

---

**Velocity Based Training:  
Adaption der geschwindigkeitsbasierten  
Belastungssteuerung für das Widerstandstraining mit  
submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit**

---

Vom Fachbereich Sozialwissenschaften der  
Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau  
zur Verleihung des akademischen Grades  
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)  
genehmigte

**Dissertation**

vorgelegt von  
**Patrick Berndt**

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Michael Fröhlich  
Kommissionsvorsitzende: Prof. Dr. Mandy Schiefner-Rohs  
1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Michael Fröhlich  
2. Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Kemmler  
Tag der Disputation: 06.03.2024

D386

**März 2024**

**Dekan:**

Univ.-Prof. Dr. Michael Fröhlich

**Kommissionsvorsitz:**

Prof. Dr. Mandy Schiefner-Rohs

**Gutachter:**

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Michael Fröhlich
2. Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Kemmler

**Diskutanten:**

1. Diskutant: Prof. Dr. Christoph Eifler
2. Diskutant: Prof. Dr. Marcus Höreth

Tag der Einreichung: 20.12.2023

Tag der Disputation: 06.03.2024

---

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Kaiserslautern, den 20.12.2023

---

Patrick Berndt

---

## Danksagung

Rückblickend auf einen prägenden Lebensabschnitt gilt es einigen Personen meinen herzlichen Dank auszusprechen, ohne die mir das Beschreiten dieses Weges nicht möglich gewesen wäre.

Der erste und größte Dank gilt meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr. Michael Fröhlich. Das gesamte Promotionsprojekt wäre ohne ihn und seine Bereitschaft zur Betreuung nicht umsetzbar gewesen. Das dabei gewährte Vertrauen, der stetige Ansporn zur kritischen Reflexion, der inspirierende Austausch sowie das gezeigte Verständnis sind keinesfalls selbstverständlich, weshalb ich meine große Wertschätzung dafür ausdrücken möchte.

Ein weiteres großes Dankeschön gilt den Kolleginnen und Kollegen des Fachbereichs Trainings- und Bewegungswissenschaft der DHfPG sowie des Fachgebiets Bewegungs- und Trainingswissenschaften der RPTU Kaiserslautern-Landau. Meinen besonderen Dank möchte ich hierbei Dr. Joshua Berger, Dr. Stephan Becker und Dr. Carlo Dindorf ausdrücken. Danke für die großartige Unterstützung, die motivierenden Worte und die konstruktiven Diskussionen.

Mein nächster Dank richtet sich an Carolin Schmidt, die ihre Freizeit für die Suche nach Rechtschreibfehlern und falsch gesetzten Satzzeichen geopfert hat, sowie an Johannes Marx für die Erlaubnis, den Kraftraum der DHfPG im Rahmen der Datenerhebung nutzen zu dürfen.

Ein weiteres Dankeschön gilt allen Personen, die sich zur freiwilligen Teilnahme an der Untersuchung bereit erklärt haben. Vielen Dank für die Zeit, die Anstrengungen und die Unterstützung, ohne die die gewonnenen Erkenntnisse niemals zustande gekommen wären.

Herzlichen Dank an meine Familie und Freunde für die aufbauenden Gespräche sowie das Verständnis dafür, dass ich oftmals weniger Zeit für sie hatte, als mir lieb gewesen ist. Ein besonderer Dank gebührt meine Ehefrau für ihre bedingungslose Unterstützung und den Rückhalt bei der Verwirklichung meiner Ziele, weshalb diese Arbeit ihr gewidmet sein soll.

