch für die individuelle Talentförderung von zentraler Bedeutung ist.

5.6 Methodische Stärken und Limitationen

Die vorliegende Studie kombiniert standardisierte Feldmethoden mit biologischer Reifungsdiagnostik, um die muskuläre Entwicklung präpubertärer Jungen valide abzubilden. Ihre Methodik zeigt sich in drei zentralen Stärken, die jedoch durch gewisse Limitationen relativiert werden.

5.6.1 Stärken

Standardisiertes CMJ-Protokoll mit 3D-Kraftmessplatte:

Die Verwendung einer 3D-Kraftmessplatte (Kistler) gewährleistete präzise Messungen der Bodenreaktionskräfte. Durch die Integration eines Fixationsrahmens für die Arme (Hände in Hüftstützung) wurden technikbedingte Verzerrungen minimiert. Dieses Vorgehen entspricht den Empfehlungen von Jiménez-Reyes et al. (2017), die für derart standardisierte CMJ-Tests ICC-Werte von $>0,85$ nachweisen. Die hohe Reliabilität spiegelt sich in den eng begrenzten Konfidenzintervallen der Sprunghöhen (AG1: $26,4 \pm 4,0$ cm; AG3: $28,6 \pm 4,1$ cm) wider, die technische Variabilität kontrollieren.

Biologische Reifungskontrolle via PHV und MO:

Die Berechnung des MO nach Mirwald et al. (2002) ermöglichte eine differenzierte Einordnung der Probanden in präpubertäre Entwicklungsstadien ($MO < 0$). Durch die Kombination von Sitzhöhe, Beinlänge und Körpergewicht wurde der individuelle Reifegrad präziser erfasst als durch chronologisches Alter allein. Die Korrelation zwischen MO und CMJ-Kraft ($r=0,851$; Abb. 22) unterstreicht die Validität dieses Ansatzes.

Validität durch Labor-Feld-Vergleich:

Die Reproduktion isokinetischer Muster von Reznar & Bogoevski (2022) in der Feldtestung belegt die Konvergenzvalidität des CMJ-Protokolls. So zeigten sowohl die Labormessungen (isometrische Maximalkraft) als auch die Felddaten (F_{max}/KG) keine signifikanten Unterschiede nach Normierung ($p>0,216$ vs. $p=0,672$). Dies bestätigt, dass der CMJ neuromuskuläre Anpassungen ähnlich gut abbildet wie der Goldstandard – ein Befund, der mit Metaanalysen zur Validität von Sprungtests übereinstimmt (Markovic et al., 2004).

5.6.2 Limitationen

Fehlende Pubertätsdaten und „Knickpunkt“-Analyse:

Da alle Probanden präpubertär waren ($MO < 0$), konnte kein „Knickpunkt“ der Muskelqualität – ein plötzlicher Anstieg der normierten Kraft durch hormonell induzierte Hypertrophie – mit Eintritt in die Pubertät untersucht werden. Längsschnittstudien belegen, dass Jungen 1–2 Jahre post-PHV ($MO > 0$) einen 13–18%igen Anstieg der spezifischen Kraft (Kraft pro Muskelfaserquerschnitt) zeigen, bedingt durch Testosteron-stimulierte Proteinsynthese (Galantine et al., 2024; Round, 1999). Ohne Einbeziehung pubertierender Probanden bleibt unklar, ob der CMJ diese qualitative Entwicklung valide abbilden kann.

