

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Kraft-Geschwindigkeits-Relation im Kindes- und Jugendalter

verfasst von | submitted by

Daniel Kotnik BSc

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

Master of Science (MSc)

Wien | Vienna, 2026

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

Kurzfassung

Die Kraft-Geschwindigkeits-Relation (F-V-Relation) ist eine elementare Kenngröße der muskulären Leistungsfähigkeit. Da die F-V-Relation bei Kindern und Jugendlichen noch wenig erforscht ist, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, zu untersuchen, welchen Einfluss der biologische Entwicklungsstand auf die F-V-Relation hat. Das F-V-Profil wurde anhand von Messungen der Kniestreckkraft, mittels eines isokinetischen Dynamometer, bestimmt. Der biologische Entwicklungsstand wurde anhand der peak height velocity (PHV) bestimmt. Es wurde untersucht, ob es Unterschiede hinsichtlich des F-V-Profils zwischen den Gruppen Pre-PHV, Mid-PHV und Post-PHV gibt. Dafür wurden die Parameter T_0 , V_0 und $P_{\max}$ zwischen den drei Gruppen verglichen. T_0 und $P_{\max}$ wurden sowohl als Absolutwert, als auch als Relativwert, nach Normalisierung über das Körpergewicht, untersucht. Die Post-PHV Gruppe erzielte ein signifikant höheres T_0 als die Pre-PHV Gruppe ($p = 0,003$). Bei V_0 zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Gruppen ($p = 0,957$). Bei $P_{\max}$ erzielte die Post-PHV Gruppe signifikant höhere Werte als die Pre-PHV Gruppe ($p = 0,011$). Wenn die Werte über das Körpergewicht normalisiert wurden, zeigte sich bei T_0 ($p = 0,325$) und $P_{\max}$ ($p = 0,366$) kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Gruppen. Der biologische Entwicklungsstand beeinflusst die F-V-Relation nur über T_0 , welches nach Erreichen des PHV höher ist als davor. V_0 scheint nicht durch den biologischen Entwicklungsstand beeinflusst zu werden. Eine höhere $P_{\max}$ ist somit ausschließlich Folge eines gesteigerten T_0 . Sobald T_0 und $P_{\max}$ relativ betrachtet werden, entfällt der Unterschied. Der Kraftanstieg im Zuge der Pubertät scheint somit Folge einer zunehmenden Körper- und Muskelmasse zu sein.

Abstract

The force-velocity relationship (F-V-relationship) is a fundamental parameter of muscular performance. Since the F-V-relationship in children and adolescents remains under-researched, the aim of the present study was to investigate the influence of biological maturity on the F-V-relationship. The F-V-profile was determined through measurements of knee extension strength using an isokinetic dynamometer. Biological maturity was assessed based on peak height velocity (PHV). The study examined whether differences in the F-V-profile exist between the Pre-PHV, Mid-PHV and Post-PHV groups. For this purpose, the parameters T_0 , V_0 and $P_{\max}$ were compared across the three groups. T_0 and $P_{\max}$ were analyzed both as absolute values and as relative values after normalization to body weight. The Post-PHV group achieved a significantly higher T_0 than the Pre-PHV group ($p = 0.003$). No significant difference was found between the three groups for V_0 ($p = 0.957$). For $P_{\max}$, the Post-PHV group achieved significantly higher values than the Pre-PHV group ($p = 0.011$). When values were normalized to body weight, no significant differences were found between the three groups for T_0 ($p = 0.325$) and $P_{\max}$ ($p = 0.366$). Biological maturity influences the F-V-relationship only via T_0 , which is higher after reaching PHV than before. V_0 does not appear to be influenced by biological maturity. Consequently, a higher $P_{\max}$ is solely a result of increased T_0 . Once T_0 and $P_{\max}$ are considered relatively, the differences disappear. The increase in strength during puberty thus appears to be a consequence of increasing body and muscle mass.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Theoretische Grundlage	5
2.1	Biomechanik	5
2.1.1	Kinematik	6
2.1.2	Dynamik	7
2.2	Muskelphysiologie	9
2.2.1	Aufbau	10
2.2.2	Funktionsweise	12
2.2.3	Kontraktionsformen	13
2.3	Kraft-Geschwindigkeits-Relation	14
2.3.1	Grundlagenforschung von Hill	14
2.3.2	Weiterführende Forschung zur F-V-Relation	16
2.3.3	Bestimmung der F-V-Relation in vivo	19
2.3.4	Leistung-Geschwindigkeits-Relation	20
2.4	Entwicklungen im Kindes- und Jugendalter	22
2.4.1	Hormonelle Veränderungen	22
2.4.2	Körperliche Veränderungen	25
2.4.3	Peak Height Velocity	26
2.4.4	Berechnung der PHV	29
3	Aktueller Forschungsstand	31
4	Forschungsfrage	32
5	Methodik	33
5.1	Studienteilnehmer	33
5.2	Studienablauf	33
5.2.1	Messung des biologischen Entwicklungsstands	33
5.2.2	Messung des F-V-Profiles	34
5.3	Statistische Analyse	35
6	Ergebnisse	36

6.1	Deskriptive Statistik.....	36
6.2	F-V-Relation.....	37
6.3	Relative F-V-Relation	39
6.4	Maximale Muskelleistung	40
6.5	Relative maximale Muskelleistung	41
7	Diskussion.....	43
7.1	Implikationen für das Training	46
7.2	Limitationen	46
7.3	Fazit.....	47
8	Literaturverzeichnis	49
9	Abbildungsverzeichnis.....	55
10	Tabellenverzeichnis.....	57
11	Anhang	58

1 Einleitung

Die Kraft-Geschwindigkeits-Relation, im englischen *force-velocity (F-V) relationship*, ist eine elementare Kenngröße der muskulären Leistungsfähigkeit, deren Bedeutung über den Sport hinausgeht. Mit ihrer Hilfe kann die Muskelfunktion beschrieben werden und somit gibt sie Informationen über die körperliche Leistung einer Person (Alcazar et al., 2017) und kann zur Bestimmung der muskulären Ermüdung genutzt werden (Jones, 2010). Im Spitzensport findet die F-V-Relation bereits Anwendung in der Trainingsplanung. Adaptationen im Trainingsprozess können so gut mitverfolgt werden (Lindberg et al., 2021). Die F-V-Beziehung ist ebenso im Alterungsprozess von Bedeutung, denn die Muskelleistung sinkt mit fortschreitendem Alter. Eine altersbedingte Beeinträchtigung der Mobilität oder in weiterer Folge auch Behinderung ist oft bedingt durch eine mangelnde Muskelleistung. Dies geht mit einer Einschränkung der Lebensqualität einher und sollte so gut es geht vermieden werden. Dabei kann Kenntnis der F-V-Relation wertvolle Rückschlüsse geben, da dadurch Trainingsprogramme so gestaltet werden können, dass individuellen Defiziten in der Muskelfunktion gezielt begegnet wird (Alcazar et al., 2018). Ein weiteres Anwendungsfeld, in dem die F-V-Relation von Bedeutung ist, ist die Robotik. Hier wird sie herangezogen, um durch die Analyse der Muskeleigenschaften, Prothesen herstellen zu können (Alcazar et al., 2022).

Obwohl die F-V-Relation in den letzten Jahren in vielen Studien untersucht wurde, ist sie im Kindes- und Jugendalter bis jetzt wenig erforscht. Diese Studie hat sich somit zum Ziel gesetzt, zu untersuchen, wie sich die Muskelleistung in diesem Alter entwickelt.

In einem ersten Teil wird der theoretische Hintergrund der Arbeit dargestellt, um für ein besseres Verständnis der Studie zu sorgen. Im methodischen Teil wird der Ablauf der Studie beschrieben. Darauffolgend werden die Ergebnisse der Studie präsentiert und anschließend in einem weiteren Kapitel diskutiert.

2 Theoretische Grundlage

2.1 Biomechanik

Die Mechanik ist jene Wissenschaft, die sich mit der Bewegung eines Körpers beschäftigt. Sie beschreibt sowohl die Bewegung des Körpers im Raum, als auch die Kräfte, die auf diesen wirken. Hierbei stehen die Bewegungsbeschreibungen eines starren Körpers im Mittelpunkt (Wess et al., 2007). Um die Bewegungen eines menschlichen Körpers zu beschreiben, müssen zusätzlich zu den Gesetzen der klassischen Mechanik ebenfalls die biologischen Merkmale des menschlichen Bewegungsapparates berücksichtigt werden. Um menschliche Bewegungen nun beschreiben zu können, bedient man sich der Wissenschaft der Biomechanik (Wank, 2021). Glaser (1989, S. 9) definiert die Biomechanik als die

Wissenschaft, die „die Wirkung mechanischer Gesetzmäßigkeiten in biologischen Systemen und die Antwort dieser Systeme auf mechanische Einflüsse der Umwelt“ beschreibt. Die Biomechanik ist somit eine interdisziplinäre Wissenschaft, die die Gesetze der klassischen Mechanik mit der Anatomie und der Physiologie des menschlichen Körpers kombiniert (Güllich und Krüger, 2013).

Um die Bewegung eines Körpers beschreiben zu können, wird die Mechanik in zwei Bereiche gegliedert: die Kinematik und die Dynamik. Die Kinematik beschreibt Bewegung ohne Kräfte miteinzubeziehen, während die Dynamik sich zusätzlich mit den Kräften beschäftigt, die auf einen Körper wirken (Güllich und Krüger, 2013).

2.1.1 Kinematik

Die Kinematik wird von Wank (2021, S. 14) beschrieben, als „die Lehre von Bewegungen der Körper“. Sie befasst sich somit mit Bewegungen eines Körpers in Raum und Zeit. Die Ursache der Bewegung, welche Kräfte auf diesen Körper wirken, werden dabei nicht berücksichtigt.

In der Kinematik stellt der Weg die Basisgröße dar. Durch den Weg und die zeitliche Veränderung, kann die Bewegung eines Körpers beschrieben werden. Hierfür wird der Körper als Massepunkt, der den Schwerpunkt des Körpers darstellt, betrachtet. Außerdem wird ein Bezugssystem benötigt, indem sich der Körper bewegt, um die Bewegung beschreiben zu können. In dieses wird dann ein Koordinatensystem gelegt. Im Sport können unter anderem Sporthallen, Stadien oder Labore als Bezugssysteme dienen. Bei Bewegungen der Gliedmaßen einer Person, wird als Bezugssystem der Körper selbst gewählt (Güllich und Krüger, 2013; Wank, 2021). Die Kinematik unterscheidet zwischen zwei verschiedenen Bewegungsformen: die Translation und die Rotation.

Bei Translationen bewegt sich ein Körper in eine bestimmte Richtung. Diese Bewegung kann sowohl geradlinig als auch gekrümmt sein. Der Körper behält jedoch während der gesamten Zeit dieselbe Orientierungsrichtung im Raum bei. Neben dem Weg können bei translatorischen Bewegungen mithilfe der zeitlichen Betrachtung auch Geschwindigkeiten und Beschleunigungen beschrieben werden. Die kinematischen Größen der Translation werden in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Kinematische Größen der Translation

Größe	Formelzeichen	Einheit
Weg	s	m
Geschwindigkeit	v	m/s
Beschleunigung	a	m/s ²

Quelle: mod. n. Wank (2021, S. 15).

Die Rotation stellt eine Drehbewegung dar. Alle Punkte eines Körpers drehen sich dabei um denselben Punkt, die sogenannte Drehachse oder das Rotationszentrum. Um rotatorische Bewegungen zu beschreiben, werden Winkelkoordinaten verwendet. Dabei wird ein fixer Punkt des sich drehenden Körpers betrachtet. Dieser Punkt darf nicht im Rotationszentrum liegen. Ähnlich wie bei der Translation, werden rotatorische Bewegungen ebenfalls mit Geschwindigkeiten und Beschleunigungen beschrieben, in diesem Fall die Winkelgeschwindigkeit und die Winkelbeschleunigung. Je nach Anwendungsgebiet können sich die Einheiten der Winkel unterscheiden. Die kinematischen Größen der Rotation sind in Tabelle 2 dargestellt. Bei rotatorische Bewegungen wird zwischen zwei Arten unterschieden: eine zentrische und eine exzentrische Drehung. Bei der zentrischen Drehung wird um den Körperschwerpunkt rotiert. Bei der exzentrischen Drehung verläuft die Rotation um eine Achse, die außerhalb des Körperschwerpunktes liegt (Güllich und Krüger, 2013; Wank, 2021).

Tabelle 2: Kinematische Größen der Rotation

Größe	Formelzeichen	Einheit
Winkel	θ	°, rad, U (Umdrehung)
Winkelgeschwindigkeit	ω	°/s, rad/s, U/s
Winkelbeschleunigung	α	°/s ² , rad/s ² , U/s ²

Quelle: mod. n. Wank (2021, S. 21).

In der Praxis treten jedoch Translation und Rotation so gut wie nie unabhängig voneinander auf. Die meisten Bewegungen sind eine Kombination aus beiden. Wenn man einen Schuss mit einem Ball betrachtet, sieht man in erster Linie eine translatorische Bewegung. Zusätzlich wird der Ball aber auch eine zentrische Rotation haben, da eine Krafteinwirkung außerhalb des Mittelpunktes zu einer Rotation führt. Ebenso können auch rotatorische Bewegungen eine Translation herbeiführen. Beim Fahrradfahren beispielsweise führt eine Rotation in mehreren Gelenken zu einer Translation des Fahrrades. Wie man an den beiden Beispielen sieht, wird für eine translatorische und rotatorische Bewegung immer eine Kraft benötigt (Güllich und Krüger, 2013).

2.1.2 Dynamik

Wie zuvor erläutert, beschreibt die Kinematik die Bewegungen eines Körpers. Die Ursache, die zu der Bewegung führt, welche Kräfte somit auf den Körper wirken, werden von der Dynamik beschrieben. Die Dynamik kann in zwei Bereiche unterteilt werden: die Statik und die Kinetik. Die Statik beschreibt die Krafteinwirkung auf ein ruhendes Objekt, während die Kinetik jene auf ein bewegtes Objekt beschreibt (Güllich & Krüger, 2023).

Bei translatorischen Bewegungen ist die Basisgröße der Dynamik die Masse (m), welche in Kilogramm (kg) ausgedrückt wird. Setzt man die Masse mit der Beschleunigung in Verbindung, so erhält man die Kraft (F). Die Kraft wird somit mit Formel 1 ausgedrückt:

$$\vec{F} = m \times \vec{a} \quad (1)$$

Die Einheit der Kraft ist Newton (N). Ein Newton ist somit jene Kraft, die benötigt wird, um ein Objekt mit einer Masse von 1 kg auf 1 m/s zu beschleunigen (Tomasits & Haber, 2011). Wenn die Wirkungslinie der Kraft durch den Körperschwerpunkt verläuft, führt sie zu einer Translation. Führt die Kraftwirkungslinie außerhalb des Drehzentrums vorbei, erzeugt sie eine rotatorische Bewegung. Diese wird als Drehmoment (M) bezeichnet. Das Drehmoment ist in der Rotation somit das Äquivalent zur Kraft in der Translation. Das Drehmoment ist abhängig von der einwirkenden Kraft, sowie vom Hebel, mit welchem die Kraft einwirkt. Der Hebel ist der Abstand zum Drehzentrum und wird als Radius r angegeben (Wank, 2021). Wenn die Kraft mit einem rechten Winkel auf den Hebel wirkt, ergibt sich für das Drehmoment die Formel 2:

$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r} \quad (2)$$

Die Einheit für das Drehmoment ist Newtonmeter (Nm). Die Kraft wirkt aber nicht immer rechtwinkelig auf den Hebelarm ein. Wenn die Kraft mit einem gewissen Winkel (φ) einwirkt, wird das Drehmoment anhand von Formel 3 dargestellt:

$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r} \times \sin(\varphi) \quad (3)$$

Die physikalischen Größen der Dynamik werden in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Physikalische Größen der Dynamik

Größe	Formelzeichen	Einheit
Masse	m	kg
Kraft	F	N (= kg·m/s ²)
Drehmoment	M	Nm

Quelle: mod. n. Wank (2021, S. 30 und S. 38).

Ein menschlicher Körper kann sowohl von innen als auch von außen bewegt werden. Deshalb ist es im sportlichen Kontext wichtig, zwischen den inneren und den äußeren Kräften zu unterscheiden. Die äußeren Kräfte sind alle Kräfte, die in Interaktion mit der Umwelt stattfinden. Diese sind zum Beispiel die Schwerkraft, die Kräfte die von einem Sportgerät oder einem Gegner auf eine Person wirken, Bodenreaktionskräfte und auch Widerstandskräfte, wie der Luftwiderstand. Im Gegensatz dazu sind innere Kräfte jene Kräfte, die aus dem Inneren des Körpers eines Menschen wirken. Diese sind die Muskelkräfte, die durch Kontraktion der Muskulatur entstehen und über Gelenke in die Extremitäten übertragen werden (Wank, 2021). Im Folgenden werden die Begriffe Arbeit und Leistung beschrieben.

Arbeit

Kraft wird benötigt, um die Geschwindigkeit eines Körpers zu verändern, ihn also zu beschleunigen oder abzubremesen. Wirkt eine Kraft entlang eines Weges, so wird mechanische Arbeit verrichtet. Arbeit beschreibt dabei die Übertragung von Energie durch eine Kraftwirkung. Bei konstanter Kraft in Bewegungsrichtung ergibt sich die Arbeit als Produkt aus Kraft und Weg (Wank, 2021) (Formel 4):

$$W = \vec{F} \times \vec{s} \quad (4)$$

Aus Formel 4 ergibt sich Newtonmeter (Nm) als Einheit der Arbeit. Wie bereits beschrieben, wird beim Verrichten einer Arbeit Energie umgewandelt. Arbeit ist somit der Prozess der Energieänderung. Die Einheit der Energie ist Joule (J), wobei 1 Joule jener Energiemenge entspricht, die benötigt wird, um einen Körper mit der Kraft von 1 Newton über die Strecke von 1 Meter zu bewegen. Ein Joule ist somit das Äquivalent zu einem Newtonmeter. Joule ist daher auch die meistgenutzte Einheit für die Arbeit (Tomasits & Haber, 2011).

Leistung

Die physikalische Leistung (P) wird definiert als jene Arbeit, die in einer gewissen Zeit verrichtet wird. Sie kann sowohl als durchschnittliche Leistung, die über eine definierte Zeitperiode realisiert wird, angegeben werden, als auch als momentane Leistung (Güllich & Krüger, 2023). Die momentane Leistung zu dem Zeitpunkt t ergibt sich aus der zeitlichen Ableitung der Arbeit (Formel 5):

$$P(t) = \frac{dW}{dt} \quad (5)$$

Die Einheit der Leistung ist Watt (W). Wie im vorherigen Punkt beschrieben, wird Arbeit als Kraft mal Weg definiert. Durch Umformen kann die Leistung somit auch durch Formel 6 beschrieben werden:

$$P = \vec{F} \times \vec{v} \quad (6)$$

Die Leistung kann neben Watt auch unter der Einheit Joule pro Sekunde (J/s) angegeben werden (Tomasits & Haber, 2011).

2.2 Muskelphysiologie

Um Bewegungen zu ermöglichen und die Körperhaltung aufrechtzuerhalten, wird der menschliche Körper anatomisch gesehen in den Stütz- und Bewegungsapparat unterteilt. Der

Stützapparat stellt das passive System dar, bestehend aus Knochen, Knorpel, Gelenken und Bändern. Seine Aufgabe ist es, dem Körper Stabilität und Form zu geben und die inneren Organe zu schützen. Der Bewegungsapparat stellt das aktive System des Körpers dar. Dieser ist für die Bewegungen des Körpers zuständig. Der aktive Bewegungsapparat besteht aus der Muskulatur, sowie dessen Hilfsorganen, den Sehnen und Faszien (Güllich & Krüger, 2013). Die Muskulatur wird, abhängig von ihren strukturellen Eigenschaften, in zwei unterschiedliche Typen unterteilt: die quergestreifte Muskulatur und die glatte Muskulatur. Zur quergestreiften Muskulatur gehören sowohl die Skelettmuskulatur als auch die Herzmuskulatur. Die Skelettmuskeln sind überwiegend jene Muskeln, die über Sehnen und Faszien mit dem Skelett verbunden sind. Sie können willkürlich bewegt werden und ermöglichen dadurch die nach außen hin gerichteten Bewegungen des Körpers. Obwohl sie nicht das Skelett bewegen, zählen unter anderem Muskeln wie die Zunge oder das Zwerchfell ebenfalls zur Skelettmuskulatur. Die Skelettmuskulatur stellt mit 40 % der Körpermasse bei Männern, sowie 30% bei Frauen, das größte Organ des menschlichen Körpers dar (Tomasits & Haber, 2011). Die Herzmuskulatur weist im Vergleich zur Skelettmuskulatur einige Unterschiede auf. Einer der größten Unterschiede ist, dass sich die Herzmuskulatur nicht willkürlich steuern lässt. Außerdem ist die Herzmuskulatur quasi unermüdlich und kann durchgehend arbeiten, während die Skelettmuskulatur nach intensiver Belastung Erholung braucht.