Gewidmet meiner Ehefrau Anika

---

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	I
Danksagung.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XIII
<b>1 EINLEITUNG IN DIE THEMATIK.....</b>	<b>1</b>
1.1 Legitimation des Forschungsdesiderats.....	2
1.2 Aufbau der Arbeit.....	12
<b>2 THEORETISCHER HINTERGRUND.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Anatomie, Physiologie und Adaptation der Skelettmuskulatur im Kontext des Widerstandstrainings.....</b>	<b>16</b>
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise der Skelettmuskulatur im Kontext der Krafterzeugung.....	17
2.1.2 Steigerung der Skelettmuskelmasse durch Widerstandstraining.....	24
2.1.3 Molekulare Anpassungsmechanismen der Skelettmuskelhypertrophie.....	28
2.1.4 Mediatoren zur Steigerung der Muskelproteinsynthese im Widerstandstraining.....	35
<b>2.2 Belastungssteuerung im Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse.....</b>	<b>43</b>
2.2.1 Methodik und Parameter der Belastungssteuerung im Widerstandstraining.....	45
2.2.2 Einfluss von Belastungsintensität und -dauer auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse.....	50
2.2.3 Einfluss der muskulären Ermüdung auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse.....	58
2.2.4 Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse.....	67
<b>2.3 Geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung im Widerstandstraining.....</b>	<b>73</b>
2.3.1 Geschwindigkeitsbasierte Steuerung der Belastungsintensität.....	78
2.3.2 Geschwindigkeitsbasierte Steuerung der Belastungsdauer und muskulären Ermüdung.....	83
<b>3 PROBLEMSTELLUNG, FORSCHUNGSFRAGEN UND HYPOTHESENBILDUNG.....</b>	<b>91</b>
<b>3.1 Problemstellung und übergeordnete Untersuchungsziele.....</b>	<b>92</b>
3.1.1 Szenario 1.....	95

---

3.1.2 Szenario 2 .....	97
3.1.3 Szenario 3 .....	98
3.1.4 Theoretischer Lösungsansatz .....	99
3.1.5 Zielsetzung .....	102
<b>3.2 Forschungsfragen .....</b>	<b>104</b>
3.2.1 Fragenkomplexe der Voruntersuchungen.....	104
3.2.2 Fragenkomplexe der Hauptuntersuchung.....	106
<b>3.3 Allgemeine Forschungshypothesen.....</b>	<b>108</b>
3.3.1 Allgemeine Forschungshypothesen der Voruntersuchungen .....	108
3.3.2 Allgemeine Forschungshypothesen der Hauptuntersuchung .....	110
<b>4 UNTERSUCHUNGSMETHODIK.....</b>	<b>111</b>
<b>4.1 Untersuchungsmethodik der Hauptuntersuchung.....</b>	<b>112</b>
4.1.1 Probandenstichprobe .....	115
4.1.2 Untersuchungsablauf.....	119
4.1.3 Statistische Datenanalyse.....	137
<b>4.2 Untersuchungsmethodik und Ergebnisse der Voruntersuchungen.....</b>	<b>144</b>
4.2.1 Voruntersuchung 1 – Messgenauigkeit des Vmaxpro Sensors beim Kreuzheben mit der Langhantel	145
4.2.2 Voruntersuchung 2 – Einfluss der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit auf den Hantelpfad beim Kreuzheben mit der Langhantel.....	155
4.2.3 Voruntersuchung 3 – Einfluss des Geschlechts auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit .....	162
4.2.4 Voruntersuchung 4 – Einfluss der volitionalen Bewegungsgeschwindigkeit, der Belastungsintensität, des Trainingszustandes und der Trainingsausrichtung auf die Minimum Velocity Threshold .....	171
4.2.5 Ergebniszusammenfassung und Schlussfolgerung aus den Voruntersuchungen .....	183
<b>5 ERGEBNISSE .....</b>	<b>185</b>
<b>5.1 Deskriptive Statistiken zur Hauptuntersuchung .....</b>	<b>186</b>
5.1.1 Daten der fitnessorientierten Stichprobe im detrainierten Zustand (FKT <sub>detrainiert</sub> ) .....	186
5.1.2 Daten der fitnessorientierten Stichprobe im trainierten Zustand (FKT <sub>trainiert</sub> ) .....	190
5.1.3 Daten der leistungsorientierten Stichprobe im trainierten Zustand (LKT <sub>trainiert</sub> ) .....	194
<b>5.2 Ergebnisse der Hauptuntersuchung zu Fragenkomplex 5 .....</b>	<b>198</b>
5.2.1 Inferenzstatistische Analyse für FKT <sub>detrainiert</sub> .....	198
5.2.2 Inferenzstatistische Analyse für FKT <sub>trainiert</sub> .....	201
5.2.3 Inferenzstatistische Analyse für LKT <sub>trainiert</sub> .....	203
<b>5.3 Ergebnisse der Hauptuntersuchung zu Fragenkomplex 6 .....</b>	<b>205</b>