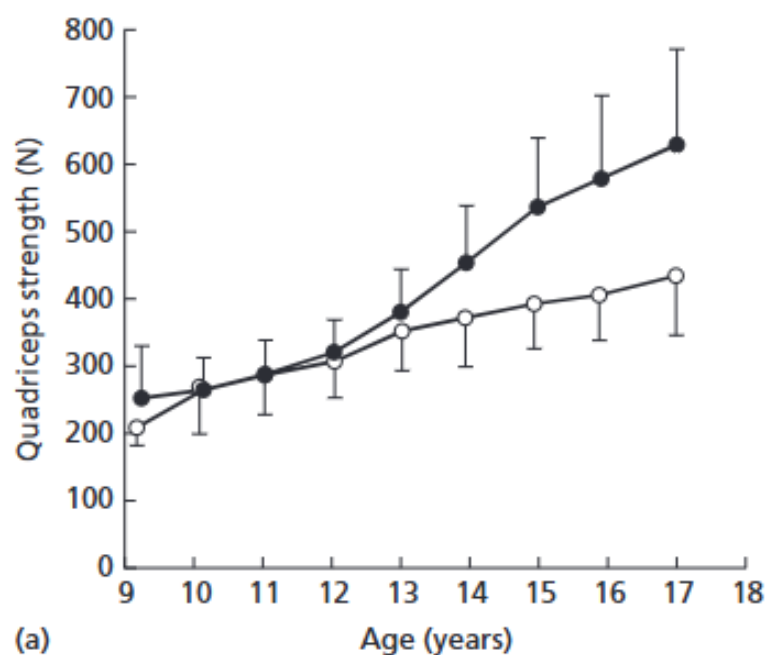


Abbildung 22: Kraftzuwachs des Quadriceps bei Jungen und Mädchen. Jungen als dunkle, Mädchen als helle Punkte dargestellt.
Quelle: Round et al., 1999, S.53

Ungleiche Geschlechterverteilung:

Mit nur 12 Mädchen (17,9 % der Stichprobe) konnten geschlechtsspezifische Unterschiede nicht valide analysiert werden. Die Vernachlässigung von Probandinnen limitiert die Generalisierbarkeit der Ergebnisse und lässt eine Forschungslücke zurück. Die ungleiche Verteilung der Stichproben zwischen Jungen und Mädchen in dieser Studie ist voraussichtlich auf die spezifische Rekrutierung aus Sportvereinen zurückzuführen, die in dieser Altersgruppe deutliche Unterschiede in der Geschlechterverteilung aufweisen. Die Mitgliedschaftsstatistik der Sportvereine in Österreich zeigt, dass „im Alter von 6 bis 15 Jahren beinahe jeder zweite männliche Jugendliche in einem Verein aktiv [ist] (rund 40 %), bei den gleichaltrigen Mädchen

ist es rund jede vierte“ (Sport Austria, 2021). Diese Ungleichverteilung zeigt sich besonders in Fußballvereinen und kann als potenzierender Faktor für die geschlechtsspezifische Stichprobengröße betrachtet werden, da die Teilnahme männlicher Jugendlicher im Fußballsport traditionell höher ist als die der Mädchen. In Wien lässt sich dies am Beispiel des Wiener Fußballverbands (WFV, 2024) verdeutlichen, der die Nachwuchsligen für Jungen und Mädchen unterschiedlich strukturiert. Während Jungen in vier verschiedenen Jugendligen, die eine Altersspanne von insgesamt zehn Jahrgängen umfassen, spielen können, steht für Mädchen nur eine Jugendliga zur Verfügung, die überdies auf lediglich vier Jahrgänge beschränkt ist. Diese Strukturierung deutet auf eine signifikante geschlechtsspezifische Beteiligung im Vereinsfußball hin und könnte die Zusammensetzung der Stichprobe entsprechend beeinflusst haben, auch wenn der WFV dazu keine spezifischen Zahlen veröffentlicht.

Fehlende neuromuskuläre Tiefenanalysen:

Die Studie erfasste weder EMG-Daten zur Muskelaktivierung noch Ultraschallmessungen der Muskellänge. Dabei zeigen Studien, dass präpubertäre Kinder trotz konstanter V_{max} at takeoff Aktivierungsdefizite aufweisen, die die gemessene Kraft um bis zu 12 % unterschätzen (Hahn, 2008).

6 Conclusio

Die vorliegende Masterarbeit untersuchte die muskuläre Entwicklung bei präpubertären Jungen unter Berücksichtigung biologischer Reifungsprozesse. Die Ergebnisse zeigen, dass die F_{max} im CMJ proportional zur Körpergewichtszunahme verläuft, ohne überproportionale neuromuskuläre Anpassungen. Diese Erkenntnis steht im Einklang mit isokinetischen Labordaten (Reznar & Bogoevski, 2022) und früheren Querschnittsstudien (Meylan et al., 2014), die ebenfalls eine rein massengetriebene Kraftentwicklung vor der Pubertät belegen. Die Studie unterstreicht die Notwendigkeit körpergewichtsnormierter Parameter und biologischer Reifungskriterien (PHV, Maturity Offset) in der pädiatrischen Diagnostik, um Trainingseffekte von Wachstumseffekten zu trennen.