Die glatte Muskulatur stellt mit etwa 1,5 % einen geringeren Anteil am Gesamtgewicht des Körpers dar (Vaupel et al., 2015). Diese hat große Bedeutung in den inneren Organsystemen und befindet sich unter anderem im Magen-Darm-Trakt, den Blutgefäßen und den Atemwegen. Sie kann nicht willkürlich gesteuert werden und sorgt für die Bewegung und Regulation der inneren Organe (Kraft & Brenner, 2019; Vaupel et al., 2015). In weiterer Folge wird auf die Skelettmuskulatur eingegangen, da diese für die Arbeit von größerer Relevanz ist.

2.2.1 Aufbau

Ein Skelettmuskel wird eingeteilt in einen Muskelbauch, den mittleren Teil des Muskels, und die Sehnen, die sich an beiden Enden des Muskels befinden. Über die Sehnen ist der Muskel mit den Knochen verbunden. Der gesamte Muskel ist von dem Epimysium, der äußersten Hülle, umgeben und dieses stellt die Verbindung zur Muskelfaszie dar. Der Muskelbauch besteht aus einer Vielzahl an Muskelfasern, die als Muskelfaserbündel zusammengefasst werden. Die Muskelfasern sind jeweils zwischen 1 mm und 20 cm lang und 10 bis 100 µm dick. Eine einzelne Muskelfaser wird vom Endomysium umhüllt und Muskelfaserbündel vom Perimysium. Eine Muskelfaser besteht aus einer Vielzahl an Myofibrillen, die eine Dicke von etwa 1 µm haben. Jede Myofibrille ist in hintereinandergeschaltete Abschnitte unterteilt, die sogenannten Sarkomere, die kleinsten funktionellen Einheiten. Ein Sarkomer besteht aus den beiden kontraktile Filamenten Aktin und Myosin, sowie weiteren Begleitproteinen. Die

Bereiche der Aktin- und Myosinfilamente sind so zusammengestellt, dass sie sich in regelmäßigen Abständen abwechseln und im Mikroskop unterschiedliche Lichtdurchlässigkeiten zeigen. Die I-Bande, bestehend aus Aktinfilamenten, erscheint heller, während die A-Bande, welche aus Myosinfilamenten besteht, dunkel erscheint. Durch die abwechselnde Anordnung an hellen und dunkeln Strukturen kommt es zu einer erkennbaren Querstreifung, die namensgebend für die quergestreifte Muskulatur ist. In der I-Bande befindet sich die Z-Scheibe, die quer zur Myofibrillen Länge verläuft und die I-Bande in zwei Teile teilt. Zwischen zwei Z-Scheiben befindet sich das Sarkomer. Die Aktinfilamente sind an den Z-Scheiben befestigt. Die Myosinfilamente sind an der M-Linie befestigt, die sich in der Mitte des Sarkomers befindet und, so wie die Z-Scheibe, ebenfalls quer zur Myofibrillen Länge verläuft. Ein Myosinfilament besteht aus einem Schwanzteil, welches mit der M-Linie verbunden ist. Am anderen Ende befindet sich ein beweglicher Halsteil, an welchem sich die Myosinköpfe befinden. Diese Köpfe können sich mit dem Aktin verbinden. Durch das Ineinandergleiten der beiden Filamente Aktin und Myosin wird eine Kontraktion der Muskulatur und somit Bewegung ermöglicht (Güllich & Krüger, 2013; Vaupel et al., 2015; Schünke et al., 2022). Dies wird im folgenden Unterkapitel genauer beschrieben. Der Aufbau eines quergestreiften Muskels wird in Abbildung 1 dargestellt.

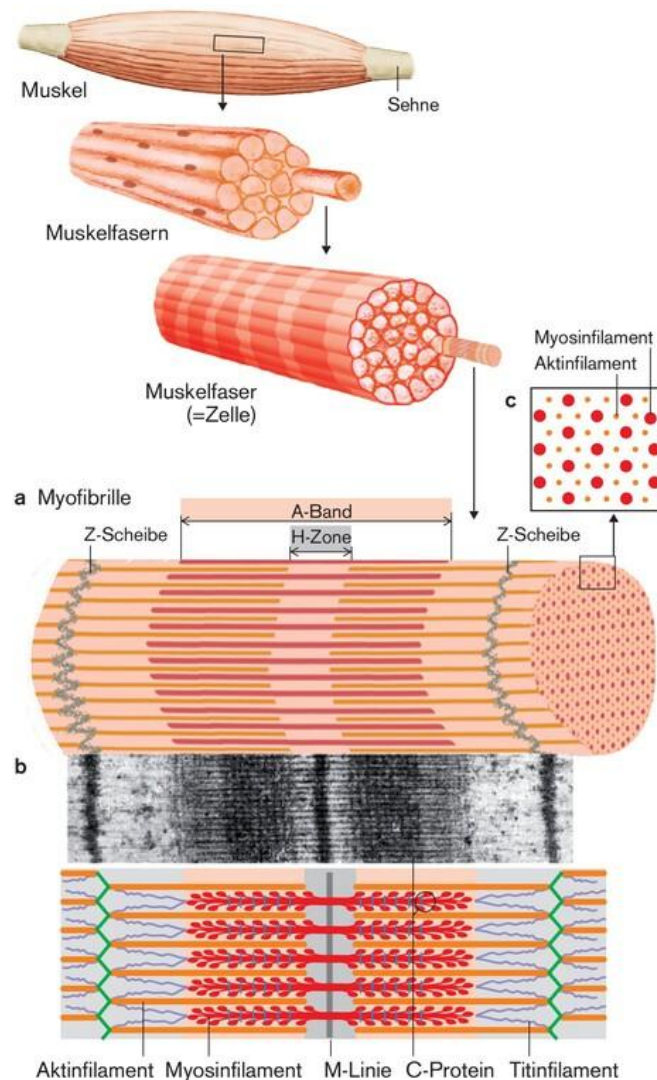


Abbildung 1: Organisation eines quergestreiften Muskels (Kraft & Brenner, 2019, S. 137).

2.2.2 Funktionsweise

In diesem Unterkapitel wird die Funktionsweise der Kontraktion der quergestreiften Muskulatur beschrieben. Kontraktionen finden in den Sarkomeren statt. Um das Aktinfilament schlängelt sich das Protein Tropomyosin, auf welchem sich das Molekül Troponin befindet. Troponin verhindert, dass sich Aktin und Myosin im Ruhezustand miteinander verbinden. Im entspannten Zustand, in dem keine Ca^{2+} -Ionen in Troponin anwesend sind, ist Tropomyosin und Troponin so gelagert, dass sich die Myosinköpfe nicht an Aktin binden können. Im Myosinkopf befindet sich außerdem das Molekül Adenosintriphosphat (ATP), welches die Bindung von Myosin an Aktin zusätzlich verhindert. Durch ein Aktionspotential beginnt die Aktivierung eines Muskels. Dabei wird Ca^{2+} freigesetzt, welches sich an Troponin bindet. Dies verursacht eine Veränderung der Struktur des Troponin, wodurch die Bindungsstellen des Aktin freigegeben werden. Die Enzymaktivität von Myosin wird ebenfalls gesteigert, wodurch ATP in Adenosindiphosphat (ADP) und einem Phosphat gespalten wird. Es kommt nun zur

Querbrückenbildung und der Myosinkopf bindet an das Aktin. Durch die Abgabe von Phosphat und darauffolgend ADP wird Energie freigesetzt. Diese Energie führt dazu, dass der Myosinkopf sich von seiner Ruhestellung von 90° um 45° kippt. Dadurch wird das Aktin in die Mitte des Sarkomers gezogen. Das Sarkomer verkürzt sich somit. Ein einzelner Querbrückenzyklus verkürzt das Sarkomer lediglich um 1%. Um ein Sarkomer weiter verkürzen zu können, finden Querbrückenverbindungen immer wieder statt. Einige halten die Verbindung, während andere zeitgleich neue Verbindungen aufbauen. Der Prozess mehrerer Querbrückenverbindungen findet somit asynchron statt. Ein Sarkomer kann sich um bis zu 40% seiner Gesamtlänge verkürzen. Dazu sind ungefähr 50 Querbrückenverbindungen notwendig. Durch die gleichzeitige Kontraktion in einer Vielzahl an Sarkomeren kommt es zu einer Kontraktion des Muskels, der Muskel spannt sich somit an. Nach der Kontraktion kommt es wieder zur Bindung von ATP an den Myosinkopf. Der Kopf löst sich somit wieder vom Aktin und kehrt in seine Ruheposition von 90° zurück. Die Ca^{2+} -Konzentration sinkt ebenfalls wieder (Vaupel et al., 2015).

2.2.3 Kontraktionsformen

Ein Muskel kann seine Kraft auf verschiedenen Arbeitsweisen entfalten. Biomechanisch gesehen, wird zwischen mehreren Kontraktionsformen der Muskulatur unterschieden. Diese werden abhängig von der Veränderung der Länge und der Spannung der Muskeln unterteilt. Zunächst wird zwischen statischen und dynamischen Kontraktionen unterschieden. Bei statischen Kontraktionen, die ebenfalls „isometrisch“ genannt werden, verändert sich die Spannung der Muskulatur, die Länge des Muskels bleibt gleich. Sie wird umgangssprachlich als „haltend“ bezeichnet, da bei dieser Kontraktionsform eine Last gehalten wird bzw. Kraft gegen einen Widerstand aufgewendet wird, der nicht überwunden werden kann. Bei dynamischen Kontraktionen kommt es zu Veränderungen der Muskellänge. Diese können nochmals in isotonisch und auxoton unterteilt werden. Bei isotonischen Kontraktionen kommt es zu einer Verkürzung der Muskulatur, ohne den Spannungszustand des Muskels zu ändern. Diese Form der Kontraktion kommt im Alltag jedoch äußerst selten vor und wird hauptsächlich maschinell erzeugt. Die am häufigsten vorkommende Kontraktionsform ist die auxotone Kontraktion. Hierbei kommt es sowohl zu einer Veränderung der Muskellänge, als auch zu einer Veränderung des Spannungszustandes. Zwei weitere wichtige dynamische Kontraktionsformen sind die konzentrische und die exzentrische Kontraktion. Bei konzentrischen Bewegungen verkürzt sich ein Muskel, ein Widerstand wird dabei überwunden bzw. eine Last angehoben. Bei exzentrischen Kontraktionen verlängert sich der Muskel. Hierbei wird einer Last nachgegeben wie zum Beispiel eine Last abgesenkt. Konzentrische und exzentrische Kontraktionen sind in der Theorie isotonische Bewegungen, da sich die Länge des Muskels ohne eine Spannungsänderung ändert. Jedoch sind sie in der Praxis meistens auxotone Kontraktionen, da sich bei einer Änderung des Gelenkwinkels ebenfalls

der Spannungszustand ändert (Vaupel et al., 2015; Güllich & Krüger, 2013; Güllich & Krüger, 2023). Eine Sonderform ist die isokinetische Kontraktion. Hier kommt es zu einer Verkürzung der Muskulatur bei konstanter Geschwindigkeit. Diese Kontraktionsform kommt im Alltag nicht vor, sondern kann nur maschinell erzeugt werden (Güllich & Krüger, 2023).

2.3 Kraft-Geschwindigkeits-Relation

Im Bereich des Krafttrainings hat in den letzten Jahre eine Kenngröße immer mehr an Bedeutung gewonnen: die Kraft-Geschwindigkeits-Relation, kurz F-V-Relation. Sie beschreibt die muskuläre Leistungsfähigkeit, und gibt somit Informationen über die körperliche Leistung einer Person (Alcazar et al., 2022; Lindberg et al., 2021). Die Bedeutung der F-V-Relation kann jedoch über den sportlichen Kontext hinaus gehen (Alcazar et al., 2017).

Die F-V-Relation beschreibt die Beziehung, die sich aus der Kraft, die bei einer gewissen Kontraktionsgeschwindigkeit realisiert werden kann, und der Bewegungsgeschwindigkeit der Muskulatur ergibt (Alcazar et al., 2017). Hierbei zeigt sich, dass die Kraft und die Geschwindigkeit invers miteinander verbunden sind. Je höher die Kontraktionsgeschwindigkeit des Muskels, desto niedriger wird seine entfaltete Kraft und umgekehrt (Jaric, 2015). Wenn die Bewegungsgeschwindigkeit sukzessive verringert wird, können immer höhere Kräfte freigesetzt werden, bis man seine Maximalkraft F_0 , an dem Punkt, an dem die Geschwindigkeit gleich null ist, erreicht. Die theoretische Maximalgeschwindigkeit V_0 wird an dem Punkt erreicht, an dem die Kraft gleich null ist. Die beiden Werte F_0 und V_0 können durch Regression modelliert werden (Lindberg et al., 2021). Es hat sich gezeigt, dass bei unterschiedlichen Bewegungsformen, unterschiedliche Regressionsverfahren angewendet werden (Jaric, 2015). Darauf wird in den folgenden Unterkapitel genauer eingegangen.

Die Muskelleistung, die die Leistungsfähigkeit einer Person beschreibt, wird mithilfe der F-V-Relation bestimmt. Die Leistung ergibt sich, wie in den Grundlagen der Biomechanik beschrieben, durch das Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit. Die maximale Muskelleistung $P_{\max}$ wird an dem Punkt erreicht, an dem das Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit sein Maximum hat (Morin & Samozino, 2015; Lindberg et al., 2021).

2.3.1 Grundlagenforschung von Hill

Erste Untersuchungen zur F-V-Relation wurden bereits in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gemacht. Hill (1938) führte in seiner Studie Untersuchungen an einem isolierten Froschmuskel, dem *Musculus sartorius*, durch. Er maß dabei die Wärmeentwicklung bei Muskelkontraktionen. Die Wärme der isometrischen Kontraktion diente dabei als Ausgangsniveau. Wenn sich der Muskel verkürzte, stieg die Wärme über das Ausgangsniveau. Der Wärmeanstieg zeigte sich dabei proportional zur Verkürzungsgeschwindigkeit. Dadurch konnte er die aufgewendete Kraft und die Verkürzungsgeschwindigkeit des Muskels miteinander in Relation setzen. Hill beobachtete

dabei, dass die Kontraktionsgeschwindigkeit eines Muskels bei steigender Kraft sinkt. Eine weitere Beobachtung war, dass die F-V-Kurve bei isolierten Muskeln und eingelenkigen Bewegungen nicht linear verläuft, sondern hyperbolisch. Hill beschrieb die hyperbolische Form mithilfe folgender Formel, auch als „Hill’sche Gleichung“ bekannt:

$$(P + a)(V + b) = (P_0 + a)b \quad (7)$$

In dieser Formel beschreibt P die Kraft, V die Geschwindigkeit und P_0 die isometrische Kraft. Die beiden Buchstaben a und b sind Konstanten, wobei a die „Wärme pro Verkürzung“ darstellt und b die Energierate bei abnehmender Last beschreibt. Die Krümmung der F-V-Relation wird durch das Verhältnis a/P_0 beschrieben. Hill (1938) hat ursprünglich angenommen, dass dieses Verhältnis eine Konstante darstellt, unabhängig der Spezies. Die Form der F-V-Relation, wie von Hill (1938) beschrieben, wird in Abbildung 2 dargestellt.

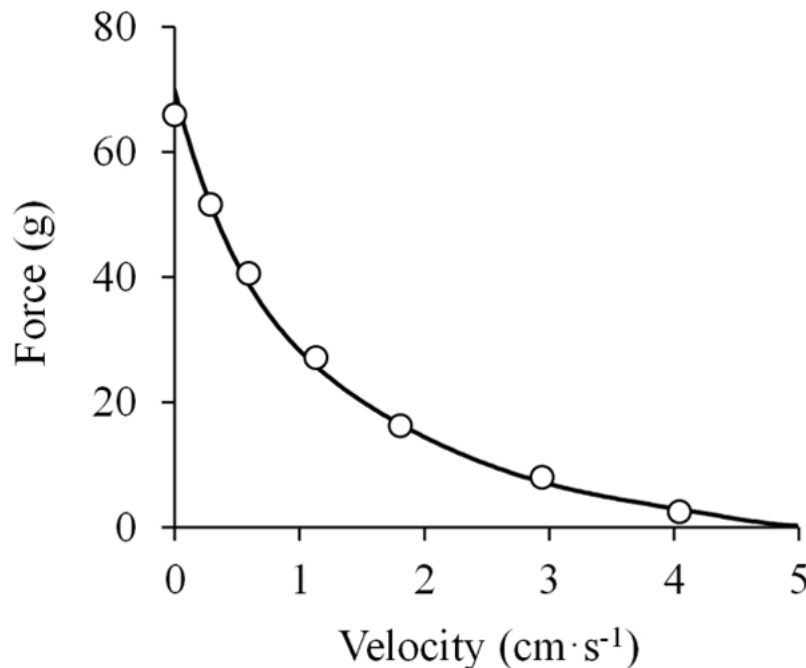


Abbildung 2: Hyperbolische F-V-Relation (Alcazar et al., 2019, S. 4).

Der inverse Zusammenhang zwischen der Kraft und der Kontraktionsgeschwindigkeit ist durch die Funktionsweise der Muskulatur bedingt. Wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben, wird Kraft durch die Bildung von Querbrücken in den Sarkomeren erzeugt. Je mehr Querbrücken gebildet werden, desto höher ist die entfaltete Kraft. Der Kraftabfall bei steigenden Geschwindigkeiten ist dabei auf zwei Mechanismen der Querbrückentheorie zurückzuführen. Zum einen können bei hohen Kontraktionsgeschwindigkeiten nur wenige Querbrücken gebildet werden, da die Myosinköpfe nicht ausreichend Zeit haben, um sich an genug Aktinfilamente binden und wieder lösen zu können. Die erzeugte Kraft ist dadurch niedriger. Bei niedrigeren

Kontraktionsgeschwindigkeiten haben die Myosinköpfe mehr Zeit, um sich an Aktin binden zu können. Es können somit mehr Querbrücken gebildet werden und die Aktin- und Myosinfilamente besser aneinander vorbeigleiten. Zum anderen kann bei schnellen Kontraktionen ein zunehmender Anteil der gebildeten Querbrücken nicht rechtzeitig gelöst werden. Es entstehen dabei Kräfte entgegen der Verkürzungsrichtung, was das weitere Verkürzen des Sarkomers eher erschwert als begünstigt. Die entfaltete Kraft ist bei niedrigeren Kontraktionsgeschwindigkeiten dadurch höher als bei hoher Geschwindigkeit (Brinckmann et al., 2012; Alcazar et al., 2019).

In den darauf folgenden Jahren wurden weitere Studien durchgeführt, in denen die hyperbolische Form der F-V-Relation, wie von Hill (1938) angenommen, als generelles Modell akzeptiert wurde. Katz (1939) hat in seiner Studie die hyperbolische Form bestätigt, jedoch ebenfalls gezeigt, dass das Verhältnis a/P_0 keine Konstante ist. Dieses variiert abhängig der Spezies. Weitere Studien haben gezeigt, dass das Verhältnis auch abhängig von der Muskellänge ist (Abbott & Wilkie, 1953).

2.3.2 Weiterführende Forschung zur F-V-Relation

Die bisherigen Studien wurden an isolierten Muskelpräparaten durchgeführt. Dern et al. (1947) waren die ersten die die F-V-Relation in-vivo getestet haben. Dabei werden nicht nur isolierte Muskeln getestet, sondern Untersuchungen am lebenden Organismus durchgeführt, zum Beispiel durch Krafttests. Diese und weitere Studien haben hinsichtlich der hyperbolischen Form der F-V-Relation, wie von Hill (1938) beschrieben, Abweichungen gezeigt. Die Form der F-V-Relation wird seitdem immer wieder diskutiert, der Wissensstand hat sich seitdem erweitert. Die Forschung ist sich über die Form der F-V-Relation aber noch nicht einig (Alcazar et al., 2019).