---

---

5.3.1	Inferenzstatistische Analyse für FKT <sub>detrainiert</sub> vs. FKT <sub>trainiert</sub> .....	205
5.3.2	Inferenzstatistische Analyse für FKT <sub>trainiert</sub> vs. LKT <sub>trainiert</sub> .....	208
<b>5.4</b>	<b>Ergebnisse der Hauptuntersuchung zu Fragenkomplex 7 .....</b>	<b>212</b>
5.4.1	Inferenzstatistische Analyse für FKT <sub>detrainiert</sub> .....	213
5.4.2	Inferenzstatistische Analyse für FKT <sub>trainiert</sub> .....	218
5.4.3	Inferenzstatistische Analyse für LKT <sub>trainiert</sub> .....	223
<b>6</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>229</b>
6.1	Ergebniszusammenfassung .....	230
6.2	Ergebnisdiskussion .....	235
6.2.1	Interpretation der Untersuchungsergebnisse zu Fragenkomplex 5 .....	239
6.2.2	Interpretation der Untersuchungsergebnisse zu Fragenkomplex 6 .....	244
6.2.3	Interpretation der Untersuchungsergebnisse zu Fragenkomplex 7 .....	252
6.2.4	Ableitung von Zielkorridoren der RSVT zur Steuerung der muskulären Beanspruchung .....	256
6.2.5	Zusammenfassung des Erkenntnisgewinns und Einordnung in den aktuellen Kenntnisstand .....	263
6.3	Limitationen der Untersuchung .....	270
<b>7</b>	<b>FAZIT .....</b>	<b>277</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>287</b>
	<b>CURRICULUM VITAE.....</b>	<b>318</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>321</b>
	Anhang 1 – Anamnese VBTH1.....	321
	Anhang 2 – Anamnese VBTH2.....	322
	Anhang 3 – Anamnese VBTH3.....	323
	Anhang 4 – Anamnese VBTH4.....	324
	Anhang 5 – Einwilligungserklärung .....	325
	Anhang 6 – Datenschutzerklärung .....	326
	Anhang 7 – Teilnehmerinformation .....	328

---

---

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufbau der Skelettmuskulatur (modifiziert nach Fünten, Faude, Hecksteden et al., 2023, S. 95) .....	19
Abb. 2: Hypertrophie und Hyperplasie der Skelettmuskulatur (modifiziert nach Jorgenson et al., 2020).....	24
Abb. 3: Signaltransduktion über mTORC1-verwandte Signalwege zur Steigerung der MPS (Lim et al., 2022).....	30
Abb. 4: Genexpression durch Transkription und Translation (Brown & Clancy, 2008) .....	31
Abb. 5: Trainingsbereiche im Widerstandstraining (modifiziert nach Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 12–13).....	52
Abb. 6: Ebenenmodell der Trainingsbereiche im Widerstandstraining.....	57
Abb. 7: „(Integrative) Governor Fatigue Theory“ (Tornero-Aguilera et al., 2022) .....	58
Abb. 8: Zusammenhang zwischen der Verkürzungsgeschwindigkeit, der Anzahl aktiver Querbrücken und der Kontraktionskraft einer Muskelzelle nach Piazzesi et al. (2007) (modifiziert nach Alcazar et al., 2019) .	69
Abb. 9: Inertialsensoreinheit zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining .....	73
Abb. 10: Hyperbelförmige Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung bei isotonischen Kontraktionen isolierter Muskeln nach Hill (1938) (modifiziert nach Alcazar et al., 2019) .....	74
Abb. 11: Lineare Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung („force-velocity-relationship“) bei verschiedenen Test- und Ausführungsvarianten der Übung Langhantel-Bankdrücken (Cuevas-Aburto et al., 2018) .....	75
Abb. 12: Exemplarische Last-Geschwindigkeits-Beziehung („load-velocity-relationship“) einer Person bei der Übung Langhantel-Kniebeuge (modifiziert nach Weakley et al., 2021).....	80
Abb. 13: Zielgeschwindigkeiten und Trainingsbereiche (engl.: „velocity zones“) zur geschwindigkeitsbasierten Steuerung der Belastungsintensität (Mann & Kazadi, 2016, S. 34).....	82
Abb. 14: Exemplarische Darstellung der ermüdungsbedingten Reduktion der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit innerhalb eines Trainingssatzes bei einer spezifischen Übung.....	84
Abb. 15: Exemplarische Darstellung einer übungsspezifischen Velocity Loss Threshold (40 %) als Steuerungsparameter des Grades der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes .....	86
Abb. 16: Exemplarische Darstellung einer übungsspezifischen Minimum Velocity Threshold innerhalb eines maximal ermüdenden Trainingssatzes .....	87
Abb. 17: Zeitliche Abfolge der Teiluntersuchungen .....	113
Abb. 18: Untersuchungsdesign der Hauptuntersuchung .....	114
Abb. 19: Schematische Übersicht des Untersuchungsablaufs .....	120
Abb. 20: Kreuzheben mit der Langhantel – frontale Ansicht .....	124
Abb. 21: Kreuzheben mit der Langhantel – laterale Ansicht.....	124
Abb. 22: Bankdrücken mit der Langhantel – frontale Ansicht .....	127
Abb. 23: Bankdrücken mit der Langhantel – laterale Ansicht.....	127
Abb. 24: Enode Sensor (Nachfolgemodell des „Vmaxpro Sensor“; BM Sports Technology GmbH, 2022b) .....	135
Abb. 25: Befestigung der Inertialsensoreinheit an der Langhantel mithilfe eines gepolsterten Klettbandes (BM Sports Technology GmbH, 2022b) .....	135