Die zentralen Erkenntnisse der Studie lauten:

- Präpubertäre Kraftentwicklung ist massengetrieben

Die absolute CMJ-Kraft stieg signifikant zwischen den Altersgruppen (AG1: 781 N → AG3: 1246 N; $p < 0,001$), korrelierte jedoch stark mit dem Körpergewicht ($r = 0,851$) und dem MO. Nach Normierung auf das Körpergewicht verschwanden diese Unterschiede vollständig (AG1: 21,4 N/kg vs. AG3: 21,9 N/kg; $p = 0,672$). Dies bestätigt, dass präpubertäre Kraftzuwächse ausschließlich der Kompensation des Körperwachstums dienen – ein Befund, der durch konstante Sprunghöhe (26,4–28,6 cm) und V_{max} at take off (2,1–2,3 m/s) untermauert wird.

- Validität von Feldmethoden:

Der CMJ auf der Kraftmessplatte erwies sich als valides Feldverfahren zur Erfassung der muskulären Entwicklung, sofern standardisierte Protokolle und Körpergewichtsnormierte Auswertungen angewendet werden. Die Reproduktion isokinetischer Muster (stabile P_{max}/kg : 21,4–21,9 W/kg; $p = 0,546$) belegt die Übertragbarkeit der Tests.

- Biologische Reifung als Schlüsselfaktor:

Die PHV und der MO erwiesen sich als kritische Referenzgrößen, um interindividuelle Entwicklungsunterschiede zu erklären. Chronologische Altersgruppen sind nicht ausreichend, um Effekte zu erkennen, da das biologische Alter bei Kindern gleichen Kalendersalters um bis zu 4 Jahre abweichen kann (Malina et al., 2004).

Diese Arbeit leistet einen bedeutenden Beitrag zur pädiatrischen Diagnostik, indem sie zeigt, dass Feldtests wie der CMJ bei standardisierter Anwendung valide Aussagen zur muskulären Entwicklung liefern. Die Ergebnisse unterstreichen, dass präpubertäre Kraftzuwächse rein massengetrieben sind – eine Erkenntnis, die Prävention, Entwicklung als auch die individuelle Talentförderung revolutionieren kann.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hill'sche Kurve.....	7
Abbildung 2: Kraftmodell mit exzentrisch, isometrisch und konzentrischem Verlauf.....	7
Abbildung 3: F-V-Beziehung der Frosch-Schienbeinmuskelfaser	8
Abbildung 4: kurvilinearer Verlauf der F-V-Beziehung.....	9
Abbildung 5: vereinfachte Darstellung der F-V-Beziehung inkl. Leistungsparabel.....	9
Abbildung 6: Testung am Menschen an der Beinpresse inkl. Abweichung bei hohen Kräften bzw. niedrigen Geschwindigkeiten.....	10
Abbildung 7: Die F-V-Kurve inkl. Leistungskurve (strichliert).....	12
Abbildung 8: Zusammenhang des Reifestatus und der maximal erzeugten Kraft	14
Abbildung 9: Entwicklung der PHV bei Jungen und Mädchen inkl. Beinlänge und Sitzhöhe ..	16
Abbildung 10: CMJ inkl. unilateraler Erfassung der Beinkraft.....	20
Abbildung 11: Unterschiede der isometrischen Maximalkraft	22
Abbildung 12: Unterschiede isometrische Maximalkraft normiert auf das Körpergewicht.....	23
Abbildung 13: Unterschiede der maximal möglichen Geschwindigkeit über die Altersgruppen	24
Abbildung 14: Häufigkeiten „PHV-Alter“ aller inkludierten Probanden	34
Abbildung 15: Häufigkeiten „MO“ aller inkludierten Probanden.....	34
Abbildung 16: CMJ-Kraftwerte der drei Altersgruppen	38
Abbildung 17: Korrelationsdiagramm MO / CMJ-Maximalkraft.....	39
Abbildung 18: CMJ-Kraftwerte der drei Altersgruppen normiert auf das Körpergewicht	40
Abbildung 19: Boxplots der Vmax at takeoff	40
Abbildung 20: CMJ-Sprunghöhen der drei Altersgruppen	41
Abbildung 21: Boxplots der Pmax/kg	42
Abbildung 22: Kraftzuwachs des Quadriceps bei Jungen und Mädchen. Jungen als dunkle, Mädchen als helle Punkte dargestellt.	49