Dern et al. (1947) ermittelten in ihrer Studie die F-V-Relation anhand der Ellbogenflexion. Unterschiedlich Widerstände mussten dabei maximal explosiv überwunden werden. Dabei hat sich eine krummlinige Form der F-V-Relation gezeigt. Die Ergebnisse wurden jedoch durch Ermüdungseffekte beeinflusst. Wurden nur die jeweils besten Versuche herangezogen, hat sich eine leicht veränderte Form gezeigt. Bei den Werten höher als 40 % des maximalen Drehmomentwerts ist die F-V-Relation linear. Darunter ist die Form der F-V-Relation krummlinig. Die Form der F-V-Relation, wie in der Studie von Dern et al. (1947) beschrieben, wird in Abbildung 3 dargestellt. Ähnliche Ergebnisse haben Ralston et al. (1949) in ihrer Studie erhalten. Sie haben die Kontraktionsgeschwindigkeit des Musculus pectoralis major gegen unterschiedlich starke Widerstände gemessen. Hierbei sind sie auch zu dem Ergebnis gekommen, dass die F-V-Relation über 40% der Maximalkraft linear und darunter krummlinig ist.

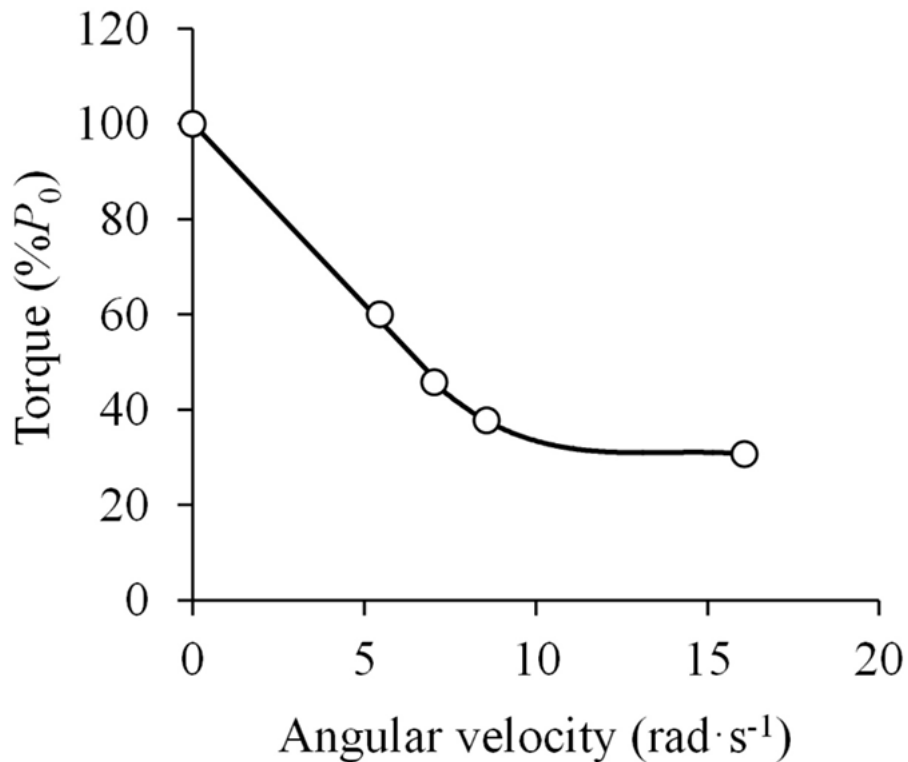


Abbildung 3: Form der F-V-Relation nach Dern et al. (1947; zit. n. Alcazar et al., 2019, S. 5).

Ritchie und Wilkie (1958) haben die Vermutung aufgestellt, dass der isometrische Wert in früheren Studien mit Unsicherheiten behaftet war, und somit Abweichungen der hyperbolischen Form übersehen werden konnten. In den meisten Studien wurden Werte nahe der Maximalkraft, meist über 80 % von P_0 , gar nicht gemessen, wodurch es unwissentlich zu Abweichungen der hyperbolischen Form der F-V-Relation kommen könnte (Alcazar et al., 2019).

Edman et al. (1976) haben in ihrer Studie Datenpunkte über ein breites Spektrum der F-V-Relation durchgeführt, wobei sie auch Messwerte bei niedrigen Bewegungsgeschwindigkeiten aufgenommen haben. Sie haben somit auch den Bereich von über 80 % von P_0 untersucht, der bis dahin noch wenig erforscht war. Edman et al. (1976) sind zu der Erkenntnis gekommen, dass die F-V-Relation eine doppelt-hyperbolische Form hat. Bis zu 78 % von P_0 ist die Form der Kurve gleich mit jener von Hill (1938) beschriebenen hyperbolischen Funktion. Würde die Hill'sche Hyperbel weitergezeichnet werden, würde die Maximalkraft deutlich überschätzt werden. Ab dem Wendepunkt bei 78 % von P_0 wurde der Verlauf der Kurve mit einer weiteren Hyperbel beschrieben. Die gemessene maximale isometrische Kraft liegt dadurch näher an der berechneten Maximalkraft. Die doppelt-hyperbolische Form der F-V-Relation wird in Abbildung 4 dargestellt. Weitere Studien bestätigten diese Form, jedoch zeigten sie andere Werte für den Wendepunkt der beiden Hyperbeln (Devrome & MacIntosh, 2007). Am anderen

Ende der Kurve, im Bereich der hohen Bewegungsgeschwindigkeit bzw. bei niedrigen Kraftwerte, haben sich auch leichte Abweichungen von der hyperbolischen Form gezeigt (Edman, 1979).

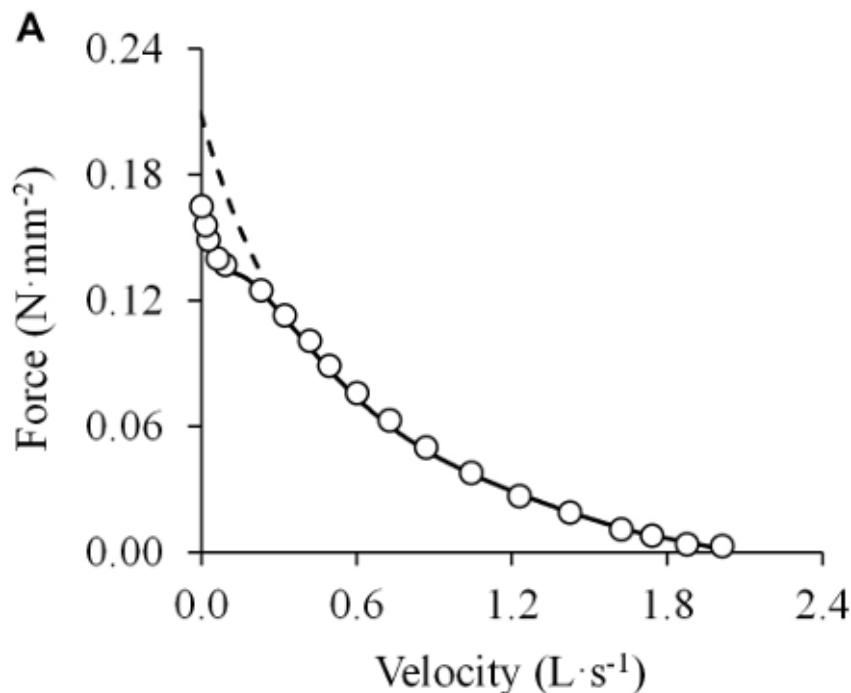


Abbildung 4: Doppelt-hyperbolische Form der F-V-Relation nach Edman et al. (1976; zit. n. Alcazar et al., 2019, S. 7).

Bei mehrgelenkigen Bewegungen hat sich ein weiterer Verlauf der F-V-Relation gezeigt. Bobbert (2012) hat in seiner Studie dabei die F-V-Relation als linear beschrieben. Mehrgelenkige Bewegungen, bei denen es zu einer linearen Form der F-V-Relation kommt, sind zum Beispiel vertikale Sprünge, wie Squat Jumps (Rahmani et al., 2001), Radfahren (Driss et al., 2002), Bewegungen der Arme und des Oberkörpers (Hintzy et al., 2003) oder gleichzeitige Beinstreckungen (Samozino et al., 2011). Bobbert (2012) erklärt, dass die lineare Form nicht auf veränderte Muskelphysiologie zurückzuführen ist, sondern durch die Segmentdynamik bei mehrgelenkigen Bewegungen erklärt wird. Zusätzlich zu mehrgelenkigen Bewegungsformen hat es sich gezeigt, dass einige eingelenkige Bewegungen ebenfalls einen linearen Verlauf der F-V-Relation aufweisen. Dazu zählen unter anderem Knieextensionen (Grbic et al., 2017; Janicijevic et al., 2019). Andere Studien argumentieren jedoch, dass die lineare Form nur darauf zurückzuführen ist, dass bei diesen Bewegungsformen bei sehr hohen Kräften und sehr hohen Bewegungsgeschwindigkeiten keine Datenpunkte erhoben werden. In diesen Extrembereichen verlaufe die Kurve gar nicht linear, sondern sei auch hier hyperbolisch (Alcazar et al., 2019).

Das Wissen über die F-V-Relation, insbesondere über die Form der Kurve, hat sich in den letzten 100 Jahren laufend weiterentwickelt. Aktuell scheint die F-V-Relation am besten durch die doppelt-hyperbolische Form beschrieben zu werden. Jedoch sind die Forschungen über die F-V-Relation und deren Form noch nicht abgeschlossen (Alcazar et al., 2019).

2.3.3 Bestimmung der F-V-Relation in vivo

Um die F-V-Relation bestimmen zu können, werden die Kräfte gemessen, die bei verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeiten aufgewendet werden müssen. Eine andere Möglichkeit wäre, die Geschwindigkeit zu messen, die bei verschiedenen hohen Widerständen erzielt werden kann (Alcazar et al., 2019). Um die Muskelfunktion zu testen, wird meist die isokinetische Dynamometrie als Goldstandard herangezogen (Grbic et al., 2017). Wie bereits zuvor beschrieben, werden in vivo Messungen der F-V-Relation bei mehrgelenkigen Bewegungen meist mit einer linearen Form dargestellt (Bobbert, 2012; Jaric, 2015).

Seit der Studie von Vandewalle et al. (1987) wird die F-V-Relation insofern gemessen, dass die äußere Last systematisch verändert wird. Dadurch erhält man eine Reihe von Kraft- und Geschwindigkeitsdaten, die sich in Form eines annähernd linearen Regressionsmodells darstellen lassen. Diese Regressionsgerade wird in Formel 7 dargestellt:

$$F(V) = F_0 - a \times V \quad (8)$$

V ist die Geschwindigkeit, bei der die Kraft berechnet werden soll. F_0 stellt dabei die theoretische Maximalkraft dar, bei der die Geschwindigkeit bei null liegt. Es ist somit der Punkt, an dem der Graph die y-Achse schneidet. Der Wert a entspricht der Steigung. Diese wird durch den Quotienten von F_0 und V_0 berechnet. V_0 entspricht der theoretischen maximalen Geschwindigkeit. Dies ist somit der Punkt, an dem der Graph die x-Achse schneidet (Jaric, 2015).

Die beiden Studien von Janicijevic et al. (2019) und Sašek et al. (2022) haben jedoch gezeigt, dass bereits zwei Messpunkte ausreichen, um die F-V-Relation zu bestimmen. Die Gerade über zwei Punkte zu bestimmen, hat eine genauso hohe Validität wie die Bestimmung über neun Messpunkten. Um mit der 2-Punkte-Methode valide Werte zu bekommen, sollten die beide Messpunkte mit Geschwindigkeiten durchgeführt werden, die ausreichend weit auseinander liegen. Grbic et al. (2017) haben gezeigt, dass die Geschwindigkeiten von 60 und 180°/s optimal sind, um die F-V-Relation bei einer Knieextension anhand von zwei Messpunkten bestimmen zu können.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass die 2-Punkte-Methode eine geeignete Methode ist, um die F-V-Relation bei Knieextensionen zu bestimmen. Wie bereits erwähnt, ist sie genauso valide wie eine Berechnung mit mehreren Messpunkten. Des Weiteren ist sie auch noch einfacher

und schneller durchzuführen. Ein weiterer Vorteil ist außerdem, dass es bei der Aufnahme von zwei Messwerten bei den getesteten Personen nicht zu so einer großen Ermüdung in der Muskulatur kommt, wie wenn eine Vielzahl von Messpunkten aufgenommen werden müssen (Sašek et al., 2022).

Um die F-V-Relation standardisiert durchführen zu können, haben Alcazar et al. (2019) vier Richtlinien vorgeschlagen:

- Vor den Testungen sollte eine Eingewöhnungsphase stattfinden, damit die Personen mit dem Ablauf des Tests vertraut gemacht werden. Um Ungenauigkeiten zu vermeiden, sollen für die konzentrische F-V-Relation zwei und für die exzentrische vier Sitzungen abgehalten werden.
- Die Datenaufnahme soll einen möglichst großen Kraft- und Geschwindigkeitsbereich abdecken.
- Die Erfassung gelenkwinkelspezifischer Daten kann dazu führen, dass Messungen bei unterschiedlichen Muskellängen durchgeführt werden. Methoden zur Kontrolle der Muskellänge oder die Auswertung an definierten Punkten, wie zum Beispiel der Spitzenkraft, können dabei helfen, diese Einflüsse zu reduzieren. Die Erfassung der durchschnittlichen Kraft kann ebenfalls wertvolle Informationen liefern.
- Insbesondere bei exzentrischen Kontraktionen sollten die Muskeln nahezu maximal aktiviert sein, zumindest über 95 % der isometrischen Maximalkraft. Damit soll dafür gesorgt werden, dass die gemessene Kraft tatsächlich während der Muskelverlängerung gemessen wird.

2.3.4 Leistung-Geschwindigkeits-Relation

Die Leistung-Geschwindigkeits-Relation, im englischen als *power-velocity (P-V) relationship* bezeichnet, beschreibt den Zusammenhang zwischen der Bewegungsgeschwindigkeit und der dabei erzeugten Leistung. Dabei ist die optimale Geschwindigkeit V_{opt} jene Bewegungsgeschwindigkeit, bei der P_{max} erreicht wird. F_{opt} ist jene optimale Muskelkraft, bei der P_{max} erreicht wird (Jaric, 2015).

Bei einem hyperbolischen Verlauf der F-V-Relation, hat auch die Kurve der Leistung-Geschwindigkeits-Relation einen komplexeren Verlauf. Dieser führt dazu, dass die maximale Muskelleistung niedriger als 50% der Maximalkraft liegt. Sowohl die optimale Kraftentfaltung als auch die optimale Kontraktionsgeschwindigkeit liegen unter 50% im Vergleich zu deren theoretischen maximalen Werten (Jaric, 2015). Die P-V-Kurve wird in Abbildung 5 durch die gestrichelte Linie dargestellt.

Durch die Komplexität der hyperbolischen Form der F-V-Relation wird jedoch die Genauigkeit der Messungen beeinflusst. Des Weiteren werden auch die Genauigkeit der

Modellierungsverfahren und die Gestaltung des sportlichen Trainings und der Rehabilitationsmaßnahmen beeinflusst (Jaric, 2015).

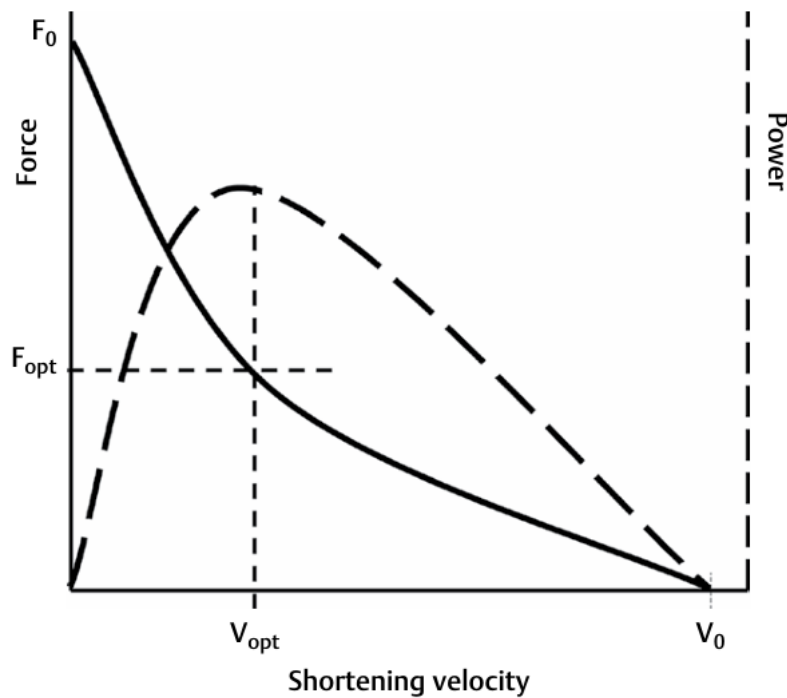


Abbildung 5: Hyperbolische F-V-Relation mit dazugehöriger P-V-Relation (Jaric, 2015, S. 700).

Bei einer linearen F-V-Relation, kommt es bei der P-V-Relation zu einer parabolischen Kurve. Diese P-V-Relation wird in Abbildung 6 anhand der gestrichelten Linie dargestellt. Durch diese Form wird die maximale Leistung, P_{max} bei ungefähr $F_0/2$ bzw. $V_0/2$ erreicht, demnach in etwa bei der Hälfte der Maximalkraft bzw. maximalen Bewegungsgeschwindigkeit (Vandewalle et al., 1987; Jaric, 2015). Der Wert von P_{max} kann mithilfe der Formel 8 berechnet werden:

$$P_{max} = (F_0 \times V_0)/4 \quad (9)$$

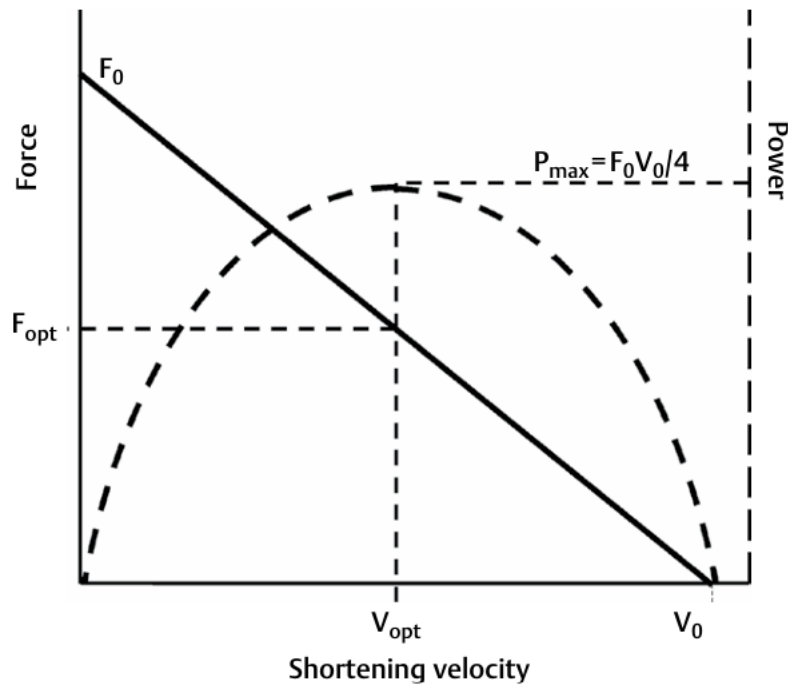


Abbildung 6: Lineare F-V-Relation mit dazugehöriger P-V-Relation (Jaric, 2015, S. 700).

2.4 Entwicklungen im Kindes- und Jugendalter

Im Laufe des Lebens eines Menschen kommt es ständig zu Veränderungen am und im Körper. So kommt es während der Kindheit und Jugend zu sichtbaren und unsichtbaren Veränderungen am Körper. Sichtbare Veränderungen sind unter anderem der Anstieg der Körpergröße oder das Wachstum der Körperbehaarung. Unsichtbare Veränderungen sind zum Beispiel hormonelle Veränderungen (Kapelari, 2019; Kumar et al., 2021). Im höheren Alter kommt es erneut zu Veränderungen, etwa zum Abbau von Muskelmasse oder Knochensubstanz, die in früheren Lebensphasen aufgebaut wurden (Aagaard et al., 2010).

2.4.1 Hormonelle Veränderungen

Hormone sind körpereigene Informationsträger, sogenannte biochemische Botenstoffe. Sie werden in endokrinen Drüsen gebildet und von dort in die Blutbahn abgegeben. Die bekanntesten Bildungsorte für Hormone sind unter anderem der Hypothalamus, die Hypophyse und die Schilddrüse. Hormone werden aber ebenfalls in zahlreichen anderen Organen gebildet. Über den Blutkreislauf werden sie dann in die Zielzellen transportiert und dort an deren Rezeptoren gebunden. Hormone haben sehr vielseitige Aufgaben. Sie regulieren unter anderem den Stoffwechsel, sind für das Wachstum zuständig oder können Reaktionen auf Gefahrensituationen bestimmen (Paulsen, 1969; Vaupel et al., 2015).