---

Abb. 26: Qualisys Motion Capture System im Biomechaniklabor (Labor I) der RPTU Kaiserslautern-Landau (Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau [RPTU], 2023).....	146
Abb. 27: Bland-Altman-Plot zum Vergleich des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors bei $v_{sub}$ .....	151
Abb. 28: Bland-Altman-Plot zum Vergleich des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors bei $v_{max}$ .....	153
Abb. 29: Boxplots der mittleren Differenzen zwischen absolutem und vertikalem Hantelpfad bei $v_{max}$ und $v_{sub}$ vor Identifikation und Ausschluss der Ausreißer.....	157
Abb. 30: Boxplots der Mittelwerte des absoluten und vertikalen Hantelpfades bei $v_{max}$ und $v_{sub}$ .....	158
Abb. 31: Boxplots der mittleren Streckendifferenzen bei $v_{max}$ und $v_{sub}$ .....	159
Abb. 32: Boxplots der MVT für männliche und weibliche Probanden.....	166
Abb. 33: Boxplots der RSVT bei RIR3-1 für männliche und weibliche Probanden.....	168
Abb. 34: Boxplots für MVT <sub>1-RM</sub> , MVT <sub>vmax</sub> und MVT <sub>vsub</sub> in der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	176
Abb. 35: Boxplots für MVT <sub>1-RM</sub> , MVT <sub>vmax</sub> und MVT <sub>vsub</sub> in der Stichprobe FKT <sub>trainiert</sub> .....	177
Abb. 36: Boxplots für MVT <sub>1-RM</sub> , MVT <sub>vmax</sub> und MVT <sub>vsub</sub> in der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	178
Abb. 37: Boxplots für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> und RSVT <sub>RIR1</sub> in der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	188
Abb. 38: Boxplot der MVT in der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	188
Abb. 39: Boxplots für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> und RSVT <sub>RIR1</sub> in der Stichprobe FKT <sub>trainiert</sub> .....	192
Abb. 40: Boxplot der MVT in der Stichprobe FKT <sub>trainiert</sub> .....	192
Abb. 41: Boxplots für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> und RSVT <sub>RIR1</sub> in der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	196
Abb. 42: Boxplot der MVT in der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	196
Abb. 43: Verlauf der RSVT von RIR3 bis RIR1 in der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	200
Abb. 44: Verlauf der RSVT von RIR3 bis RIR1 in der Stichprobe FKT <sub>trainiert</sub> .....	202
Abb. 45: Verlauf der RSVT von RIR3 bis RIR1 in der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	204
Abb. 46: Vergleich der Verläufe der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) von RIR3 bis RIR1 zwischen den unterschiedlichen Trainingszuständen der Stichprobe FKT.....	207
Abb. 47: Vergleich der Verläufe der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) von RIR3 bis RIR1 zwischen den Stichproben FKT <sub>trainiert</sub> und LKT <sub>trainiert</sub> .....	211
Abb. 48: Streudiagramm der standardisierten Residuen der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	215
Abb. 49: Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) in der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	216
Abb. 50: Streudiagramm der standardisierten Residuen der Stichprobe FKT <sub>trainiert</sub> .....	220
Abb. 51: Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) in der Stichprobe FKT <sub>trainiert</sub> .....	221
Abb. 52: Streudiagramm der standardisierten Residuen der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	225
Abb. 53: Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) in der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	226
Abb. 54: RSVT [% MVT] bei RIR3, RIR2 und RIR1 in der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> (* = $p < 0,05$ ).....	239
Abb. 55: RSVT [% MVT] bei RIR3, RIR2 und RIR1 in der Stichprobe FKT <sub>trainiert</sub> (* = $p < 0,05$ ).....	241
Abb. 56: RSVT [% MVT] bei RIR3, RIR2 und RIR1 in der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> (* = $p < 0,05$ ).....	242
Abb. 57: Vergleich der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT in % MVT) bei RIR3, RIR2 und RIR1 zwischen den Stichproben FKT <sub>detrainiert</sub> und FKT <sub>trainiert</sub> .....	245