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: sportliche Betätigung der Teilnehmer*innen zum Testzeitpunkt	28
Tabelle 2: deskriptive Statistik, Häufigkeiten Altersgruppen	33
Tabelle 3: univariate Analyse: Maximalkraftwerte der drei geformten Altersgruppen	36
Tabelle 4: univariate Analyse: Sprunghöhe der drei geformten Altersgruppen	36
Tabelle 5: univariate Analyse: Maximalkraftwerte normiert für die drei geformten Altersgruppen.....	36

9 Literaturverzeichnis

- Alcazar, J., Csapo, R., & Alegre, L. M. (2022). Editorial: The force-velocity relationship: Assessment and adaptations provoked by exercise, disuse and disease. *Frontiers in Physiology*, 13, 1062041. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1062041>
- Alcazar, J., Csapo, R., Ara, I., & Alegre, L. M. (2019). On the Shape of the Force-Velocity Relationship in Skeletal Muscles: The Linear, the Hyperbolic, and the Double-Hyperbolic. *Frontiers in Physiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00769>
- Alcazar, J., Losa-Reyna, J., Rodriguez-Lopez, C., Alfaro-Acha, A., Rodriguez-Mañas, L., Ara, I., García-García, F. J., & Alegre, L. M. (2018). The sit-to-stand muscle power test: An easy, inexpensive and portable procedure to assess muscle power in older people. *Experimental Gerontology*, 112, 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2018.08.006>
- Alt, W., Gollhofer, A., & Schwameder, H. (2023). Mechanik, Belastbarkeit, Struktur und Funktionen biologischer Materialien. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit: Handbuch Sport und Sportwissenschaft* (S. 163–183). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53410-6_3
- Andersen, J. L., Schjerling, P., & Saltin, B. (2000). Muscle, genes and athletic performance. *Scientific American*, 283(3), 48–55. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0900-48>
- Arnold, B. L. (1997). Enoka, R. M. Neuromechanical Basis Of Kinesiology. Champaign, IL: Human Kinetics, 1994. *Journal of Athletic Training*, 32, 178–179.
- Ayalon, M., Ben-Sira, D., Hutzler, Y., & Gilad, T. (2000). Reliability of isokinetic strength measurements of the knee in children with cerebral palsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 42(6), 398–402. <https://doi.org/10.1017/s0012162200000724>
- Behringer, M. (2017). Welche biologischen Besonderheiten gilt es, beim Krafttraining für junge Schwimmer zu berücksichtigen? In *Kraftvoll ins Wasser* (S. 67–92). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54900-1_3
- Belhaj, K., Meftah, S., Mahir, L., Lmidmani, F., & Elfatimi, A. (2016). Isokinetic imbalance of adductor–abductor hip muscles in professional soccer players with chronic adductor-

- related groin pain. *European Journal of Sport Science*, 16(8), 1226–1231.
<https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1164248>
- Bobbert, M. F. (2012). Why is the force-velocity relationship in leg press tasks quasi-linear rather than hyperbolic? *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 112(12), 1975–1983. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00787.2011>
- Boeyer, M. E., Sherwood, R. J., Deroche, C. B., & Duren, D. L. (2018). Early Maturity as the New Normal: A Century-long Study of Bone Age. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 476(11), 2112–2122. <https://doi.org/10.1097/CORR.0000000000000446>
- Bosquet, L., Porta-Benache, J., & Blais, J. (2010). Validity of a Commercial Linear Encoder to Estimate Bench Press 1 RM from the Force-Velocity Relationship. *Journal of Sports Science & Medicine*, 9(3), 459–463.
- Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2011). Developing Maximal Neuromuscular Power: Part 1 – Biological Basis of Maximal Power Production. *Sports Medicine*, 41(1), 17–38. <https://doi.org/10.2165/11537690-000000000-00000>
- De Ste Croix, M., Deighan, M., & Armstrong, N. (2003). Assessment and interpretation of isokinetic muscle strength during growth and maturation. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 33(10), 727–743. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333100-00002>
- Dern, R. J., Levene, J. M., & Blair, H. A. (1947). Forces exerted at different velocities in human arm movements. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 151(2), 415–437. <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1947.151.2.415>
- Drouin, J. M., Valovich-mcLeod, T. C., Shultz, S. J., Gansneder, B. M., & Perrin, D. H. (2004). Reliability and validity of the Biodex system 3 pro isokinetic dynamometer velocity, torque and position measurements. *European Journal of Applied Physiology*, 91(1), 22–29. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0933-0>
- Edman, K. A. (1988). Double-hyperbolic force-velocity relation in frog muscle fibres. *The Journal of Physiology*, 404, 301–321. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1988.sp017291>
- Eins-A-Coaching. (2023). *Sprungmessungen im Profisport: Ein Blick auf verschiedene Systeme*. Eins A Coaching. <https://www.eins-a->