Während der Pubertät finden umfassende hormonelle Veränderungen statt, die zahlreiche körperliche und psychische Prozesse beeinflussen. Die Veränderungen in der Hypothalamus-Hypophysen-Gonaden-Achse (HPG-Achse) sind der Hauptgrund für die körperlichen Veränderungen in dieser Phase. Veränderungen der Körpergröße und der Körperzusammensetzung stehen in engem Zusammenhang mit der hormonellen Aktivität der HPG-Achse. Die Korrelation ist deutlich höher als jene mit dem kalendarischen Alter (Rogol, 2002). Aus diesem Grund sind Veränderungen der Sexualhormone von großer Wichtigkeit. Bevor die Veränderungen aufgezeigt werden, wird die Funktionsweise der HPG-Achse beschrieben.

Die HPG-Achse steuert die Funktionsweise der Gonaden. Diese sind jene Drüsen, in denen die Sexualhormone gebildet werden. Bei Männern sind diese Drüsen die Hoden, in denen das Sexualhormon Testosteron gebildet wird, und bei Frauen die Eierstöcke, in welchen Östrogene und Gestagene gebildet werden. Wie bereits der Name der Achse beschreibt, wird diese Achse über das Zusammenwirken des Hypothalamus, der Hypophyse (welche sich beide im Gehirn befinden) und der Gonaden gesteuert. In einem ersten Schritt wird im Hypothalamus das Gonadotropin-releasing-Hormon (GnRH) freigesetzt. Die Freisetzung erfolgt pulsierend. Durch die Sekretion von GnRH wird die Hypophyse angeregt, die wiederum zwei weitere Hormone freisetzt: das follikelstimulierende Hormon (FSH) und das luteinisierende Hormon (LH). LH sorgt dafür, dass bei Männern in den Leydig-Zwischenzellen in den Hoden Testosteron gebildet wird. Bei Frauen bewirken FSH und LH die Produktion von Östrogen in den Ovarien. Um den Regelkreislauf im Gleichgewicht zu halten, gibt es in der HPG-Achse Rückkopplungseffekte. So sorgt eine zu hohe Produktion an Testosteron bzw. Östrogen dafür, dass die Sekretion von GnRH gehemmt wird. Darüber hinaus sorgt ein zu hoher Spiegel des in den Gonaden produzierte Hormons Inhibin dafür, dass die FSH-Sekretion gehemmt wird (Acevedo-Rodriguez et al., 2018; Gründker & Emons, 2020; Vaupel et al., 2015). Der Regelkreislauf der HPG-Achse wird schematisch in Abbildung 7 dargestellt.

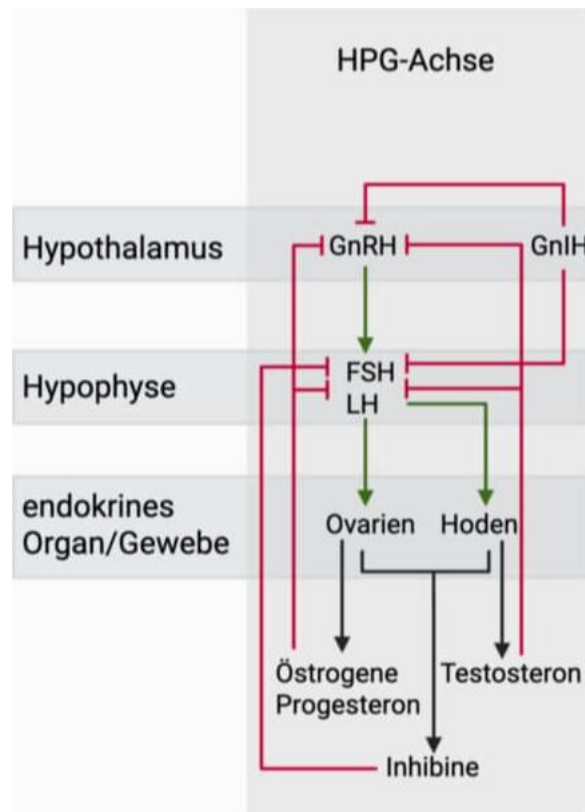


Abbildung 7: Regelkreislauf der HPG-Achse (Reh et al., 2025).

Nach der Geburt ist die HPG-Achse aktiv, das Testosteron-Level ist jedoch niedriger als bei Erwachsenen. Danach kommt es während der Kindheit zu einer Phase geringerer Aktivität. Zu Beginn der Pubertät kommt es zu einer Reaktivierung der HPG-Achse. Die LH-Sekretion findet nun nicht mehr ausschließlich nachts statt, sondern setzt sich auch über den Tag hinaus fort. Dadurch kommt es zu einem Anstieg des Testosteron Levels. Anfangs reguliert das Testosteron noch die GnRH-Ausschüttung, der Körper verliert jedoch in weiterer Folge die Sensitivität auf Testosteron, sodass die LH-Ausschüttung nicht mehr ausreichend gehemmt werden kann und der LH-Spiegel erhöht bleibt. Dies führt zu einem weiteren Anstieg des Testosteronspiegels (Rogol, 2002). Die Pubertät ist somit geprägt von einem Anstieg der Sexualhormone. Wie eben beschrieben steigt bei Jungen vor allem der Testosteronspiegel, während bei Mädchen analog dazu der Östrogenspiegel steigt (Kattan, 2020).

Sexualhormone, insbesondere Testosteron, spielen eine entscheidende Rolle bei der Zunahme der Muskelmasse und -kraft in der Pubertät. Testosteron wirkt anabol, es fördert somit den Aufbau von Muskelgewebe. Stammzellen werden dabei zu Muskelzellen umgewandelt. Außerdem stimuliert Testosteron die Proteinbiosynthese. Es werden dadurch mehr Proteine, die Bausteine der Muskeln, hergestellt (Xu et al., 2021). Die Hypertrophie der Muskelfasern, die hauptsächlich für das testosteroninduzierte Muskelwachstum verantwortlich

ist, betrifft sowohl die Typ I als auch die Typ II Fasern. Testosteron bewirkt jedoch keine Umwandlung der Muskelfasertypen (Sinha-Hikim et al., 2002; Horwath et al., 2020). Östrogen fördert ebenfalls die Zunahme der Muskelmasse und -kraft. Jedoch hat Östrogen nicht dieselbe androgene Wirkung wie Testosteron (Wild et al., 2012).

Im Zuge der Pubertät steigt das Testosteron Level bei Jungen deutlich höher an als jenes bei Mädchen. Bei Jungen steigt es um bis zu das Zwanzigfache an. Dies führt dazu, dass das Testosteron Level um bis zu 15-mal höher ist als bei Mädchen. Männer haben dadurch eine höhere Muskelmasse und -kraft als Frauen (Handelsman et al., 2018).

2.4.2 Körperliche Veränderungen

Im Zuge der Pubertät kommt es zu zahlreichen körperlichen Veränderungen. Der Körper befindet sich hier im Übergang von der Kindheit zum Erwachsenenalter. Diese Veränderungen sind eine Folge der zuvor beschriebenen hormonellen Veränderungen (Flaake, 2012). Die wohl deutlich sichtbarste Veränderung ist die Zunahme der Körpergröße. In der Kindheit wachsen Kinder kontinuierlich, in der Pubertät kommt es jedoch nochmals zu einer überproportionalen Steigerung des Körperwachstums (Mirwald et al., 2002). Auf diesen Zeitpunkt des maximalen Wachstumsspurts wird im folgenden Unterkapitel genauer eingegangen. Des Weiteren kommt es zu Veränderungen der Körperkompositionen. Die Muskelmasse nimmt aufgrund des Anstiegs an Testosteron deutlich zu. Bei Jungen nimmt die Muskelmasse signifikant stärker zu, da bei ihnen der Testosteronanstieg deutlich höher ist als bei Mädchen. Außerdem wird knapp die Hälfte der Knochenmasse in der Pubertät gebildet (Hoyer-Kuhn & Semler, 2023). Vor allem durch den Anstieg an Muskulatur kommt es bei Jungen zu einer Zunahme der fettfreien Masse. Daher kommt es zu einer Reduktion des prozentuellen Anteils an Körperfett (Rogol, 2002).

Weitere sichtbare Veränderungen in der Pubertät sind die Entwicklung der primären und sekundären Geschlechtsmerkmale. Bei beiden Geschlechtern kommt es zu einer Ausbildung der Behaarung unter den Achseln und im Schambereich. Bei Jungen setzt zusätzlich der Bartwuchs ein und die Behaarung im Brustbereich beginnt sich zu entwickeln. Außerdem kommt es durch den Stimmbruch zu einer Vertiefung der Stimme. Bei Mädchen setzt das Brustwachstum ein und es kommt zum Beginn des Menstruationszyklus (Koopman-Verhoeff et al., 2020).

Während der Pubertät kommt es zu einer Verbesserung der sportlichen Leistungsfähigkeit. Die höhere Muskelmasse führt zu einem Kraftanstieg bei Jugendlichen (Lloyd et al., 2011). Ebenso kommt es zu einer Verbesserung der Sprint- und der Sprungleistungsfähigkeit. Für die gesteigerte Kraftentwicklung ist neben der höheren Muskelmasse auch insbesondere eine höhere Muskelaktivierung verantwortlich. Im Kindesalter können noch nicht alle motorische Einheiten rekrutiert werden, es kommt zu einem sogenannten Aktivierungsdefizit.

Reifungsprozesse im zentralen Nervensystem führen dazu, dass dieses Aktivierungsdefizit im Laufe der Pubertät abnimmt. Die verbesserte Muskelaktivierung führt neben einem Anstieg der Maximalkraft auch zu einer Verbesserung der Fähigkeit, die Kraft schnell entwickeln zu können (Kumar et al., 2021).

Neben der verbesserten Muskelmasse und -kraft können auch veränderte Körperproportionen Einfluss auf den verbesserten Kraftanstieg nehmen. Mit der zunehmenden Körpergröße verändern sich die Hebelwirkungen der Extremitäten. So kann zum Beispiel bei der Beinstreckkraft aufgrund der längeren Beine bei gleicher Muskelkraft ein größeres Drehmoment im Kniegelenk erzeugt werden (De Ste Croix, 2007). Ebenso kommt es zu einer Veränderung des optimalen Winkels im Kniegelenk für eine maximal mögliche Kraftübertragung. Das Längenwachstum des Femurs erreicht seinen Höhepunkt etwas mehr als ein Jahr vor dem maximalen Wachstumsspurts. Dies führt dazu, dass der Kniewinkel für die maximale Kraftentfaltung bei der Beinstreckkraft in diesem Zeitraum etwas geringer ist. Etwas mehr als zwei Jahre nach dem maximalen Wachstumsspurts erhöht sich der optimale Winkel wieder. Er erreicht dann wieder den Bereich, den er ursprünglich hatte (Saeki et al., 2021).

2.4.3 Peak Height Velocity

Von der Geburt an wachsen Kinder und Jugendlichen kontinuierlich, bis sie im Erwachsenenalter, mit ca. 18 Jahren, ihre maximale Körpergröße erreicht haben. Das größte Wachstum haben Kinder gleich im ersten Lebensjahr, in dem ihre Körpergröße um ca. 25 cm zunimmt. Danach wachsen sie stetig weiter, jedoch deutlich weniger schnell als direkt im Anschluss an die Geburt. Zu Beginn der Jugendphase kommt es zu einem deutlichen Anstieg des Wachstums. Dieser Zeitpunkt wird als maximaler Wachstumsspurts bezeichnet, im englischen *peak height velocity* (PHV). Abgesehen vom ersten Lebensjahr, findet hier das schnellste Wachstum statt. Der Zeitpunkt der PHV ist bei Mädchen im Durchschnitt im Alter von 11-12 Jahren und bei Jungen im Alter von 13-14 Jahren. Die PHV findet bei Jungen in etwa zwei Jahre später statt als bei Mädchen, jedoch ist die Ausprägung des Wachstumsschubs bei Jungen etwas höher. Nach dem PHV wachsen Jugendliche immer langsamer, bis sie am Ende der Jugend ausgewachsen sind (Mirwald et al., 2002). Der Verlauf des Wachstums der Körpergröße wird in Abbildung 8 dargestellt. Die rote Kurve stellt den Verlauf des Wachstums der Mädchen dar, die blaue Linie das Wachstum der Jungen.

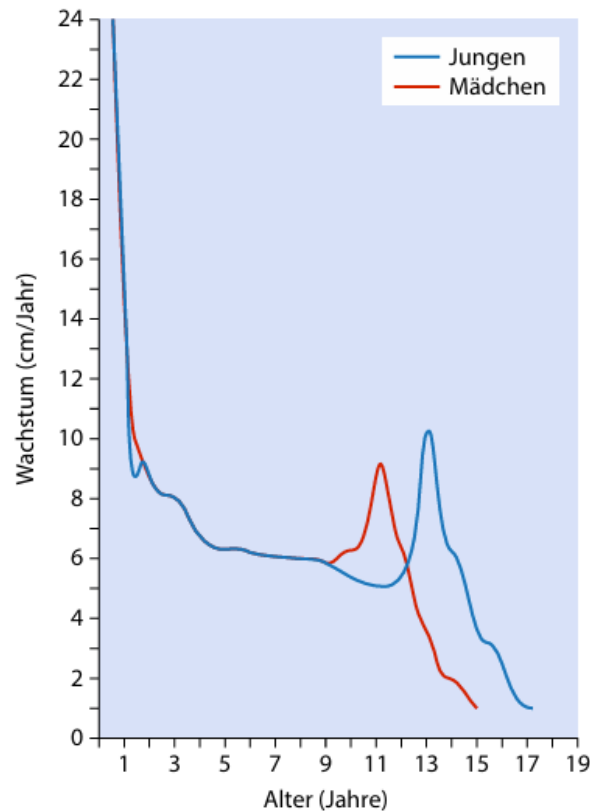


Abbildung 8: Verlauf des Wachstums der Körpergröße (Ferrauti et al., 2025, S. 595).

Der Zeitpunkt der PHV ist mit dem Zeitpunkt des Anstiegs an Testosteron verbunden. Sobald bei Kindern bzw. Jugendlichen die Testosteronkonzentration anzusteigen beginnt, beginnt auch die Wachstumsgeschwindigkeit anzusteigen. Diese steigt dann kontinuierlich an, bis die PHV erreicht ist. Der Anstieg des Testosteronlevels, und somit der Beginn des beschleunigten Wachstums, findet in etwa eineinhalb Jahre vor PHV statt (Albin & Norjavaara, 2013).

Wie bereits beschrieben, liegt das Alter der PHV bei Mädchen bei 11-12 Jahren und bei Jungen bei 13-14 Jahren. Jedoch kann es dabei zu Abweichungen von bis zu drei Jahren kommen. Aufgrund dieser Abweichungen ist es wichtig, zwischen dem kalendarischen und dem biologischen Alter zu unterscheiden. Das kalendarische Alter ist das tatsächliche Alter einer Person, gemessen am Geburtsdatum. Es berücksichtigt nicht den Entwicklungsstand. Das biologische Alter hingegen berücksichtigt den Entwicklungsstand einer Person und gibt den Reifegrad eines Kindes bzw. Jugendlichen im Vergleich zu seinem tatsächlichen Alter an. Zwei Personen, die am selben Tag geboren sind und somit das selbe kalendarische Alter haben, können ein unterschiedliches biologisches Alter haben. Dies bedeutet, dass sie sich biologisch gesehen zu unterschiedlichen Zeitpunkten entwickeln (Mirwald et al., 2002; Philippaerts et al., 2006).

Im Nachwuchssport, vor allem bei Wettbewerben, wird immer das kalendarische Alter herangezogen. Kinder und Jugendliche werden in ihren Mannschaften, wie auch bei Bewerben

in Einzelsportarten, in Altersklassen eingeteilt. Diese stufen die Personen abhängig ihres Geburtsjahres ein. Dieser relative Alterseffekt, im englischen als *relative age effect* (RAE) bezeichnet, führt dazu, dass Kinder und Jugendliche, die knapp nach dem Stichtag geboren wurden, kalendarisch älter und somit durchschnittlich reifer sind als jene, die später im Jahr geboren wurden. Obwohl sie im selben Kalenderjahr geboren wurden, sind Jugendliche, die im Jänner zur Welt kamen, jenen, die im Dezember geboren wurden, in ihrer Entwicklung oft um ein ganzes Jahr voraus. So sind zum Beispiel Jugendliche in Teamsportarten, die Anfang eines Jahres geboren sind, überrepräsentiert im Vergleich zu Jugendlichen, die gegen Ende des Jahres geboren sind (Musch & Hay, 1999).

Zusätzlich zum RAE entwickeln sich Kinder und Jugendliche unterschiedlich schnell. Aufgrund der unterschiedlichen Entwicklungsgeschwindigkeiten sind Kinder, die sich früher entwickeln, im Vorteil gegenüber Späentwicklern. Sie sind größer, haben ein höheres Körpergewicht und sind dementsprechend kräftiger, schneller und ausdauernder. Das führt dazu, dass Frühentwickler in Auswahlverfahren im Nachwuchssport deutlich mehr berücksichtigt werden. Die unterschiedliche Entwicklungsstände gleichen sich aber im Laufe der Zeit aus. Frühentwickelnde Jugendliche sind im Erwachsenenalter nicht zwangsmäßig leistungsfähiger als spätentwickelnde (Lefevre et al., 1990). Da im Jugendalter die Leistung stark vom biologischen Alter abhängig ist, ist es also von großer Bedeutung den Entwicklungsstand zu berücksichtigen. Das am weitesten verbreitete Verfahren dafür ist die PHV-Methode (Mirwald et al., 2002; Philippaerts et al., 2006). Der Goldstandard für die Bestimmung des biologischen Reifegrades ist jedoch die Erfassung des Skelettalters. Hierbei wird ein Röntgenbild aufgenommen und das biologische Alter kann so präzise und direkt ermittelt werden. Der gesamte Wachstumszeitraum kann hier abgebildet werden. Diese ist jedoch in der Praxis schwierig durchzuführen, da sie spezielle Ausrüstung und fachkundige Interpretation benötigt und des Weiteren kostspielig ist. Außerdem geht diese Methode mit strahlenschutzrelevanten Risiken einher. Im Vergleich dazu, ist die PHV-Methode billiger und schneller durchzuführen und ist ethisch unbedenklich (Mirwald et al., 2002). Aus diesen Gründen wird sie meist in der Wissenschaft den anderen Methoden vorgezogen. Jedoch weist die Berechnung der PHV Schwachstellen auf. Die größte Limitation ist, dass es bei der berechneten PHV zu großen Abweichungen zu der tatsächlichen PHV kommen kann. So sind laut Malina et al. (2021) weniger als die Hälfte der vorhergesagten PHV-Werte innerhalb einer Zeitspanne von $\pm 0,5$ Jahren zur tatsächlichen beobachteten PHV. Vor allem bei den Extremfällen, bei Früh- bzw. Spätreifenden, kommt es zu deutlichen Abweichungen. Bei Frühreifenden wird die PHV deutlich zu spät vorhergesagt, während sie bei Spätreifenden deutlich zu früh vorhergesagt wird. Am genauesten wird die PHV bei durchschnittlich reifenden Jugendlichen vorhergesagt, wobei es hier auch zu Abweichungen kommen kann. Innerhalb derselben Person kann es auch zu Schwankungen kommen. So kann sich das Alter der berechneten PHV bei zeitlich

aufeinanderfolgenden Messungen deutlich verändern. Die Berechnung der PHV anhand der Methode von Mirwald et al. (2002) ist aufgrund der einfachen und nicht-invasiven Durchführung weit verbreitet. Sie bietet eine grobe Orientierung der PHV. Jedoch ist sie aufgrund der häufig mangelnden Validität nicht geeignet, um präzise Daten zu liefern (Koziet & Malina, 2017; Malina et al., 2021).

2.4.4 Berechnung der PHV

Das Alter bei der PHV ist einer der meistgenutzten Indikatoren um den Reifegrad eines Jugendlichen zu ermitteln. Wie zuvor beschrieben, ist die gängigste Methode um die PHV zu messen, diese anhand der Formel von Mirwald et al. (2002) zu berechnen. Dafür müssen lediglich anthropometrische Daten gemessen und in die Formel eingesetzt werden.