---

---

Abb. 58: Vergleich der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT in % MVT) bei RIR3, RIR2 und RIR1 zwischen den Stichproben FKT <sub>trainiert</sub> und LKT <sub>trainiert</sub> .....	245
Abb. 59: Vergleich der durchschnittlichen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (MV in m/s) bei RIR3, RIR2 und RIR1 zwischen den Stichproben FKT <sub>trainiert</sub> und LKT <sub>trainiert</sub> .....	247
Abb. 60: 95 %-Konfidenzintervalle für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> und RSVT <sub>RIR1</sub> inkl. Zielkorridor für FKT .....	258
Abb. 61: 95 %-Konfidenzintervalle für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> und RSVT <sub>RIR1</sub> inkl. Zielkorridor für LKT <sub>trainiert</sub> .....	260
Abb. 62: Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen zum MVT-basierten Steuerungsansatz .....	284

---

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Richtwerte zur Interpretation der Effektgröße bei Varianzanalysen (modifiziert nach Cohen, 1988; zitiert nach Schäfer, 2016, S. 235) .....	140
Tab. 2: Richtwerte zur Interpretation der Stärke des Zusammenhangs bei Assoziationsmaßen (modifiziert nach Fröhlich et al., 2020, S. 60) .....	142
Tab. 3: Deskriptive Statistik zur Probandenstichprobe der ersten Voruntersuchung .....	150
Tab. 4: Deskriptive Statistik zur MV des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors bei $v_{sub}$ .....	150
Tab. 5: Tests auf Normalverteilung der Differenzen der Messwerte bei $v_{sub}$ .....	151
Tab. 6: Deskriptive Statistik zur MV des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors bei $v_{max}$ .....	152
Tab. 7: Tests auf Normalverteilung der Differenzen der Messwerte bei $v_{max}$ .....	153
Tab. 8: Deskriptive Statistik zur Probandenstichprobe der zweiten Voruntersuchung .....	157
Tab. 9: Deskriptive Statistik zu den Mittelwerten des absoluten und vertikalen Hantelpfades bei $v_{max}$ und $v_{sub}$ .....	158
Tab. 10: Deskriptive Statistik zu den mittleren Streckendifferenzen bei $v_{max}$ und $v_{sub}$ .....	159
Tab. 11: Tests auf Normalverteilung der mittleren Streckendifferenzen zwischen absolutem und vertikalem Hantelpfad bei $v_{max}$ und $v_{sub}$ .....	160
Tab. 12: Ränge der Mittelwertsunterschiede der durchschnittlichen Streckendifferenzen bei $v_{max}$ und $v_{sub}$ .....	160
Tab. 13: Teststatistik des Wilcoxon-Tests für abhängige Stichproben .....	160
Tab. 14: Deskriptive Statistik zu den männlichen Probanden .....	164
Tab. 15: Deskriptive Statistik zu den weiblichen Probanden .....	164
Tab. 16: Deskriptive Statistik zu $RSVT_{RIR3-RIR1}$ und MVT der männlichen Probanden .....	165
Tab. 17: Deskriptive Statistik zu $RSVT_{RIR3-RIR1}$ und MVT der weiblichen Probanden .....	165
Tab. 18: Tests auf Normalverteilung der MVT bei männlichen und weiblichen Probanden .....	166
Tab. 19: t-Test (inkl. Levene-Test) zur Analyse genderspezifischer Unterschiede der MVT .....	167
Tab. 20: Tests auf Normalverteilung der RSVT bei RIR3-1 bei männlichen und weiblichen Probanden .....	167
Tab. 21: Mauchly-Test für RSVT bei RIR3-1 in der Gesamtstichprobe .....	168
Tab. 22: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede der RSVT zwischen RIR3, RIR2 und RIR1 in der Gesamtstichprobe .....	169
Tab. 23: Levene-Test auf Varianzhomogenität für $RSVT_{RIR3}$ , $RSVT_{RIR2}$ und $RSVT_{RIR1}$ .....	169
Tab. 24: RMANOVA zur Analyse der Zwischensubjekteffekte: Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden bei $RSVT_{RIR3}$ , $RSVT_{RIR2}$ und $RSVT_{RIR1}$ .....	170
Tab. 25: Deskriptive Statistik zur Probandenstichprobe $FKT_{detrainiert}$ .....	174
Tab. 26: Deskriptive Statistik zur Probandenstichprobe $FKT_{trainiert}$ .....	174
Tab. 27: Deskriptive Statistik zur Probandenstichprobe $LKT_{trainiert}$ .....	174
Tab. 28: Deskriptive Statistik zu $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ der Probandenstichprobe $FKT_{detrainiert}$ .....	175
Tab. 29: Deskriptive Statistik zu $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ der Probandenstichprobe $FKT_{trainiert}$ .....	175
Tab. 30: Deskriptive Statistik zu $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ der Probandenstichprobe $LKT_{trainiert}$ .....	175