coaching.at/de/articles/sprungmessungen-im-profisport-ein-blick-auf-verschiedene-systeme-16

- Faigenbaum, A. D., Lloyd, R. S., & Myer, G. D. (2013). Youth resistance training: Past practices, new perspectives, and future directions. *Pediatric Exercise Science*, 25(4), 591–604. <https://doi.org/10.1123/pes.25.4.591>
- Fenwick, A. J., Wood, A. M., & Tanner, B. C. W. (2017). Effects of cross-bridge compliance on the force-velocity relationship and muscle power output. *PLoS ONE*, 12(12), e0190335. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190335>
- Fernandez-Fernandez, J., Nakamura, F. Y., Moreno-Perez, V., Lopez-Valenciano, A., Del Coso, J., Gallo-Salazar, C., Barbado, D., Ruiz-Perez, I., & Sanz-Rivas, D. (2019). Age and sex-related upper body performance differences in competitive young tennis players | PLOS ONE. 2019. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0221761>
- Fernández-Galván, L. M., Jiménez-Reyes, P., Cuadrado-Peñafiel, V., & Casado, A. (2022). Sprint Performance and Mechanical Force-Velocity Profile among Different Maturational Stages in Young Soccer Players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031412>
- Fontana, H. de B., Roesler, H., & Herzog, W. (2014). In vivo vastus lateralis force-velocity relationship at the fascicle and muscle tendon unit level. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 24(6), 934–940. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2014.06.010>
- Fry, A. C., Schilling, B. K., Staron, R. S., Hagerman, F. C., Hikida, R. S., & Thrush, J. T. (2003). Muscle fiber characteristics and performance correlates of male Olympic-style weightlifters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17(4), 746–754. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2003\)017<0746:mfcapc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2003)017<0746:mfcapc>2.0.co;2)
- Galantine, P., Bertin, D., Duché, P., & Hays, A. (2024). Effect of maturity status on force-velocity relationships in a ballistic lower limb test in high-level soccer players: Journal

- of Sports Sciences: Vol 42 , No 9—Get Access. 2024.
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02640414.2024.2366743>
- Granacher, U., Lesinski, M., Büsch, D., Muehlbauer, T., Prieske, O., Puta, C., Gollhofer, A., & Behm, D. G. (2016). Effects of Resistance Training in Youth Athletes on Muscular Fitness and Athletic Performance: A Conceptual Model for Long-Term Athlete Development. *Frontiers in Physiology*, 7, 164.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00164>
- Haff, G. G., & Nimphius, S. (2012). Training Principles for Power. *Strength & Conditioning Journal*, 34(6), 2. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e31826db467>
- Hager, R., Poulard, T., Nordez, A., Dorel, S., & Guilhem, G. (2020). Influence of joint angle on muscle fascicle dynamics and rate of torque development during isometric explosive contractions. *Journal of Applied Physiology*, 129(3), 569–579.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00143.2019>
- Hahn, D. (2008). *Biomechanische Analyse der Kraft-Längen- und Kraft-Geschwindigkeits-Relation bei der mehrgelenkigen Beinstreckung in vivo zur Beurteilung der muskulären Funktion* (1., Edition). sierke VERLAG - Sierke WWS GmbH.
- Herzog, W., Leonard, T. R., & Wu, J. Z. (2000). The relationship between force depression following shortening and mechanical work in skeletal muscle. *Journal of Biomechanics*, 33(6), 659–668. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(00\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00008-7)
- Hill, A. V. (1938). *The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle*. <https://www-jstor-org.uaccess.univie.ac.at/stable/82135?sid=primo&seq=1>
- Janssen, I., Katzmarzyk, P. T., Boyce, W. F., Vereecken, C., Mulvihill, C., Roberts, C., Currie, C., Pickett, W., & Health Behaviour in School-Aged Children Obesity Working Group. (2005). Comparison of overweight and obesity prevalence in school-aged youth from 34 countries and their relationships with physical activity and dietary patterns. *Obesity Reviews: An Official Journal of the International Association for the Study of Obesity*, 6(2), 123–132. <https://doi.org/10.1111/j.1467-789X.2005.00176.x>