Um die PHV zu berechnen, müssen folgende Daten erfragt bzw. gemessen werden:

- Kalendarisches Alter (in Jahren)
- Körpergröße (in cm)
- Körpergröße sitzend (in cm)
- Höhe des Sessels (auf dem die sitzende Körpergröße gemessen wird; in cm)
- Gewicht (in kg)

Folgende Größen werden ebenfalls berechnet, dazu werden jeweils zwei bereits gemessene Größen verwendet:

- Sitzhöhe (= Körpergröße sitzend – Höhe des Sessels; in cm)
- Beinlänge (= Körpergröße – Sitzhöhe; in cm)

Das Verhältnis von Beinlänge und Sitzhöhe ist eine mögliche Methode, um den Reifegrad eines Jugendlichen zu bestimmen. Da die Zunahme der Beinlänge bereits vor dem Erreichen der PHV einsetzt, nimmt das Verhältnis stetig zu. Nach dem Erreichen der PHV nimmt das Verhältnis wieder ab (Mirwald et al., 2002). Der Verlauf der Zunahme der Körpergröße, mit dem Zeitpunkt des Erreichens der PHV, der Beinlänge und der Sitzhöhe wird in Abbildung 9 dargestellt. In der linken Grafik wird der Verlauf bei Jungen und in der rechten Grafik jener der Mädchen dargestellt. Die dicke durchgezogene Linie stellt die Zunahme der Körpergröße dar, die dünne durchgezogene Linie die der Sitzhöhe und die gestrichelte Linie die der Beinlänge.

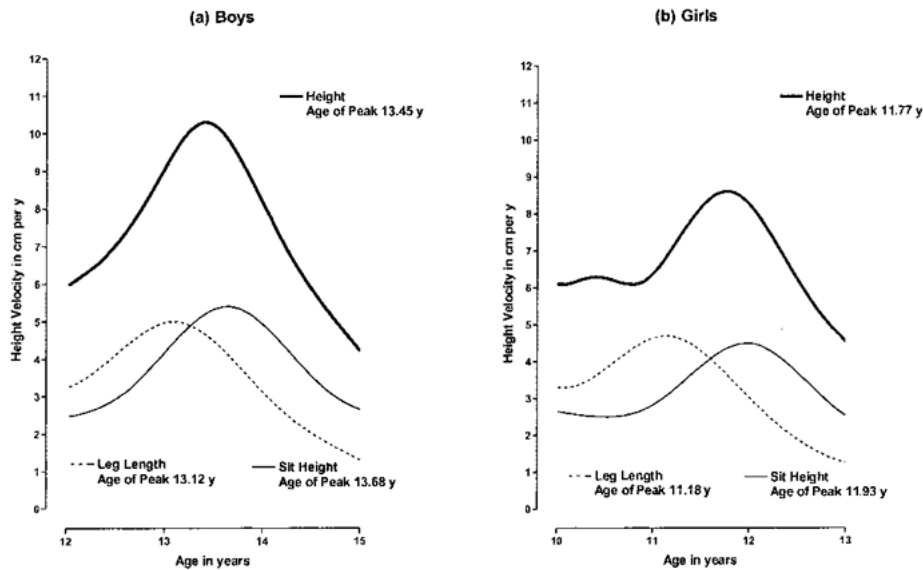


Abbildung 9: Verlauf der Zunahme der Körpergröße, Beinlängen und Sitzhöhe bei Jungen (a) und Mädchen (b) (Mirwald et al., 2002, S. 690).

Die Formel von Mirwald et al. (2002) bestimmt den Maturity Offset (MO) eines Jugendlichen. Der MO ist der zeitliche Abstand einer Person zur PHV. So bedeutet ein MO von -1, dass sich eine Person genau ein Jahr vor PHV befindet. Ein MO von +1 bedeutet, dass sie sich ein Jahr nach PHV befindet. Bei einem MO von 0, befindet sich eine Person genau am Zeitpunkt der PHV. Um die PHV darauffolgend zu bestimmen, muss man den MO vom aktuellen kalendarischen Alter abziehen bzw. dazurechnen.

Formel 9 zeigt wie man den MO, und darauffolgend die PHV bei Jungen berechnen kann:

$$\begin{aligned}
 MO = & -9,236 + 0,0002708 \times \text{Beinlänge} \times \text{Sitzhöhe} \\
 & - 0,001663 \times \text{Alter} \times \text{Beinlänge} + 0,007216 \times \text{Alter} \times \text{Sitzhöhe} \\
 & + 0,02292 \times \frac{\text{Gewicht}}{\text{Körpergröße}}
 \end{aligned} \quad (10)$$

Die Formel um den MO bei Mädchen zu berechnen, wird anhand der Formel 10 beschrieben:

$$\begin{aligned}
 MO = & -9,376 + 0,0001882 \times \text{Beinlänge} \times \text{Sitzhöhe} \\
 & + 0,0022 \times \text{Alter} \times \text{Beinlänge} + 0,005841 \times \text{Alter} \times \text{Sitzhöhe} \\
 & - 0,002658 \times \text{Alter} \times \text{Gewicht} + 0,07693 \times \frac{\text{Gewicht}}{\text{Körpergröße}}
 \end{aligned} \quad (11)$$

3 Aktueller Forschungsstand

Die Fähigkeit explosive und kraftvolle Bewegungen mit hoher Geschwindigkeit durchzuführen, ist in den meisten Sportarten von großer Bedeutung. Das optimale Verhältnis zwischen Kraft und Geschwindigkeit herauszufinden, um eine maximale Leistung erbringen zu können, hat in der Sportwissenschaft somit an Bedeutung gewonnen (Samozino et al., 2011). Während dieser Ansatz im erwachsenen Leistungssport primär dazu dient, individuelle Trainingsinterventionen zu steuern (Jiménez-Reyes et al., 2017; Morin & Samozino, 2015), verschiebt sich der Fokus im Kindes- und Jugendalter. In der sportlichen Praxis ist bei Kindern eine individuelle Lastanpassung der persönlichen $P_{\max}$ oft kaum realisierbar, da vorgegebene Bedingungen für alle identisch bleiben. So wird zum Beispiel die Größe eines Fußballs nach Altersklassen, und somit nach dem kalendarischen Alter, normiert, und nicht nach dem biologischen Entwicklungsstand. Im Kindes- und Jugendalter ist die Untersuchung der F-V-Relation daher weniger für die individuelle Trainingssteuerung relevant, sondern in erster Linie von hohem akademischen Interesse. Es gilt zu klären, inwiefern sich die Kraft und Bewegungsgeschwindigkeit entwickeln: ob Kinder und Jugendliche zuerst stärker oder schneller werden oder ob diese Entwicklung symmetrisch verläuft. Abgesehen vom sportlichen Kontext, wurde die F-V-Relation auch bei älteren Personen bei Aktivitäten des täglichen Lebens untersucht, um mögliche Defizite erkennen zu können (Alcazar et al., 2018). Die Bestimmung der F-V-Relation hat somit immer mehr an Relevanz gewonnen, da jede Person ihr eigenes optimales F-V-Profil besitzt (Jiménez-Reyes et al., 2017).

Obwohl die F-V-Relation von großer Bedeutung ist, ist diese im Kindes- und Jugendalter noch wenig erforscht. Es ist bereits bekannt, dass es im Zuge der Pubertät zu einer Steigerung der Kraft und der Sprintleistungsfähigkeit kommt (Kumar et al., 2021). Dass die Muskelleistung im Laufe der Pubertät zunimmt, ist ebenso bekannt. Es ist jedoch noch nicht genau untersucht, ob sich die Zunahme der Leistung zunächst durch eine Zunahme der Muskelkraft oder eine Steigerung der Bewegungsgeschwindigkeit erklären lässt. Fernández-Galván et al. (2022) untersuchten in ihrer Studie anhand der Sprintleistung, wie sich der Entwicklungsstand auf die F-V-Relation auswirkt. Sie kamen zum Ergebnis, dass sich zuerst die Maximalkraft steigert, wohingegen die Maximalgeschwindigkeit sich erst nach Erreichen der PHV erhöht. Die Testungen wurden nur mit semi-professionellen Fußballspielern durchgeführt. Da die Sprintleistungsfähigkeit eine wichtige Voraussetzung im Fußball ist und diese somit Bestandteil des Trainings ist, waren diese Testungen sportartspezifisch. Außerdem sind Sprints schwer standardisiert durchzuführen.

Die Untersuchungen von Alcazar et al. (2025) an vorpubertären Jungen zeigten, dass absolute Parameter der Drehmoment-Geschwindigkeits-Relation, wie das maximale Drehmoment und die maximale Muskelleistung, eine starke positive Korrelation zum chronologischen Alter, und

noch deutlicher zum biologischen Reifestand, aufweisen. Diese Zunahmen scheinen primär eine Folge der generellen körperlichen Entwicklung zu sein. Sobald die Kraft- und Leistungswerte auf das Körpergewicht normiert werden, verschwindet dieser signifikante Zusammenhang. Dies legt nahe, dass die Leistungssteigerungen in dieser Altersphase vor allem durch die Zunahme an Körper- und Muskelmasse bedingt sind und weniger durch qualitative Veränderungen des neuromuskulären Systems. Die Studie hat jedoch nur Kinder vor Erreichen des PHV, sowie ausschließlich Jungen, untersucht. Weitere Forschungen zur F-V-Relation sind somit notwendig.

4 Forschungsfrage

Die F-V-Relation im Kindes- und Jugendalter ist, wie bereits beschrieben, noch wenig erforscht, jedoch auch in dem Alter von großer Bedeutung. Ziel der Studie ist es, zu untersuchen, welchen Einfluss der biologische Entwicklungsstand bei Kindern und Jugendlichen auf die F-V-Relation hat.

Auf Grundlage der Ergebnisse von Fernández-Galván et al. (2022) wird vermutet, dass sich die älteren Gruppen sich von den jüngeren Gruppen dahingehend unterscheiden, dass sie eine höhere Maximalkraft erzielen. Außerdem wird vermutet, dass die maximale Bewegungsgeschwindigkeit der Post-PHV Gruppe höher ist als die der Mid-PHV Gruppe, jedoch kein Unterschied zwischen den Gruppen Pre-PHV und Mid-PHV besteht.

5 Methodik

5.1 Studienteilnehmer

Für diese Studie konnten insgesamt 30 Kinder und Jugendliche untersucht werden. Es wurden Kinder und Jugendliche beider Geschlechter im Alter zwischen 10 und 17 Jahren eingeschlossen. Rekrutiert wurden die Probandinnen und Probanden über Vereine, Jugendorganisationen und im Bekanntenkreis der Studienleitung. Zur Rekrutierung wurden sowohl die Kinder selbst als auch ihre Obsorgeberechtigten kontaktiert.

Die Untersuchungen fanden im Zeitraum zwischen April und Dezember 2024 statt (Votum 00824).

5.2 Studienablauf

Bei dieser Studie handelt es sich um eine Querschnittsstudie. Für die Probandinnen und Probanden gab es einen Testtag, an dem alle Untersuchungen stattfanden. Die Untersuchungen dauerten in etwa eine Stunde.

Wenn sich ein Kind und dessen obsorgeberechtigte Person bereiterklärten, an der Studie teilzunehmen, wurde mit ihm ein Termin für die Untersuchung vereinbart. Außerdem wurden ihnen die Einverständniserklärung und zwei Fragebögen übermittelt. Die beiden Fragebögen wurden von jedem Kind gemeinsam mit einer obsorgeberechtigten Person in einer privaten Umgebung ausgefüllt. Der erste Fragebogen ermittelt das Aktivitätsniveau der Person. Hierfür wurde der Aktivitätsfragebogen des Motorikmoduls (MoMo-AFB; Jekauc et al., 2013) verwendet. Erhoben wurde das Aktivitätslevel der Proband*innen im Alltag, in der Schule und in Sportvereinen. Der zweite Fragebogen ermittelt den Pubertätsstatus der getesteten Person. Die körperliche Reife wurde im Fragebogen insofern erhoben, dass bei Mädchen das Haarwachstum unter den Achseln und im Schambereich, das Brustwachstum und der Beginn des Menstruationszyklus erfragt wurden. Bei Jungen wurde nach dem Haarwachstum unter den Achseln und im Schambereich, dem Bartwachstum und Beginn des Stimmbruchs gefragt (Koopman-Verhoeff et al., 2020). Die unterschriebene Einverständniserklärung und die ausgefüllten Fragebögen wurden zum Termin der Testung mitgebracht.

Im Rahmen der Testung selbst, wurden dann zunächst der biologische Entwicklungsstand anhand der PHV und danach das F-V-Profil gemessen.

5.2.1 Messung des biologischen Entwicklungsstands

Vor den Testungen wurden anthropometrische Daten der getesteten Person aufgenommen, um dadurch das Alter der PHV berechnen zu können. Die Person wurde gebeten die Schuhe auszuziehen und sich auf eine Körperwaage zu stellen. Das Körpergewicht wurde auf 0,1 kg genau gemessen. Die Körpergröße wurde zuerst im Stehen und danach im Sitzen auf 0,1 cm

genau gemessen. Anhand dieser Daten wurde das Alter der PHV anhand der Formeln von Mirwald et al. (2002) berechnet.

5.2.2 Messung des F-V-Profiles

Vor dem Beginn der eigentlichen Datenaufnahme des F-V-Profiles führte die getestete Person ein Aufwärmprogramm durch. Gestartet wurde mit einem allgemeinen Aufwärmen. Die Person fuhr dabei 5 Minuten auf einem Fahrradergometer bei etwa 1 Watt pro Kilogramm Körpergewicht. Da die Watteinstellungen auf dem Fahrradergometer in Schritten von 5 W geregelt wird, wurde das Körpergewicht auf die nächst mögliche Einstellung auf- bzw. abgerundet.

Als erster Test wurde ein Counter Movement Jump (CMJ) durchgeführt. Der Person wurde zunächst erklärt, wie dieser durchzuführen ist: die Hände sollen während des Sprungs in die Hüften gestützt werden. Nach zwei Aufwärmprüngen, im Rahmen derer auch die korrekte Form kontrolliert wurde, wurde die getestete Person aufgefordert, auf der Kraftmessplatte (Kistler 9286BA, Kistler Instrumente AG, Swiss) so hoch wie möglich zu springen und auch wieder zentral auf dieser zu landen. Insgesamt wurden drei CMJ durchgeführt, mit jeweils zehn Sekunden Pause zwischen den Sprüngen. Die maximale Anhebung des Körperschwerpunktes wurde mit der Software Myoresearch (Noraxon, USA) anhand des Gesamtimpulses errechnet.

Das F-V-Profil wurde anhand Messungen der Kniestreckkraft ermittelt. Verwendet wurde dafür ein isokinetisches Dynamometer (Isomed 2000, D. & R. Ferstl GmbH, Hemau, Deutschland). Die Messung wurde mit dem dominanten Bein durchgeführt. Die Kinder und Jugendlichen wurden auf das Gerät gesetzt und das Drehzentrum des Kniegelenks und des Geräts wurden übereingestimmt. Das Drehzentrum des Kniegelenks wurde visuell, sowie, nach Einverständnis der Probandin oder des Probanden, durch Palpation bestimmt. Auf dem Drehzentrum des Geräts wurde ein Laser fixiert, sodass dieses mit dem Drehzentrums des Kniegelenks abgeglichen werden konnte. Die Person wurde danach am Gerät fixiert. Vor der Datenaufnahme wurden zwei Probeübungen absolviert. Die erste Probeübung erfolgte dynamisch. Hier absolvierte jede Person zwei Durchgänge mit je acht Wiederholungen. Der erste Durchgang diente dazu, den Bewegungsablauf des Geräts und der Testungen kennenzulernen. Es gab keine Intensitätsvorgaben. Das Knie sollte nur im vollen, am Gerät limitierten Bewegungsumfang bewegt werden. Beim zweiten Durchgang wurde die Intensität kontinuierlich gesteigert und somit an die maximale Intensität, die in den gewerteten Durchgängen erfasst werden sollte, herangeführt. Für die Intensitätsangaben wurde die 10-stufige Likert-Skala (0 = „keine Anstrengung“ bis 10 = „maximale Anstrengung“) zu Hilfe genommen. Die ersten zwei Versuche erfolgten mit einer Intensität von 3 („mäßig“), die folgenden zwei Versuche mit einer Intensität von 4-6 („etwas anstrengend“ bis „anstrengend“), die nächsten drei Versuche mit einer Intensität von 7-9 („sehr anstrengend“ bis „sehr sehr

anstrengend“) und der letzte Versuch erfolgte mit 10 bei maximaler Intensität. Die zweite Probeübung erfolgte statisch. Die Person führte einen Durchgang mit sechs Wiederholungen durch. Auch hier wurde die Intensität schrittweise von 3 („mäßig“), bis 10 („maximal“) gesteigert.

Um die F-V-Relation zu ermitteln, wurden vier Durchgänge in randomisierter Reihenfolge durchgeführt. Drei Durchgänge erfolgten bei Bewegungsgeschwindigkeiten von 60°, 120° und 180° pro Sekunde. Bei jeder Geschwindigkeit wurden 2 Versuche gestattet. Ein Durchgang erfolgte isometrisch bei 70° Knieflexion mit 3 Wiederholungen. Zwischen den Versuchen gab es jeweils 30 Sekunden Pause und zwischen den Durchgängen wurde eine Pause von 2 Minuten eingehalten. Die Person sollte bei jedem Versuch das Knie so schnell und so stark wie möglich strecken.

5.3 Statistische Analyse

Anfangs wurden alle Daten in das Programm Excel eingetragen. Die Kinder und Jugendlichen wurden entsprechend des biologischen Entwicklungsstandes in drei Gruppen geteilt: Pre-PHV, Mid-PHV und Post-PHV. In die Gruppe Mid-PHV fallen jene Kinder und Jugendlichen, die sich innerhalb eines Jahres vom errechneten PHV befinden. Jene die sich über ein Jahr vor PHV befinden, fallen in die Gruppe Pre-PHV und jene die sich über ein Jahr danach befinden, fallen in die Gruppe Post-PHV. Errechnet wurden T_0 , V_0 und $P_{\max}$ anhand des Excel-Tools von Alcazar (Version 3.0, 2022). Die erzielten Drehmomentwerte bei den drei Bewegungsgeschwindigkeiten V_{60} , V_{120} und V_{180} wurden in das Excel-Tool eingetragen. Mittels der Daten wurde eine Regressionsgerade berechnet. Diese Gerade ermittelte daraufhin die Maximalwerte T_0 und V_0 . Sollte ein Drehmomentwert bei einer gewissen Bewegungsgeschwindigkeit niedriger sein als der Wert bei einer höheren Bewegungsgeschwindigkeit, wurde dieser Wert ausgeschlossen und die Regressionsgerade anhand der übrig gebliebenen beiden Punkte ermittelt. Die Regressionsgerade sollte einen r-Wert von 0,95 haben um als valide zu gelten. Die weitere Analyse wurde mit SPSS Statistics 19 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) durchgeführt. Alle gemessenen bzw. berechneten Daten wurden somit in SPSS übertragen. Die statische Analyse wurde zuerst über das Studienkollektiv durchgeführt, um zu überprüfen, ob es Unterschiede zwischen den Gruppen gibt. In weiterer Folge wurde untersucht, ob es Unterschiede hinsichtlich des F-V-Profiles zwischen den Gruppen gibt. Es wurde auf Unterschiede bei den Parameter T_0 , V_0 und $P_{\max}$ untersucht. Das maximale Drehmoment und die maximale Muskelleistung wurden sowohl als Absolutwert T_0 und $P_{\max}$ zwischen den Gruppen verglichen, als auch nach Normalisierung über das Körpergewicht, T_0/kg und $P_{\max}/\text{kg}$. Alle Daten werden in der Form Mittelwert $\pm$ Standardabweichung dargestellt. Als statistische Analyse wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt. Dabei gelten die Altersgruppen als unabhängige Variablen. Die Parameter T_0 ,

V_0 , T_0/kg , $P_{\max}$ und $P_{\max}/\text{kg}$ gelten als abhängige Variablen. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ gelegt. Bei Tests, bei denen die Hypothese auf eine Seite gerichtet war, wurde der p-Wert halbiert. Bei der Analyse des Studienkollektivs wurden die Parameter Alter, Größe und Gewicht einseitig getestet, sowie die Parameter T_0 , V_0 und $P_{\max}$ bei der Auswertung der Ergebnisse. Im Falle eines signifikanten Unterschiedes beim Kruskal-Wallis-Test, folgte ein paarweiser Vergleich zwischen den Gruppen. Hierfür wurde als Post-Hoc-Test der Dunn-Bonferroni-Test verwendet. Bei den Post-Hoc-Tests wurde die angepasste Signifikanz herangezogen. Schlussendlich wurden noch die Effektgrößen untersucht. Hierbei wurde für den Kruskal-Wallis-Test Eta-Quadrat berechnet und Cohen's d bei dem Post-Hoc-Test.