---

Tab. 31: Tests auf Normalverteilung für $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ in der Stichprobe $FKT_{detrainiert}$ .....	176
Tab. 32: Tests auf Normalverteilung für $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ in der Stichprobe $FKT_{trainiert}$ .....	177
Tab. 33: Tests auf Normalverteilung für $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ in der Stichprobe $LKT_{trainiert}$ .....	177
Tab. 34: Mauchly-Test für $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ in den Stichproben $FKT_{detrainiert}$ und $FKT_{trainiert}$ .....	178
Tab. 35: Paarweise Vergleiche der RMANOVA für $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ der fitnessorientierten Stichprobe in verschiedenen Trainingszuständen ( $FKT_{detrainiert}$ und $FKT_{trainiert}$ ) .....	179
Tab. 36: Mauchly-Test für $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ in den Stichproben $FKT_{trainiert}$ und $LKT_{trainiert}$ .....	179
Tab. 37: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede zwischen $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ in den Stichproben $FKT_{trainiert}$ und $LKT_{trainiert}$ .....	180
Tab. 38: Paarweise Vergleiche der RMANOVA für $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ der fitness- und leistungsorientierten Stichproben im gleichen Trainingszustand ( $FKT_{trainiert}$ und $LKT_{trainiert}$ ).....	181
Tab. 39: Levene-Test auf Varianzhomogenität für $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ .....	181
Tab. 40: RMANOVA zur Analyse der Zwischensubjekteffekte: Unterschiede für $MVT_{1-RM}$ , $MVT_{vmax}$ und $MVT_{vsub}$ zwischen Stichproben mit unterschiedlichen Ausrichtungen des Trainings.....	182
Tab. 41: Deskriptive Statistik zur Stichprobe $FKT_{detrainiert}$ .....	186
Tab. 42: Deskriptive Statistik zu $v_{RIR3-RIR1}$ sowie zum X-RM-Test bei $v_{sub}$ der Stichprobe $FKT_{detrainiert}$ .....	187
Tab. 43: Deskriptive Statistik zu $RSVT_{RIR3-RIR1}$ und $MVT$ der Stichprobe $FKT_{detrainiert}$ .....	187
Tab. 44: Tests auf Normalverteilung für $RSVT_{RIR3}$ , $RSVT_{RIR2}$ und $RSVT_{RIR1}$ in der Stichprobe $FKT_{detrainiert}$ .....	189