- Jaric, S. (2015). Force-velocity Relationship of Muscles Performing Multi-joint Maximum Performance Tasks. *International Journal of Sports Medicine*, 36(9), 699–704.
<https://doi.org/10.1055/s-0035-1547283>
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Brughelli, M., & Morin, J.-B. (2017). Effectiveness of an Individualized Training Based on Force-Velocity Profiling during Jumping. *Frontiers in Physiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00677>
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Cuadrado-Peñafiel, V., Conceição, F., González-Badillo, J. J., & Morin, J.-B. (2014a). Effect of countermovement on power–force–velocity profile. *European Journal of Applied Physiology*, 114(11), 2281–2288.
<https://doi.org/10.1007/s00421-014-2947-1>
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Cuadrado-Peñafiel, V., Conceição, F., González-Badillo, J. J., & Morin, J.-B. (2014b). OC9 A simple method to measure force-velocity profile in counter movement jump. *Oral communications*, A3.2-A3.
<https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-094245.9>
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., & Morin, J.-B. (2019). Optimized training for jumping performance using the force-velocity imbalance: Individual adaptation kinetics. *PLOS ONE*, 14(5), e0216681. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216681>
- Jones, D. A. (2010). Changes in the force–velocity relationship of fatigued muscle: Implications for power production and possible causes. *The Journal of Physiology*, 588(16), 2977–2986. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.190934>
- Jones, S., Mullen, R., Clair, Z., Wrigley, R., Andersen, T. E., & Williams, M. (2021). Field based lower limb strength tests provide insight into sprint and change of direction ability in academy footballers. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 31(12), 2178–2186. <https://doi.org/10.1111/sms.14039>
- Kellis, E., Kellis, S., Gerodimos, V., & Manou, V. (1999). *Reliability of Isokinetic Concentric and Eccentric Strength in Circumpubertal Soccer Players*.
<https://doi.org/10.1123/pes.11.3.218>

- King-Dowling, S., Fortnum, K., Chirico, D., Le, T., Kwan, M. Y. W., Timmons, B. W., & Cairney, J. (2024). Reliability of field- and laboratory-based assessments of health-related fitness in preschool-aged children. *American Journal of Human Biology*, 36(2), e23987. <https://doi.org/10.1002/ajhb.23987>
- Komi, P. V. (2000). Stretch-shortening cycle: A powerful model to study normal and fatigued muscle. *Journal of Biomechanics*, 33(10), 1197–1206. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(00\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00064-6)
- Koopman-Verhoeff, M. E., Gredvig-Ardito, C., Barker, D. H., Saletin, J. M., & Carskadon, M. A. (2020). Classifying Pubertal Development Using Child and Parent Report: Comparing the Pubertal Development Scales to Tanner Staging. *Journal of Adolescent Health*, 66(5), 597–602. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2019.11.308>
- LBS Movement. (2022, Juli 5). *Peak Height Velocity—Guide For Parents And Children | London Bridge Sports Medicine*. <https://lbsm.co.uk/peak-height-velocity-guide-for-parents-and-children/>
- Lima, A. B., Quinaud, R. T., Karasiak, F. C., Galvão, L. G., Gonçalves, C. E., Carvalho, H. M., Lima, A., Quinaud, R., Karasiak, F. C., Sr, L. G. G., Gonçalves, C. E., & Carvalho, H. M. (2024). Longitudinal Meta-Analysis of Peak Height Velocity in Young Female Athletes. *Cureus*, 16(5). <https://doi.org/10.7759/cureus.59482>
- Lloyd, R. S., & Oliver, J. L. (2012). The Youth Physical Development Model: A New Approach to Long-Term Athletic Development. *Strength & Conditioning Journal*, 34(3), 61. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e31825760ea>
- Ly, L. P., & Handelsman, D. J. (2002). Muscle Strength And Ageing: Methodological Aspects Of Isokinetic Dynamometry And Androgen Administration. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 29(1–2), 39–47. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1681.2002.03606.x>
- MacDougall, J. D., Elder, G. C., Sale, D. G., Moroz, J. R., & Sutton, J. R. (1980). Effects of strength training and immobilization on human muscle fibres. *European Journal of*