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Studie dargestellt. Anfangs wird die deskriptive Statistik des Studienkollektivs präsentiert. Danach wird das Ergebnis der F-V-Relation dargestellt.

6.1 Deskriptive Statistik

Im Zuge der Auswertung mussten drei Proband*innen ausgeschlossen werden. Die Punkte der erzielten Kraftwerte waren so gelegen, dass die Regressionsgerade einen Wert von über $1000^\circ/\text{sec}$ und somit einen zu hohen Wert für V_0 ermittelt hat. Das Excel-Tool von Alcazar (2022) hat dadurch keinen Wert für V_0 angezeigt. Somit erfolgte die Datenauswertung mit den übrigen 27 Proband*innen.

Von den insgesamt 27 Kinder und Jugendlichen waren 14 Mädchen und 13 Jungen. In der Pre-PHV waren fünf Personen, allesamt Jungen. In der Mid-PHV Gruppe waren 7 Personen, davon drei Mädchen und vier Jungen, und in der Post-PHV Gruppe 15 Personen, davon 11 Mädchen und vier Jungen.

Die konkreten Werte für Alter, Größe, Gewicht, Alter beim PHV und Reifestand für das Gesamtkollektiv sowie die einzelnen Untergruppen sind in Tabelle 4 ersichtlich. Ebenfalls evaluiert wurde die Anzahl der sportlich aktiven Tage. Diese zeigte zwischen den drei Gruppen keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,776$). Dies bietet eine gute Basis, um diese drei Gruppen in Bezug auf die F-V-Relation zu untersuchen, da die Anzahl der sportlich aktiven Tage vergleichbar sind.

Tabelle 4: Deskriptive Statistik des Studienkollektivs

Variable [Einheit]	Gesamt n = 27 (Mädchen = 14; Jungen = 13)	Pre-PHV n = 5 (Mädchen = 0; Jungen = 5)	Mid-PHV n = 7 (Mädchen = 3; Jungen = 4)	Post-PHV n = 15 (Mädchen = 11; Jungen = 4)
Alter [Jahre]	14,08 ($\pm 2,19$)	10,88 ($\pm 0,75$)	13,49 ($\pm 0,93$)	15,42 ($\pm 1,62$)*
Größe [cm]	161,91 ($\pm 11,91$)	145,58 ($\pm 4,95$)	159,31 ($\pm 7,87$)	168,56 ($\pm 9,17$)*
Gewicht [kg]	48,69 ($\pm 10,61$)	36,66 ($\pm 5,77$)	45,19 ($\pm 8,17$)	54,34 ($\pm 8,89$)*
Alter bei PHV [Jahre]	13,78 ($\pm 1,02$)	13,38 ($\pm 0,45$)	13,39 ($\pm 1,46$)	13,01 ($\pm 0,93$)
Reifestand	0,90 ($\pm 2,10$)	-2,50 ($\pm 0,48$)	0,10 ($\pm 0,91$)	2,41 ($\pm 0,95$)*, #
Sportlich aktive Tage [Tage/Woche]	4,70 ($\pm 1,38$)	4,20 ($\pm 1,79$)	4,86 ($\pm 1,21$)	4,80 ($\pm 1,37$)

Erläuterung: Alle Werte sind als Mittelwert (MW) und Standardabweichung ($\pm$ SD)

angegeben. Die Proband*innen werden in Reifegruppen anhand der Peak-height velocity gegliedert. *...statistisch signifikanter Unterschied ($p < 0,05$) zu Pre-PHV; #...statistisch signifikanter Unterschied ($p < 0,05$) zu Mid-PHV; detaillierte Auflistung aller p-Werte im Anhang.

6.2 F-V-Relation

Um die F-V-Relation zu bestimmen, wurden das maximale Drehmoment T_0 und die maximale theoretische Bewegungsgeschwindigkeit V_0 untersucht. Bei T_0 gab es einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen ($p = 0,003$). Mit einem Eta-Quadrat von $\eta^2 = 0,408$ wurden die Varianzunterschiede als groß beurteilt. Im Post-hoc Vergleich ergab sich ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen Pre-PHV und Post-PHV ($p = 0,002$). Das durchschnittliche maximale Drehmoment der Gruppe Post-PHV war mit 154,7 Nm ($\pm 37,6$) signifikant höher als jenes der Gruppe Pre-PHV mit 91,0 Nm ($\pm 19,5$). Mit einer Effektstärke von $d = 1,9$ ist dies als großer Effekt zu interpretieren. Die Mid-PHV Gruppe hatte ein durchschnittliches maximales Drehmoment von 127,3 Nm ($\pm 34,3$). Der Wert war somit höher als jener der Pre-PHV Gruppe und niedriger als jener der Post-PHV Gruppe. Es gab jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen Pre-PHV und Mid-PHV ($p = 0,189$), sowie den Gruppen Mid-PHV und Post-PHV ($p = 0,111$). Das maximale Drehmoment der drei Gruppen ist in Abbildung 10 dargestellt.

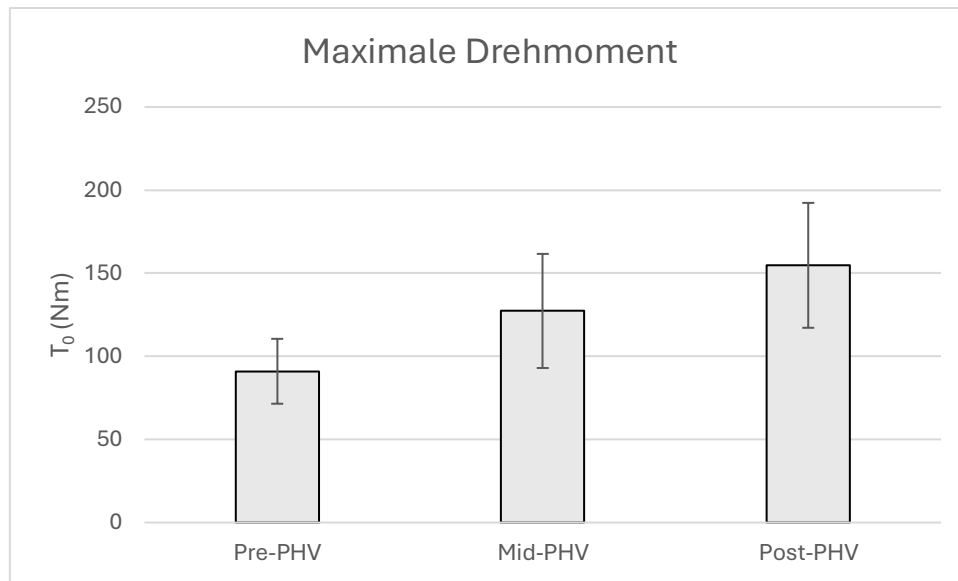


Abbildung 10: Maximale Drehmoment T_0 in Nm der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity), Mid-PHV (mid peak height velocity) und Post-PHV (post peak height velocity) inkl. der Standardabweichung.

Die maximale theoretische Bewegungsgeschwindigkeit V_0 betrug in der Pre-PHV Gruppe 539,3 °/sec ($\pm 176,2$). Die Mid-PHV Gruppe erzielte eine V_0 von 591,82 °/sec ($\pm 202,12$) und die Post-PHV Gruppe eine V_0 von 514,8 °/sec ($\pm 74,7$). Es zeigte sich jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Gruppen bezüglich der maximalen theoretischen Bewegungsgeschwindigkeit V_0 ($p = 0,957$). Die maximale theoretische Bewegungsgeschwindigkeit ist in der Abbildung 11 dargestellt.

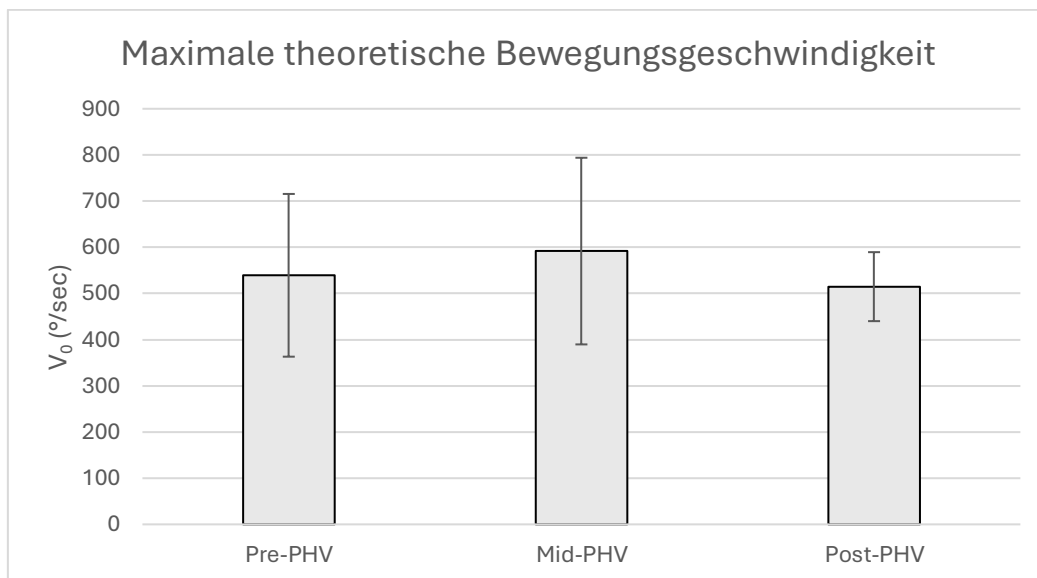


Abbildung 11: Maximale theoretische Bewegungsgeschwindigkeit V_0 in °/sec der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity), Mid-PHV (mid peak height velocity) und Post-PHV (post peak height velocity) inkl. der Standardabweichung.

Die F-V-Relation wird in Abbildung 12 dargestellt.

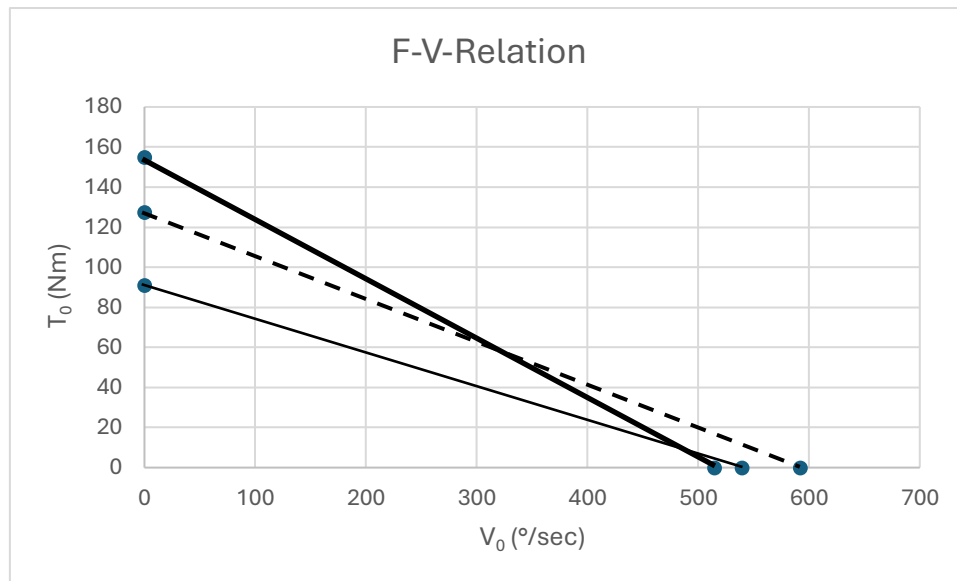


Abbildung 12: F-V-Relation (Kraft-Geschwindigkeits-Relation) der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity; dünne Linie), Mid-PHV (mid peak height velocity; gestrichelte Linie) und Post-PHV (post peak height velocity; dicke Linie). T_0 stellt die Maximalkraft in N dar und V_0 die maximale Bewegungsgeschwindigkeit in °/sec.

6.3 Relative F-V-Relation

Nachdem T_0 über das Körpergewicht normalisiert wurde, wurde die relative F-V-Relation ermittelt und zwischen den Gruppen verglichen. Die Pre-PHV Gruppe erzielte ein durchschnittliches maximales relatives Drehmoment von 2,49 Nm/kg ($\pm 0,37$), die Mid-PHV Gruppe erreichte 2,84 Nm/kg ($\pm 0,62$) und die Post-PHV Gruppe 2,83 Nm/kg ($\pm 0,36$). Es zeigte sich hier kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Gruppen ($p = 0,325$). Das maximale relative Drehmoment wird in Abbildung 13 dargestellt. Die maximale theoretische Bewegungsgeschwindigkeit ist dieselbe wie in Kapitel 3.2 beschrieben.

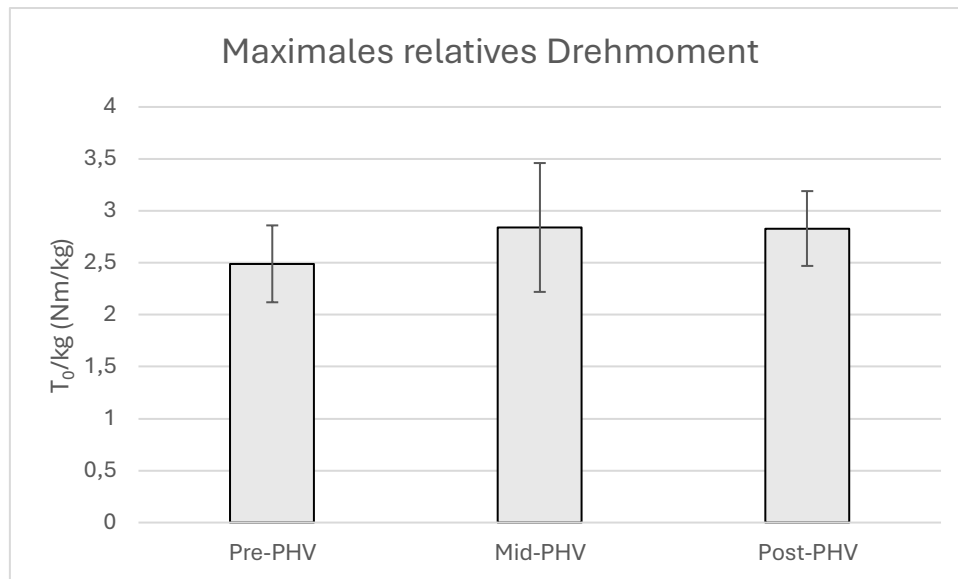


Abbildung 13: Maximales relatives Drehmoment (T_0/kg) der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity), Mid-PHV (mid peak height velocity) und Post-PHV (post peak height velocity) inkl. der Standardabweichung.

Die relative F-V-Relation wird in Abbildung 14 dargestellt.

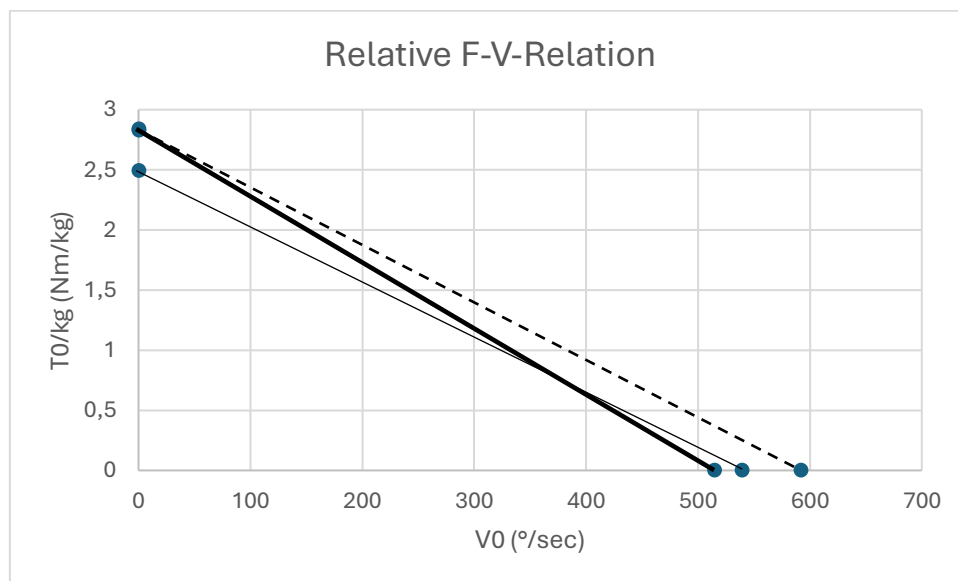


Abbildung 14: Relative F-V-Relation (Kraft-Geschwindigkeits-Relation) der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity; dünne Linie), Mid-PHV (mid peak height velocity; gestrichelte Linie) und Post-PHV (post peak height velocity; dicke Linie). T_0 stellt die Maximalkraft in N/kg dar und V_0 die maximale Bewegungsgeschwindigkeit in °/sec.

6.4 Maximale Muskelleistung

Bei $P_{\max}$ gab es einen signifikanten Unterschied zwischen den drei Gruppen ($p = 0,025$). Mit einem Eta-Quadrat von $\eta^2 = 0,225$ gibt es hier einen großen Effekt. Einen signifikanten Unterschied gibt es zwischen den Gruppen Pre-PHV und Post-PHV ($p = 0,011$). Die Gruppe Post-PHV erzielte mit 345,4 W ($\pm 89,9$) eine signifikant höhere $P_{\max}$ als die Gruppe Pre-PHV

mit 210,2 W ($\pm 67,2$). Mit einem Cohen's d von 1,6 gibt es hier einen großen Effekt. Die Mid-PHV Gruppe hatte eine durchschnittliche maximale Muskelleistung von 316,0 W ($\pm 85,4$). Der Wert war somit höher als jener der Pre-PHV Gruppe und niedriger als jener der Post-PHV Gruppe. Es gab jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen Pre-PHV und Mid-PHV ($p = 0,063$), sowie den Gruppen Mid-PHV und Post-PHV ($p = 0,500$). Die maximale Muskelleistung wird in Abbildung 15 dargestellt.

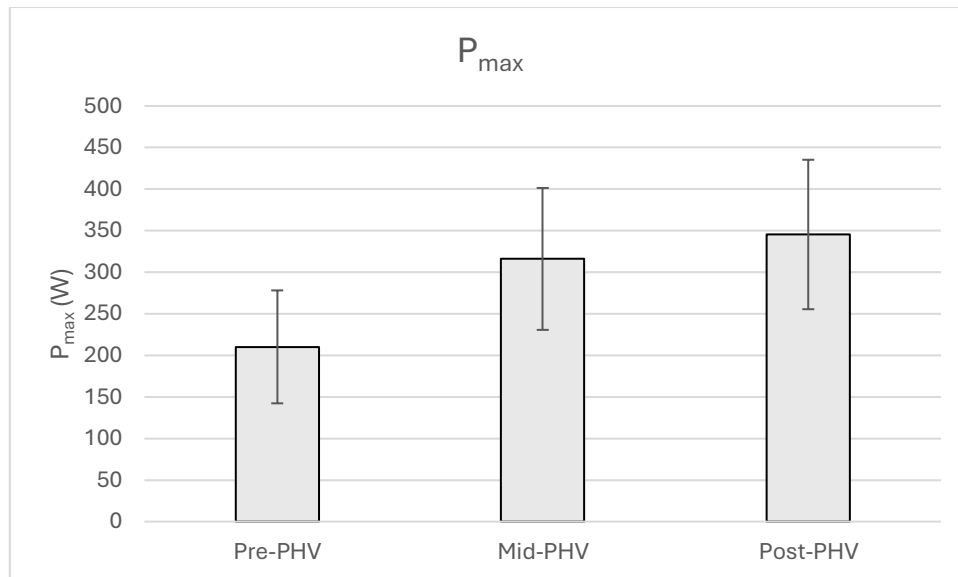


Abbildung 15: Maximale Muskelleistung P_{max} in W der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity), Mid-PHV (mid peak height velocity) und Post-PHV (post peak height velocity) inkl. der Standardabweichung.

6.5 Relative maximale Muskelleistung

Für die relative maximale Muskelleistung wurde P_{max} über das Körpergewicht normalisiert. Die erzielten durchschnittliche Mittelwerte der Gruppen waren bei der Pre-PHV Gruppe 5,90 W/kg ($\pm 2,23$), bei der Mid-PHV Gruppe 7,03 W/kg ($\pm 1,57$) und bei der Post-PHV Gruppe 6,34 W/kg ($\pm 1,04$). Es zeigte sich hier jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Gruppen ($p = 0,366$). Die maximale relative Muskelleistung wird in Abbildung 16 dargestellt.