Tab. 45: Test auf Normalverteilung der $MVT$ in der Stichprobe $FKT_{detrainiert}$ .....	189
Tab. 46: Deskriptive Statistik zur Stichprobe $FKT_{trainiert}$ .....	190
Tab. 47: Deskriptive Statistik zu $v_{RIR3-RIR1}$ sowie zum X-RM-Test bei $v_{sub}$ der Stichprobe $FKT_{trainiert}$ .....	191
Tab. 48: Deskriptive Statistik zu $RSVT_{RIR3-RIR1}$ und $MVT$ der Stichprobe $FKT_{trainiert}$ .....	191
Tab. 49: Tests auf Normalverteilung für $RSVT_{RIR3}$ , $RSVT_{RIR2}$ und $RSVT_{RIR1}$ in der Stichprobe $FKT_{trainiert}$ .....	193
Tab. 50: Test auf Normalverteilung der $MVT$ in der Stichprobe $FKT_{trainiert}$ .....	193
Tab. 51: Deskriptive Statistik zur Stichprobe $LKT_{trainiert}$ .....	194
Tab. 52: Deskriptive Statistik zu $v_{RIR3-RIR1}$ sowie zum X-RM-Test bei $v_{sub}$ der Stichprobe $LKT_{trainiert}$ .....	195
Tab. 53: Deskriptive Statistik zu $RSVT_{RIR3-RIR1}$ und $MVT$ der Stichprobe $LKT_{trainiert}$ .....	195
Tab. 54: Tests auf Normalverteilung für $RSVT_{RIR3}$ , $RSVT_{RIR2}$ und $RSVT_{RIR1}$ in der Stichprobe $LKT_{trainiert}$ .....	197
Tab. 55: Test auf Normalverteilung der $MVT$ in der Stichprobe $LKT_{trainiert}$ .....	197
Tab. 56: Mauchly-Test für $RSVT_{RIR3}$ , $RSVT_{RIR2}$ & $RSVT_{RIR1}$ in der Stichprobe $FKT_{detrainiert}$ .....	198
Tab. 57: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede zwischen $RSVT_{RIR3}$ , $RSVT_{RIR2}$ & $RSVT_{RIR1}$ in der Stichprobe $FKT_{detrainiert}$ .....	199
Tab. 58: Paarweise Vergleiche der RMANOVA für $RSVT_{RIR3}$ , $RSVT_{RIR2}$ & $RSVT_{RIR1}$ in der Stichprobe $FKT_{detrainiert}$ ...	199
Tab. 59: Mauchly-Test für $RSVT_{RIR3}$ , $RSVT_{RIR2}$ & $RSVT_{RIR1}$ in der Stichprobe $FKT_{trainiert}$ .....	201
Tab. 60: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede zwischen $RSVT_{RIR3}$ , $RSVT_{RIR2}$ & $RSVT_{RIR1}$ in der Stichprobe $FKT_{trainiert}$ .....	201
Tab. 61: Paarweise Vergleiche der RMANOVA für $RSVT_{RIR3}$ , $RSVT_{RIR2}$ & $RSVT_{RIR1}$ in der Stichprobe $FKT_{trainiert}$ .....	202
Tab. 62: Mauchly-Test für $RSVT_{RIR3}$ , $RSVT_{RIR2}$ & $RSVT_{RIR1}$ in der Stichprobe $LKT_{trainiert}$ .....	203