- Applied Physiology and Occupational Physiology*, 43(1), 25–34.
<https://doi.org/10.1007/BF00421352>
- Maffiuletti, N. A., Aagaard, P., Blazevich, A. J., Folland, J., Tillin, N., & Duchateau, J. (2016). Rate of force development: Physiological and methodological considerations. *European Journal of Applied Physiology*, 116(6), 1091–1116.
<https://doi.org/10.1007/s00421-016-3346-6>
- Malina, R. M., Bouchard, C., & Bar-Or, O. (2004). *Growth, Maturation, and Physical Activity*. Human Kinetics.
- Markovic, G., Dizdar, D., Jukic, I., & Cardinale, M. (2004). Reliability and Factorial Validity of Squat and Countermovement Jump Tests. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(3), 551–555. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2004\)18<551:RAFVOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2004)18<551:RAFVOS>2.0.CO;2)
- Martínez-Cava, A., Hernández-Belmonte, A., Courel-Ibáñez, J., Morán-Navarro, R., González-Badillo, J. J., & Pallarés, J. G. (2020). Reliability of technologies to measure the barbell velocity: Implications for monitoring resistance training. *PLoS One*, 15(6), e0232465. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232465>
- Menzi, C., Zahner, L., & Kriemler, S. (2007). Krafttraining im Kindes- und Jugendalter. *Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie»*, 55(2), 38–44.
- Merrigan, J. J., Rentz, L. E., Hornsby, W. G., Wagle, J. P., Stone, J. D., Smith, H. T., Galster, S. M., Joseph, M., & Hagen, J. A. (2022). Comparisons of Countermovement Jump Force-Time Characteristics Among National Collegiate Athletic Association Division I American Football Athletes: Use of Principal Component Analysis. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 36(2), 411.
<https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000004173>
- Meylan, C. M. P., Cronin, J. B., Oliver, J. L., Hughes, M. G., & Manson, S. (2014). An Evidence-Based Model of Power Development in Youth Soccer. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 9(5), 1241–1264. <https://doi.org/10.1260/1747-9541.9.5.1241>

- Meylan, C. M. P., Cronin, J. B., Oliver, J. L., Hughes, M. M. G., Jidovtseff, B., & Pinder, S. (2015). The reliability of isoinertial force–velocity–power profiling and maximal strength assessment in youth. *Sports Biomechanics*, 14(1), 68–80.
<https://doi.org/10.1080/14763141.2014.982696>
- Mirwald, R. L., G. Baxter-Jones, A. D., Bailey, D. A., & Beunen, G. P. (2002). An assessment of maturity from anthropometric measurements: Medicine & Science in Sports & Exercise. 2002. https://journals.lww.com/acsm-msse/fulltext/2002/04000/an_assessment_of_maturity_from_anthropometric.20.aspx
- Morin, J.-B., & Samozino, P. (2016). Interpreting Power-Force-Velocity Profiles for Individualized and Specific Training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(2), 267–272. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0638>
- Moritani, T., & deVries, H. A. (1979). Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *American Journal of Physical Medicine*, 58(3), 115–130.
- Nikolaidis, P. T. (2012). AGE-RELATED DIFFERENCES IN FORCE-VELOCITY CHARACTERISTICS IN YOUTH SOCCER. *Kinesiology (Zagreb, Croatia)*, 44(2), 130–138.
- Nishikawa, K., & Huck, T. G. (2021). Muscle as a tunable material: Implications for achieving muscle-like function in robotic prosthetic devices. *Journal of Experimental Biology*, 224(19), jeb225086. <https://doi.org/10.1242/jeb.225086>
- Pleša, J., Kozinc, Ž., Bishop, C., & Šarabon, N. (2024). Association Between Dynamic Strength Index Derived from Isometric Squat and Squat Jump or Countermovement Jump and Force-Velocity Profile. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 28(1), 57–65. <https://doi.org/10.1080/1091367X.2023.2223619>
- Rassier, D. E., & Herzog, W. (2004). Considerations on the history dependence of muscle contraction. *Journal of Applied Physiology*, 96(2), 419–427.
<https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00653.2003>