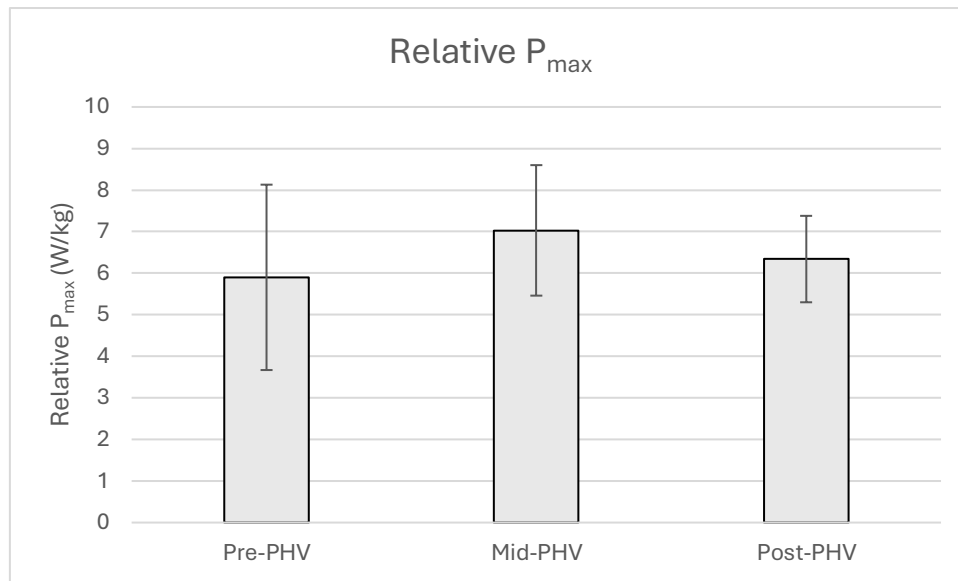


Abbildung 16: Maximale relative Muskelleistung $P_{\max}$ in W/kg der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity), Mid-PHV (mid peak height velocity) und Post-PHV (post peak height velocity) inkl. der Standardabweichung.

7 Diskussion

Ziel der Arbeit war es zu untersuchen, welchen Einfluss der biologische Entwicklungsstand bei Kindern und Jugendlichen auf die F-V-Relation hat. Die Proband*innen wurden abhängig ihres biologischen Entwicklungsstandes in drei Gruppen geteilt: Pre-PHV, Mid-PHV und Post-PHV. Die F-V-Relation wurde anhand der Kniestreckkraft bestimmt. Mittels Regressionsgerade wurde das maximale Drehmoment und die maximale theoretische Bewegungsgeschwindigkeit ermittelt. Diese Werte, sowie die maximale Muskelleistung, wurden dann zwischen den Gruppen verglichen. Die Ergebnisse werden in diesem Kapitel diskutiert.

Das Ergebnis der Studie hinsichtlich des maximalen absoluten Drehmoments ist, dass die Post-PHV Gruppe signifikant höhere Werte erzielen konnte als die Pre-PHV Gruppe. Die Mid-PHV Gruppe erzielte höhere Werte als die Pre-PHV Gruppe, sowie niedrigere Werte als die Post-PHV Gruppe. Jedoch gab es bei der Mid-PHV Gruppe keinen signifikanten Unterschied zu den beiden anderen Gruppen. Dies deckt sich zum Teil mit der anfänglichen Hypothese, in der erwartet wurde, dass die Post-PHV Gruppe höhere Drehmomentwerte erzielt als die Pre-PHV. Jedoch wurde auch erwartet, dass die Mid-PHV Gruppe höhere Werte erzielt als die Pre-PHV bzw. niedrigere Werte als die Post-PHV Gruppe. Dass die Werte in der Post-PHV höher sind als jene der Pre-PHV Gruppe bestätigt das Ergebnis der Studie von Fernández-Galván et al. (2022). Jedoch erzielte in ihrer Studie die Post-PHV höhere Werte als die Mid-PHV und letztere höhere Werte als die Pre-PHV Gruppe, mit einem größeren Effekt zwischen den beiden Gruppe Pre-PHV und Mid-PHV. Alcazar et al. (2025) bestätigten ebenfalls den Zusammenhang zwischen dem maximalen Drehmoment und dem Reifegrad. Jedoch gab es in ihrer Studie bereits eine Zunahme von T_0 innerhalb der Pre-PHV Gruppe, abhängig davon, wie lange die Kinder bis zum Erreichen des PHV entfernt waren.

Jugendliche nach Erreichen des PHV können höhere maximale Drehmoment- bzw. Kraftwerte erzielen als Kinder vor dem PHV. Hauptgründe für die Steigerung der Kraft ist die höhere Muskelmasse die sich im Laufe der Pubertät entwickelt und zu einem Kraftanstieg führt (Lloyd et al., 2011). Das höhere maximale Drehmoment der Post-PHV Gruppe ist auch bedingt durch das Knochenwachstum. Längere Beine führen zu einer verbesserten Hebelwirkung und somit zu höheren Drehmomentwerten (De Ste Croix, 2007). Durch die Ergebnisse der Studie lässt sich jedoch nicht sagen, wann genau dieser Kraftanstieg stattfindet. Jugendliche nach der Pubertät sind kräftiger als Kinder davor, jedoch lässt sich nicht sagen, ob es zu einem stärkeren Kraftanstieg vor Erreichen des PHV kommt, wie Fernández-Galván et al. (2022) in ihrer Studie beschrieben haben, oder erst danach. Aufgrund der erzielten Ergebnisse ist naheliegend, dass der Kraftanstieg konstant über den gesamten Zeitraum der Pubertät verläuft, ohne eine Phase vor oder nach dem PHV in der die Kraft stärker ansteigt.

Die maximale theoretische Bewegungsgeschwindigkeit zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den drei Gruppen. V_0 zeigt somit keine Veränderung im Laufe der Pubertät. Dieses Ergebnis widerlegt die Hypothese, in der angenommen wurde, dass die Post-PHV eine höhere V_0 erreicht als die Mid-PHV Gruppe. Zu diesem Ergebnis sind Fernández-Galván et al. (2022) in ihrer Studie gekommen, weshalb die Hypothese formuliert wurde. Fernández-Galván et al. (2022) haben in ihrer Studie die Sprintleistungen zwischen den Gruppen verglichen, bei denen sich die Geschwindigkeit erhöhte, je älter die Gruppe war. Die Sprintleistung kann sich jedoch aus mehreren Faktoren zusammensetzen. Die Körpergröße, die während der Pubertät zunimmt, korreliert mit der Schrittlänge. So haben große Personen eine größere Schrittlänge als kleinere Personen. Dieser Unterschied in der Schrittlänge kann zu einer besseren Sprintleistung bei Jugendlichen im Vergleich zu Kindern führen. Außerdem kann auch eine Kraftzunahme zu einer besseren Sprintleistung beitragen. Deshalb wird angenommen, dass die verbesserte Sprintleistung in der Studie Fernández-Galván et al. (2022) in erster Linie auf diese Faktoren zurückzuführen ist und nicht auf physiologische Faktoren innerhalb der Muskulatur. Vor allem auch deshalb, da die Muskelfaserverteilung weitestgehend genetisch bedingt ist und sich nur in geringem Ausmaß, wie z.B. durch Training, verändern lässt (Kenney et al., 2020). Alcazar et al. (2025) konnten innerhalb der Pre-PHV Gruppe ebenfalls keinen Zusammenhang zum Reifegrad finden. Es wird somit angenommen, dass sich die maximale theoretische Geschwindigkeit im Laufe der Pubertät nicht verändert.

Der biologische Entwicklungsstand beeinflusst die F-V-Relation somit nur über das maximale Drehmoment, welches in der Post-PHV Gruppe signifikant höher ist als in der Pre-PHV Gruppe. Die maximale theoretische Geschwindigkeit scheint nicht durch den biologischen Entwicklungsstand beeinflusst zu werden.

Die Studie hat auch die relative F-V-Relation untersucht. Das maximale Drehmoment aller Proband*innen wurde dabei durch das Körpergewicht normalisiert. Beim maximalen relativen Drehmoment hat sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen gezeigt. Über den Zeitraum der Pubertät bleibt das maximale relative Drehmoment somit gleich, unabhängig des Entwicklungsstandes. Diese Erkenntnis deckt sich mit jener von Alcazar et al. (2025), die ebenfalls feststellten, dass die Korrelation zwischen dem maximalen Drehmoment und dem Reifegrad wegfällt, sobald die Werte auf das Körpergewicht normalisiert wurden. Sie deckt sich auch zum Teil mit jenen von Fernández-Galván et al. (2022), bei denen es ebenfalls keinen Unterschied hinsichtlich der maximalen relativen Kraftwerte zwischen den beiden Gruppen Mid-PHV und Post-PHV gibt. Zwischen den Gruppen Pre-PHV und Mid-PHV haben sie jedoch einen Unterschied bei der relativen Kraft entdeckt, bei ihnen sind sie Werte aber ebenfalls deutlich homogener als bei der absoluten Kraft. Es ist jedoch anzumerken, dass auch in der vorliegenden Studie der Mittelwert der Mid-PHV höher ist als jener der Pre-PHV Gruppe.

Aufgrund der geringen Stichprobengröße weist die Studie eine eingeschränkte statistische Power auf. Es ist somit möglich, dass auch in dieser Studie ein Unterschied vorliegen könnte, der jedoch statistisch nicht abgesichert werden konnte. Die Erkenntnis, dass die relative Kraft deutlich weniger zunimmt, zeigt sich somit auch bei Fernández-Galván et al. (2022). Im Zuge der Pubertät kommt es aufgrund der zunehmenden Muskelmasse zu einer Steigerung der absoluten Kraft. Der Kraftanstieg scheint aber nicht überproportional zum Körpergewicht zu wachsen. Jugendliche werden somit nur um so vieles stärker, wie sie an Körpergewicht zulegen. Der Kraftanstieg wird während der Pubertät auch durch das Längenwachstum etwas gebremst. Durch die veränderten Körperproportionen kann es zu leichten Störungen der motorischen Koordination kommen, wodurch die Leistungen gebremst oder sogar etwas verschlechtert werden können (Lloyd et al., 2011). In der Literatur weist die relative Kraft unterschiedliche Verläufe während der Pubertät zwischen den beiden Geschlechtern auf. Während der Kindheit und der Pubertät verändert sich die relative Kraft bei Mädchen nur geringfügig. Anders sieht es bei den Jungen aus. Da steigt die relative Kraft nach der PHV an (De Ste Croix, 2007). In dieser Studie wurde keine Veränderung der relativen Kraft beobachtet. Es wurde in den jeweiligen Gruppen aber nicht zwischen Jungen und Mädchen unterschieden. So waren in der Post-PHV deutlich mehr Mädchen als Jungen vertreten. Deshalb wird angenommen, dass die relative Kraft in der Post-PHV Gruppe in erster Linie dem der Mädchen ähnelt, weshalb es zu keinem signifikanten Unterschied in der Post-PHV kommt. Interessant wäre es in weiterer Folge beide Geschlechter getrennt zu betrachten und zu untersuchen, ob es bei Jungen nach der PHV zu einem Anstieg der relativen Kraft kommt. Da es aufgrund der hormonellen und körperlichen Veränderungen ab der PHV zu deutlichen Unterschieden in den Kraftwerten zwischen den Geschlechtern kommt (Handelsman et al., 2018), wäre ein anderer Verlauf der relativen Kraft hier denkbar.

Die maximale Muskelleistung, die sich aus dem Produkt aus T_0 und V_0 zusammensetzt, war in der Post-PHV ebenfalls signifikant höher als in der Pre-PHV Gruppe. Da es bei V_0 keinen signifikanten Unterschied zwischen den drei Gruppen gibt, ist die gesteigerte $P_{\max}$ ausschließlich Folge einer gesteigerten T_0 . Wird die $P_{\max}$ über das Körpergewicht normalisiert, zeigt sich auch hier, wie bei T_0 , dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen gibt. Dies deckt sich mit dem Ergebnis von Alcazar et al. (2025), die in ihrer Studie herausfanden, dass es innerhalb der Pre-PHV Gruppe keinen Zusammenhang zum Reifestand gab, wenn $P_{\max}$ über das Körpergewicht normalisiert wurde. Dies deckt sich jedoch nicht ganz mit den Ergebnissen von Fernández-Galván et al. (2022). Diese haben zwar einen signifikanten Unterschied bei der relativen $P_{\max}$ gefunden, jedoch ist auch in deren Studie $P_{\max}$ deutlich homogener zwischen den drei Gruppen wenn sie über das Körpergewicht normiert wird. Da in deren Studie V_0 auch über die Altersgruppen zunimmt, hat die gesteigerte maximale Bewegungsgeschwindigkeit ebenfalls Einfluss auf $P_{\max}$. Dies könnte erklären, warum in der

vorliegenden Studie die relative $P_{\max}$ keine Unterschiede aufweist. Auch hier ist anzumerken, dass der reine Mittelwert der relativen $P_{\max}$ der Mid-PHV Gruppe einen deutlich höheren Wert aufweist als jener der Pre-PHV Gruppe. Eine eingeschränkte statistische Power aufgrund der geringen Stichprobengröße könnte auch hier einen potentiellen Unterschied zwischen den beiden Gruppen statistisch nicht absichern.

7.1 Implikationen für das Training

Diese Studie liefert weitere Erkenntnisse für die Gestaltung des Trainings im Kindes- und Jugendalter, und bestätigt größtenteils die vorherrschende Trainingslehre in der Literatur. Wie bereits bekannt, jedoch noch nicht immer in der Praxis so angewandt, sollte man im Trainingsprozess auf den biologischen Entwicklungsstand achten und nicht auf das kalendarische Alter, da sich jedes Kind bzw. jeder Jugendliche unterschiedlich entwickelt (Mirwald et al., 2002; Philippaerts et al., 2006). Jugendliche nach dem PHV sind signifikant stärker als Kinder davor. Dies ist maßgeblich darauf zurückzuführen, dass im Laufe der Pubertät zu einem Anstieg an Testosteron kommt, welcher den Aufbau von Muskelgewebe fördert (Xu et al., 2021). Deshalb ist es sinnvoll den Fokus auf das Krafttraining, in erster Linie Hypertrophie und Maximalkrafttraining, nach dem PHV zu legen. Die Studie konnte keine Unterschiede hinsichtlich T_0 zwischen den Gruppen Pre-PHV und Mid-PHV zeigen. Da es in der Phase des PHV außerdem zu einem kurzzeitigen Rückgang der Koordination aufgrund des unterschiedlich schnellen Wachstums des Oberkörpers und der Beine kommt (Lloyd et al., 2011), wird empfohlen hier nicht mit zu hohen Lasten zu trainieren. Training der Koordination in dieser Phase wäre ratsam. Mit der Basiskraft, sowie technische Vorübungen für späteres Hypertrophie bzw. Maximalkrafttraining, kann auch schon während bzw. vor dem PHV begonnen werden. In dieser Studie hat sich nicht verdeutlicht, dass es eine Phase gibt, in der die Bewegungsgeschwindigkeit optimal trainiert werden kann, da es keinen Unterschied zwischen den drei Gruppen gab. Es scheint somit unabhängig des Alters zu sein. Da das zentrale Nervensystem vor dem PHV eine hohe Plastizität aufweist (Ferrauti et al., 2025) und nach dem PHV das Krafttraining mit höheren Lasten von Bedeutung gewinnt, wird empfohlen, den Fokus auf das Schnelligkeitstraining vor den PHV zu legen.

7.2 Limitationen

Die Studie weist auch einige Limitationen auf. Diese werden hier beschrieben.

Die Größen der drei Gruppe waren nicht ganz ausgeglichen. Eine Gruppe war deutlich größer als die anderen beiden. Die beiden Gruppen Pre-PHV und Mid-PHV waren mit einer Stichprobengröße von 5 bzw. 7 Kinder und Jugendlichen relativ klein. Dadurch kommt es zu einer eingeschränkten statistischen Power, was dazu führen könnte, dass existierende Unterschiede zwischen den Gruppen nicht statistisch abgesichert und somit übersehen werden konnten. Außerdem wurde innerhalb der Gruppen nicht zwischen Jungen und

Mädchen unterschieden. Es wurde also nur abhängig des Entwicklungsstandes unterschieden und nicht zwischen den Geschlechtern. Das führt dazu, dass das Verhältnis zwischen Jungen und Mädchen in den drei Gruppen unterschiedlich war. Während in der Pre-PHV Gruppe ausschließlich Jungen waren, waren in der Post-PHV Gruppe hauptsächlich Mädchen. Da Jungen höhere Kraftwerte erzielen können als Mädchen, vor allem nach dem Eintreffen des PHV (Handelsman et al., 2018), sind die Kraftwerte der gesamten Gruppe ebenfalls abhängig davon, wie die Verteilung der Geschlechter innerhalb der Gruppen ist. Ein ausgewogenes Verhältnis der Geschlechter innerhalb aller Gruppen wäre geeigneter gewesen. Idealerweise hätte man auch nochmals die Gruppen aufteilen können, und Jungen und Mädchen getrennt betrachten können. Dabei wären aber die Gruppen zu klein gewesen.

Um die F-V-Relation zu bestimmen, wurden die maximalen Drehmomentwerte bei drei verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeiten gemessen. Bei einzelnen Proband*innen mussten die Drehmomentwerte bei einer gewissen Bewegungsgeschwindigkeit ausgeschlossen werden, da sie niedriger waren als jene der nächsthöheren Bewegungsgeschwindigkeit. Aufgrund der Gesetze der F-V-Relation war dies kein maximaler Versuch und der Wert wurde somit nicht miteinander berechnet. Eine Limitation war, dass die Regressionsgerade somit nur mit zwei Datenpunkten ermittelt wurde, anstatt der erwünschten drei Punkte.

Für die Ermittlung der F-V-Relation wurde eine Regressionsgerade berechnet. Diese sollte einen r-Wert von zumindest 0,95 haben, um als valide zu gelten. Eine weitere Limitation der Studie ist, dass dieser r-Wert nicht bei allen Proband*innen erreicht werden konnte. Vereinzelt ist der r-Wert etwas unter 0,95 gelegen. Die Daten dieser Proband*innen wurden trotzdem in die Auswertung miteinbezogen, um genügend Datenpunkte für die Studie zu haben.

7.3 Fazit

Diese Studie liefert wichtige Erkenntnisse für die F-V-Relation im Kindes- und Jugendalter, die bis dato noch wenig erforscht wurde. Der biologische Entwicklungsstand beeinflusst die F-V-Relation ausschließlich über T_0 . Das maximale Drehmoment ist nach dem PHV signifikant höher als vor dem PHV. V_0 weist keine Unterschiede über die drei Gruppen auf, der biologische Entwicklungsstand hat somit keinen Einfluss auf die maximale Bewegungsgeschwindigkeit. Wird T_0 über das Körpergewicht normalisiert, zeigt sich kein Unterschied zwischen den Gruppen. Das höhere T_0 erfolgt somit hauptsächlich über die Zunahme an Körpergewicht. $P_{\max}$ ist nach dem PHV signifikant höher als vor dem PHV, der höhere Wert erfolgt ausschließlich über das höhere T_0 . Aus diesen Erkenntnissen lässt sich für den Trainingsprozess ableiten, dass der Fokus vor dem PHV auf der Schnelligkeit liegen sollte, während nach dem PHV der Fokus auf das Krafttraining gelegt werden kann, insbesondere Hypertrophie Training und Maximalkrafttraining.

In Zukunft bedarf es noch weiterer Forschung, um die Ergebnisse der Studie zu stärken. Eine Studie mit einer größeren Stichprobe wäre wünschenswert. Außerdem wäre auch wichtig bei zukünftigen Studien Jungen und Mädchen getrennt zu betrachten, um herauszufinden, ob der biologische Entwicklungsstand unterschiedliche Einflüsse auf die F-V-Relation hat, abhängig des Geschlechts. Interessant wäre auch eine Längsschnittstudie, um den Verlauf der F-V-Relation bei Kindern und Jugendlichen vor, während und nach dem PHV zu beobachten.