- Reeves, N. D., & Narici, M. V. (2003). Behavior of human muscle fascicles during shortening and lengthening contractions in vivo. *Journal of Applied Physiology*, 95(3), 1090–1096. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01046.2002>
- Reznar, L., & Bogoevski, G. (2022). „Entwicklung der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung im Kindes- & Jugendalter bei untrainierten Kindern“ [Dataset].
- Round, J. 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. <https://doi.org/10.1080/030144699282976>
- Samozino, P., Rejc, E., Di Prampero, P. E., Belli, A., & Morin, J.-B. (2012). Optimal Force–Velocity Profile in Ballistic Movements—Altius. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(2), 313. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31822d757a>
- Seger, J. Y., & Thorstensson, A. (2000). Muscle strength and electromyogram in boys and girls followed through puberty. *European Journal of Applied Physiology*, 81(1), 54–61. <https://doi.org/10.1007/PL00013797>
- Seow, K. N., & Seow, C. Y. (2022). Molecular Events of the Crossbridge Cycle Reflected in the Force–Velocity Relationship of Activated Muscle. *Frontiers in Physiology*, 13, 846284. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.846284>
- Smajla, D., Spudić, D., Kozinc, Ž., & Šarabon, N. (2022). Differences in Force-Velocity Profiles During Countermovement Jump and Flywheel Squats and Associations With a Different Change of Direction Tests in Elite Karatekas. *Frontiers in Physiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.828394>
- Sport Austria. (2021). *Sport Austria. Mikrozensus 2021: Sportvereine in Österreich*.
- Strong, W. B., Malina, R. M., Blimkie, C. J. R., Daniels, S. R., Dishman, R. K., Gutin, B., Hergenroeder, A. C., Must, A., Nixon, P. A., Pivarnik, J. M., Rowland, T., Trost, S., & Trudeau, F. (2005). Evidence based physical activity for school-age youth. *The Journal of Pediatrics*, 146(6), 732–737. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2005.01.055>
- Tanner, J. M. (1962). *Wachstum und Reifung des Menschen*. Thieme.

- Tremblay, M. S., Katzmarzyk, P. T., & Willms, J. D. (2002). Temporal trends in overweight and obesity in Canada, 1981-1996. *International Journal of Obesity and Related Metabolic Disorders: Journal of the International Association for the Study of Obesity*, 26(4), 538–543.
- Valenzuela, P. L., Sánchez-Martínez, G., Torrontegi, E., Vázquez-Carrión, J., Montalvo, Z., & Haff, G. G. (2021). Should We Base Training Prescription on the Force-Velocity Profile? Exploratory Study of Its Between-Day Reliability and Differences Between Methods. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(7), 1–1007. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0308>
- Watzlawik, M. (2009). Die Erfassung des Pubertätsstatus anhand der Pubertal Development Scale. *Diagnostica*, 55(1), 55–65. <https://doi.org/10.1026/0012-1924.55.1.55>
- Wiggin, M., Wilkinson, K., Habetz, S., Chorley, J., & Watson, M. (2006). Percentile values of isokinetic peak torque in children six through thirteen years old. *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association*, 18(1), 3–18. <https://doi.org/10.1097/01.pep.0000202097.76939.0e>
- Wilkosz, P., Kabacinski, J., Mackala, K., Murawa, M., Ostarello, J., Rzepnicka, A., Szczesny, L., Fryzowicz, A., Maczynski, J., & Dworak, L. B. (2021). Isokinetic and Isometric Assessment of the Knee Joint Extensors and Flexors of Professional Volleyball Players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(13), 6780. <https://doi.org/10.3390/ijerph18136780>
- Yapici, H., Gulu, M., Yagin, F. H., Eken, O., Gabrys, T., & Knappova, V. (2022). Exploring the Relationship between Biological Maturation Level, Muscle Strength, and Muscle Power in Adolescents. *Biology*, 11(12), 1722. <https://doi.org/10.3390/biology11121722>
- Zöger, M., Nimmerichter, A., Baca, A., & Wirth, K. (2025). Reproducibility of peak force for isometric and isokinetic multi-joint leg extension exercise. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 17(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s13102-025-01061-1>

Zubčić, D., & Vučetić, V. (2022). Influence of individualized training based on mechanical force-velocity profile on the bilateral vertical jump performance. *Kinesiology*, 54(1), 133–139. <https://doi.org/10.26582/k.54.1.14>