8 Literaturverzeichnis

- Aagaard, P., Suetta, C., Caserotti, P., Magnusson, S. P. & Kjær, M. (2010). Role of the nervous system in sarcopenia and muscle atrophy with aging: strength training as a countermeasure. *Scandinavian Journal Of Medicine And Science in Sports*, 20(1), 49–64. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2009.01084.x>
- Abbott, B. C. & Wilkie, D. R. (1953). The relation between velocity of shortening and the tension-length curve of skeletal muscle. *The Journal Of Physiology*, 120(1–2), 214–223. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1953.sp004886>
- Acevedo-Rodriguez, A., Kauffman, A. S., Cherrington, B. D., Borges, C. S., Roepke, T. A. & Laconi, M. (2018). Emerging insights into hypothalamic-pituitary-gonadal axis regulation and interaction with stress signalling. *Journal Of Neuroendocrinology*, 30(10). <https://doi.org/10.1111/jne.12590>
- Albin, A. & Norjavaara, E. (2013). Pubertal Growth and Serum Testosterone and Estradiol Levels in Boys. *Hormone Research in Paediatrics*, 80(2), 100–110. <https://doi.org/10.1159/000353761>
- Alcazar, J. (2022). *GitHub - JulianAlcazarPhD/F-V-profiling: Excel files for the analysis of the force-velocity, load-velocity and torque-velocity relationships*. GitHub. <https://github.com/JulianAlcazarPhD/F-V-profiling>
- 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, 769. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00769>
- Alcazar, J., Pareja-Blanco, F., Rodriguez-Lopez, C., Gutierrez-Reguero, H., Sanchez-Valdepeñas, J., Cornejo-Daza, P. J., Ara, I. & Alegre, L. M. (2022). A novel equation that incorporates the linear and hyperbolic nature of the force–velocity relationship in lower and upper limb exercises. *European Journal Of Applied Physiology*, 122(10), 2305–2313. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-05006-1>
- Alcazar, J., Reznar, L., Bogoevski, G., Raidl, P., Schaun, G. Z. & Csapo, R. (2025). Association of Knee Extension Torque, Velocity and Power with Chronological Age, Maturity Status and Physical Performance in Prepubertal Boys. *Children*, 12(12), 1713. <https://doi.org/10.3390/children12121713>
- Alcazar, J., Rodriguez-Lopez, C., Ara, I., Alfaro-Acha, A., Mañas-Bote, A., Guadalupe-Grau, A., García-García, F. & Alegre, L. (2017). The Force-Velocity Relationship in Older People: Reliability and Validity of a Systematic Procedure. *International Journal Of Sports Medicine*, 38(14), 1097–1104. <https://doi.org/10.1055/s-0043-119880>
- Alcazar, J., Rodriguez-Lopez, C., Ara, I., Alfaro-Acha, A., Rodríguez-Gómez, I., Navarro-Cruz, R., Losa-Reyna, J., García-García, F. J. & Alegre, L. M. (2018). Force-velocity profiling

- in older adults: An adequate tool for the management of functional trajectories with aging. *Experimental Gerontology*, 108, 1–6.
<https://doi.org/10.1016/j.exger.2018.03.015>
- Bobbert, M. F. (2012). Why is the force-velocity relationship in leg press tasks quasi-linear rather than hyperbolic? *Journal Of Applied Physiology*, 112(12), 1975–1983.
<https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00787.2011>
- Brinckmann, P., Frobin, W., Leivseth, G. & Drerup, B. (2012). *Orthopädische Biomechanik* (2. Aufl.). Verl.-Haus Monsenstein und Vannerdat.
- De Ste Croix, M. (2007). ADVANCES IN PAEDIATRIC STRENGTH ASSESSMENT: CHANGING OUR PERSPECTIVE ON STRENGTH DEVELOPMENT. *DOAJ (DOAJ: Directory Of Open Access Journals)*.
<https://doaj.org/article/8aa9e57ec8f445769c39c56ea922fb7e>
- 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>
- Devrome, A. N. & MacIntosh, B. R. (2007). The biphasic force-velocity relationship in whole rat skeletal muscle in situ. *Journal Of Applied Physiology*, 102(6), 2294–2300.
<https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00276.2006>
- Driss, T., Vandewalle, H., Chevalier, J. L. & Monod, H. (2002). Force-Velocity Relationship on a Cycle Ergometer and Knee-Extensor Strength Indices. *Canadian Journal Of Applied Physiology*, 27(3), 250–262. <https://doi.org/10.1139/h02-015>
- Edman, K. A. (1979). The velocity of unloaded shortening and its relation to sarcomere length and isometric force in vertebrate muscle fibres. *The Journal Of Physiology*, 291(1), 143–159. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1979.sp012804>
- Edman, K. A. P., Mulieri, L. A. & Scubon-Mulieri, B. (1976). Non-Hyperbolic Force-Velocity relationship in single muscle fibres. *Acta Physiologica Scandinavica*, 98(2), 143–156.
<https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1976.tb00234.x>
- 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), 1412. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031412>
- Ferrauti, A., Stadtmann, T., Ulbricht, A. & Kappenstein, J. (2025). Training im Kindes- und Jugendalter. In *Trainingswissenschaft für die Sportpraxis* (2. Aufl., S. 587–640). Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58227-5_10
- Flaake, K. (2012). 6 Pubertät, Biologie und Kultur: Erfahrungen körperlicher Veränderungen. In *Oldenbourg Wissenschaftsverlag eBooks* (S. 135–152).
<https://doi.org/10.1524/9783486714975.135>

- Glaser, R. (1989). Grundriß der Biomechanik. In *De Gruyter eBooks*.
<https://doi.org/10.1515/9783112524800>
- Grbic, V., Djuric, S., Knezevic, O., Mirkov, D., Nedeljkovic, A. & Jaric, S. (2017). A Novel Two-Velocity Method for Elaborate Isokinetic Testing of Knee Extensors. *International Journal Of Sports Medicine*, 38(10), 741–746. <https://doi.org/10.1055/s-0043-113043>
- Gründker, C. & Emons, G. (2020). Die HPO(Hypothalamus-Hypophyse-Ovar)-Achse – „revisited“. *Der Gynäkologe*, 53(8), 494–501. <https://doi.org/10.1007/s00129-020-04630-2>
- Güllich, A. & Krüger, M. (2013). Sport: das Lehrbuch für das Sportstudium. In *Springer eBooks*. <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BB15458637>
- Güllich, A. & Krüger, M. (2023). Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit. In *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53410-6>
- Handelsman, D. J., Hirschberg, A. L. & Berman, S. (2018). Circulating Testosterone as the Hormonal Basis of Sex Differences in Athletic Performance. *Endocrine Reviews*, 39(5), 803–829. <https://doi.org/10.1210/er.2018-00020>
- Hill, A. V. (1938). The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proceedings Of The Royal Society Of London. Series B, Biological Sciences*, 126(843), 136–195. <https://doi.org/10.1098/rspb.1938.0050>
- Hintzy, F., Tordi, N., Predine, E., Rouillon, J. & Belli, A. (2003). Force–velocity characteristics of upper limb extension during maximal wheelchair sprinting performed by healthy able-bodied females. *Journal Of Sports Sciences*, 21(11), 921–926. <https://doi.org/10.1080/0264041031000140392>
- Horwath, O., Apró, W., Moberg, M., Godhe, M., Helge, T., Ekblom, M., Hirschberg, A. L. & Ekblom, B. (2020). Fiber type-specific hypertrophy and increased capillarization in skeletal muscle following testosterone administration in young women. *Journal Of Applied Physiology*, 128(5), 1240–1250. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00893.2019>
- Hoyer-Kuhn, H. & Semler, O. (2023). Einfluss von Pubertät und Hormonen auf die Knochenentwicklung. *Gynäkologische Endokrinologie*, 21(1), 11–16. <https://doi.org/10.1007/s10304-022-00491-1>
- Janicijevic, D., García-Ramos, A., Knezevic, O. M. & Mirkov, D. M. (2019). Feasibility of the two-point method for assessing the force-velocity relationship during lower-body and upper-body isokinetic tests. *Journal Of Sports Sciences*, 37(20), 2396–2402. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1636523>
- Jaric, S. (2015). Force-velocity Relationship of Muscles Performing Multi-joint Maximum Performance Tasks. *International Journal Of Sports Medicine*, 36(09), 699–704. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1547283>

- Jekauc, D., Wagner, M. O., Kahlert, D. & Woll, A. (2013). Reliabilität und Validität des MoMo-Aktivitätsfragebogens für Jugendliche (MoMo-AFB). *Diagnostica*, 59(2), 100–111. <https://doi.org/10.1026/0012-1924/a000083>
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Brughelli, M. & Morin, J. (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>
- Jones, D. A. (2010). Changes in the force-velocity relationship of fatigued muscle: implications for power production and possible causes. *Journal Of Physiology*, 588(16), 2977–2986. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.190934>
- Kapelari, K. (2019). Besonderheiten des Haarwuchses und -verlustes in der Pubertät. *Monatsschrift Kinderheilkunde*, 167(12), 1142–1148. <https://doi.org/10.1007/s00112-019-00766-1>
- Kattan, C. (2020). P wie Pubertätsentwicklung. In *Springer eBooks* (S. 71–74). https://doi.org/10.1007/978-3-658-28133-5_16
- Kenney, W. L., Wilmore, J. H. & Costill, D. L. (2020). *Physiology of Sport and Exercise* (7. Aufl.). Human Kinetics Publishers.
- 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>
- Kozieł, S. M. & Malina, R. M. (2017). Modified Maturity Offset Prediction Equations: Validation in Independent Longitudinal Samples of Boys and Girls. *Sports Medicine*, 48(1), 221–236. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0750-y>
- Kraft, T., & Brenner, B. (2019). Muskulatur. In H. Pape, A. Kurtz, & S. Silbernagl (Hrsg.), *Physiologie* (9. Aufl., S. 136–172). Thieme.
- Kumar, N. T. A., Oliver, J. L., Lloyd, R. S., Pedley, J. S. & Radnor, J. M. (2021). The Influence of Growth, Maturation and Resistance Training on Muscle-Tendon and Neuromuscular Adaptations: A Narrative Review. *Sports*, 9(5), 59. <https://doi.org/10.3390/sports9050059>
- Lefevre, J., Beunen, G., Steens, G., Claessens, A. & Renson, R. (1990). Motor performance during adolescence and age thirty as related to age at peak height velocity. *Annals Of Human Biology*, 17(5), 423–435. <https://doi.org/10.1080/03014469000001202>
- Lindberg, K., Solberg, P., Bjørnsen, T., Helland, C., Rønnestad, B., Frank, M. T., Haugen, T., Østerås, S., Kristoffersen, M., Midttun, M., Sæland, F. & Paulsen, G. (2021). Force-velocity profiling in athletes: Reliability and agreement across methods. *PLoS ONE*, 16(2), e0245791. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245791>

- Lloyd, R. S., Oliver, J. L., Hughes, M. G. & Williams, C. A. (2011). The Influence of Chronological Age on Periods of Accelerated Adaptation of Stretch-Shortening Cycle Performance in Pre and Postpubescent Boys. *The Journal Of Strength And Conditioning Research*, 25(7), 1889–1897. <https://doi.org/10.1519/jsc.0b013e3181e7faa8>
- Malina, R. M., Coelho-E-Silva, M. J., Martinho, D. V., Sousa-E-Siva, P., Figueiredo, A. J., Cumming, S. P., Králík, M. & Kozieł, S. M. (2021). Observed and predicted ages at peak height velocity in soccer players. *PLoS ONE*, 16(7), e0254659. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254659>
- Mirwald, R. L., Baxter-Jones, A. D. G., Bailey, D. A. & Beunen, G. P. (2002). An assessment of maturity from anthropometric measurements. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(4), 689–694. <https://doi.org/10.1097/00005768-200204000-00020>
- Morin, J. & Samozino, P. (2015). 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>
- Musch, J. & Hay, R. (1999). The Relative Age Effect in Soccer: Cross-Cultural Evidence for a Systematic Discrimination against Children Born Late in the Competition Year. *Sociology Of Sport Journal*, 16(1), 54–64. <https://doi.org/10.1123/ssj.16.1.54>
- Paulsen, A. (1969). Hormone. In *De Gruyter eBooks*. <https://doi.org/10.1515/9783110833904>
- Philippaerts, R. M., Vaeyens, R., Janssens, M., Van Renterghem, B., Matthys, D., Craen, R., Bourgois, J., Vrijens, J., Beunen, G. & Malina, R. M. (2006). The relationship between peak height velocity and physical performance in youth soccer players. *Journal Of Sports Sciences*, 24(3), 221–230. <https://doi.org/10.1080/02640410500189371>
- Rahmani, A., Viale, F., Dalleau, G. & Lacour, J. (2001). Force/velocity and power/velocity relationships in squat exercise. *European Journal Of Applied Physiology*, 84(3), 227–232. <https://doi.org/10.1007/pl00007956>
- Ralston, H. J., Polissar, M. J., Inman, V. T., Close, J. R. & Feinstein, B. (1949). Dynamic Features of Human Isolated Voluntary Muscle in Isometric and Free Contractions. *Journal Of Applied Physiology*, 1(7), 526–533. <https://doi.org/10.1152/jappl.1949.1.7.5264>
- Reh, F., Gerdes, R., Nolte, J., Antwerpes, F. & Fink, B. (2025). *Hypothalamus-Hypophysen-Achse*. DocCheck Flexikon. Abgerufen am 8. September 2025, von <https://flexikon.doccheck.com/de/Hypothalamus-Hypophysen-Achse#:~:text=Die%20Hypothalamus%2DHypophysen%2DAchse%20ist,Dr%C3%BCsen%20im%20gesamten%20K%C3%B6rper%20steuert.>
- Ritchie, J. M. & Wilkie, D. R. (1958). The dynamics of muscular contraction. *The Journal Of Physiology*, 143(1), 104–113. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1958.sp006047>

- Rogol, A. D. (2002). Androgens and puberty. *Molecular And Cellular Endocrinology*, 198(1–2), 25–29. [https://doi.org/10.1016/s0303-7207\(02\)00365-9](https://doi.org/10.1016/s0303-7207(02)00365-9)
- Saeki, J., Iizuka, S., Sekino, H., Suzuki, A., Maemichi, T. & Torii, S. (2021). Optimum Angle of Force Production Temporarily Changes Due to Growth in Male Adolescence. *Children*, 8(1), 20. <https://doi.org/10.3390/children8010020>
- Samozino, P., Rejc, E., Di Prampero, P. E., Belli, A. & Morin, J. (2011). Optimal Force–Velocity Profile in Ballistic Movements—Altius: Citius or Fortius? *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(2), 313–322. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31822d757a>
- Sašek, M., Mirkov, D. M., Hadžić, V. & Šarabon, N. (2022). The Validity of the 2-Point Method for Assessing the Force-Velocity Relationship of the Knee Flexors and Knee Extensors: The Relevance of Distant Force-Velocity Testing. *Frontiers in Physiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.849275>
- Schünke, M., Schulte, E., Schumacher, U., Voll, M. & Wesker, K. (2022). *PROMETHEUS Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*. <https://doi.org/10.1055/b0000000613>
- Sinha-Hikim, I., Artaza, J., Woodhouse, L., Gonzalez-Cadavid, N., Singh, A. B., Lee, M. I., Storer, T. W., Casaburi, R., Shen, R. & Bhasin, S. (2002). Testosterone-induced increase in muscle size in healthy young men is associated with muscle fiber hypertrophy. *American Journal Of Physiology-Endocrinology And Metabolism*, 283(1), E154–E164. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00502.2001>
- Tomasits, J. & Haber, P. (2011). *Leistungsphysiologie*. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0437-8>
- Vandewalle, H., Peres, G., Heller, J., Panel, J. & Monod, H. (1987). Force-velocity relationship and maximal power on a cycle ergometer. *European Journal Of Applied Physiology And Occupational Physiology*, 56(6), 650–656. <https://doi.org/10.1007/bf00424805>
- Vaupel, P., Schaible, H. & Mutschler, E. (2015). *Anatomie, Physiologie, Pathophysiologie des Menschen* (7. Aufl.). Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft. <https://doi.org/10.52778/9783804737242>
- Wank, V. (2021). Biomechanik der Sportarten. In *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60525-7>
- Wess, J., Jelonek, T., Gbr, V. & Geleitwort, C. (2007). Theoretische Mechanik. In *Springer-Lehrbuch*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74869-4>
- Wild, C. Y., Steele, J. R. & Munro, B. J. (2012). Why do girls sustain more anterior cruciate ligament injuries than boys? *Sports Medicine*, 42(9), 733–749. <https://doi.org/10.1007/bf03262292>
- Xu, Y., Wen, Z., Deng, K., Li, R., Yu, Q. & Xiao, S. (2021). Relationships of sex hormones with muscle mass and muscle strength in male adolescents at different stages of puberty. *PLoS ONE*, 16(12), e0260521. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260521>

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Organisation eines quergestreiften Muskels (Kraft & Brenner, 2019, S. 137). ...	12
Abbildung 2: Hyperbolische F-V-Relation (Alcazar et al., 2019, S. 4).....	15
Abbildung 3: Form der F-V-Relation nach Dern et al. (1947; zit. n. Alcazar et al., 2019, S. 5).	17
Abbildung 4: Doppelt-hyperbolische Form der F-V-Relation nach Edman et al. (1976; zit. n. Alcazar et al., 2019, S. 7).	18
Abbildung 5: Hyperbolische F-V-Relation mit dazugehöriger P-V-Relation (Jaric, 2015, S. 700).....	21
Abbildung 6: Lineare F-V-Relation mit dazugehöriger P-V-Relation (Jaric, 2015, S. 700).	22
Abbildung 7: Regelkreislauf der HPG-Achse (Reh et al., 2025).	24
Abbildung 8: Verlauf des Wachstums der Körpergröße (Ferrauti et al., 2025, S. 595).....	27
Abbildung 9: Verlauf der Zunahme der Körpergröße, Beinlängen und Sitzhöhe bei Jungen (a) und Mädchen (b) (Mirwald et al., 2002, S. 690).	30
Abbildung 10: Maximale Drehmoment T_0 in Nm der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity), Mid-PHV (mid peak height velocity) und Post-PHV (post peak height velocity) inkl. der Standardabweichung.....	38
Abbildung 11: Maximale theoretische Bewegungsgeschwindigkeit V_0 in °/sec der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity), Mid-PHV (mid peak height velocity) und Post-PHV (post peak height velocity) inkl. der Standardabweichung.	38
Abbildung 12: F-V-Relation (Kraft-Geschwindigkeits-Relation) der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity; dünne Linie), Mid-PHV (mid peak height velocity; gestrichelte Linie) und Post-PHV (post peak height velocity; dicke Linie). T_0 stellt die Maximalkraft in N dar und V_0 die maximale Bewegungsgeschwindigkeit in °/sec.	39
Abbildung 13: Maximales relatives Drehmoment (T_0 /kg) der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity), Mid-PHV (mid peak height velocity) und Post-PHV (post peak height velocity) inkl. der Standardabweichung.....	40
Abbildung 14: Relative F-V-Relation (Kraft-Geschwindigkeits-Relation) der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity; dünne Linie), Mid-PHV (mid peak height velocity; gestrichelte Linie) und Post-PHV (post peak height velocity; dicke Linie). T_0 stellt die Maximalkraft in N/kg dar und V_0 die maximale Bewegungsgeschwindigkeit in °/sec.	40
Abbildung 15: Maximale Muskelleistung $P_{\max}$ in W der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity), Mid-PHV (mid peak height velocity) und Post-PHV (post peak height velocity) inkl. der Standardabweichung.....	41

Abbildung 16: Maximale relative Muskelleistung $P_{\max}$ in W/kg der drei Testgruppen Pre-PHV (pre peak height velocity), Mid-PHV (mid peak height velocity) und Post-PHV (post peak height velocity) inkl. der Standardabweichung.	42
---	----

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kinematische Größen der Translation	6
Tabelle 2: Kinematische Größen der Rotation.....	7
Tabelle 3: Physikalische Größen der Dynamik.....	8
Tabelle 4: Deskriptive Statistik des Studienkollektivs	37
Tabelle 5: p-Werte der deskriptiven Statistik	58

11 Anhang

Tabelle 5: p-Werte der deskriptiven Statistik

p-Werte	Gesamt	Pre-Mid PHV	Mid-Post PHV	Pre-Post PHV
Alter [Jahre]	<0,001	0,098	0,070	<0,001
Größe [cm]	<0,001	0,085	0,092	<0,001
Gewicht [kg]	0,002	0,226	0,076	0,001
Alter bei PHV [Jahre]	0,649	/	/	/
Reifestand	<0,001	0,590	0,007	<0,001
Sportlich aktive Tage [Tage/Woche]	0,776	/	/	/

Erläuterung: bei den Variable bei denen im Gesamtkollektiv kein statistisch signifikanter Unterschied ($p < 0,05$) aufgetreten ist, gibt es demnach keine p-Werte für die einzelnen Subgruppen.