---

---

Tab. 63: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede zwischen RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> & RSVT <sub>RIR1</sub> in der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	203
Tab. 64: Paarweise Vergleiche der RMANOVA für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> & RSVT <sub>RIR1</sub> in der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	204
Tab. 65: Mauchly-Test für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> und RSVT <sub>RIR1</sub> beider Messzeitpunkte der Stichprobe FKT (FKT <sub>detrainiert</sub> und FKT <sub>trainiert</sub> ) .....	205
Tab. 66: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede zwischen den sechs Messzeitpunkten der RSVT (RSVT <sub>RIR3-1</sub> FKT <sub>detrainiert</sub> + RSVT <sub>RIR3-1</sub> FKT <sub>trainiert</sub> ) in der Stichprobe FKT .....	206
Tab. 67: Paarweise Vergleiche der RMANOVA zwischen den Stichproben FKT <sub>detrainiert</sub> und FKT <sub>trainiert</sub> bei RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> & RSVT <sub>RIR1</sub> .....	206
Tab. 68: Mauchly-Test für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> & RSVT <sub>RIR1</sub> in den Stichproben FKT <sub>trainiert</sub> und LKT <sub>trainiert</sub> .....	208
Tab. 69: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede zwischen RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> & RSVT <sub>RIR1</sub> in der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	209
Tab. 70: Levene-Test auf Varianzhomogenität für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> und RSVT <sub>RIR1</sub> .....	209
Tab. 71: RMANOVA zur Analyse der Zwischensubjekteffekte: Unterschiede zwischen fitness- und leistungsorientierten Probanden bei RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> & RSVT <sub>RIR1</sub> .....	210
Tab. 72: Pearson-Produkt-Moment-Korrelation zwischen RSVT und RIR der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	213
Tab. 73: Deskriptive Statistik der Residuen in der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	214
Tab. 74: Tests auf Normalverteilung der Residuen in der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	214
Tab. 75: Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) in der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	216
Tab. 76: Konfidenzintervalle für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> & RSVT <sub>RIR1</sub> in der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	217
Tab. 77: Pearson-Produkt-Moment-Korrelation zwischen RSVT und RIR der Stichprobe FKT <sub>trainiert</sub> .....	218
Tab. 78: Deskriptive Statistik der Residuen in der Stichprobe FKT <sub>trainiert</sub> .....	219
Tab. 79: Tests auf Normalverteilung der Residuen in der Stichprobe FKT <sub>trainiert</sub> .....	219
Tab. 80: Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) in der Stichprobe FKT <sub>trainiert</sub> .....	221
Tab. 81: Konfidenzintervalle für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> & RSVT <sub>RIR1</sub> in der Stichprobe FKT <sub>trainiert</sub> .....	222
Tab. 82: Pearson-Produkt-Moment-Korrelation zwischen RSVT und RIR der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	223
Tab. 83: Deskriptive Statistik der Residuen in der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	224
Tab. 84: Tests auf Normalverteilung der Residuen in der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	224
Tab. 85: Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) in der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	226
Tab. 86: Konfidenzintervalle für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> & RSVT <sub>RIR1</sub> in der Stichprobe LKT <sub>trainiert</sub> .....	227
Tab. 87: Mittelwerte für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> , RSVT <sub>RIR1</sub> & MVT in den Probandenstichproben FKT <sub>detrainiert</sub> , FKT <sub>trainiert</sub> & LKT <sub>trainiert</sub> .....	230
Tab. 88: Ergebniszusammenfassung für Fragenkomplex 5 (FKT <sub>detrainiert</sub> , FKT <sub>trainiert</sub> & LKT <sub>trainiert</sub> ) .....	231
Tab. 89: Ergebniszusammenfassung für Fragenkomplex 6 (FKT <sub>detrainiert</sub> vs. FKT <sub>trainiert</sub> ) .....	232
Tab. 90: Ergebniszusammenfassung für Fragenkomplex 6 (FKT <sub>trainiert</sub> vs. LKT <sub>trainiert</sub> ) .....	233
Tab. 91: Ergebniszusammenfassung für Fragenkomplex 7 (FKT <sub>detrainiert</sub> , FKT <sub>trainiert</sub> & LKT <sub>trainiert</sub> ) - Korrelation .....	233
Tab. 92: Ergebniszusammenfassung für Fragenkomplex 7 (FKT <sub>detrainiert</sub> , FKT <sub>trainiert</sub> & LKT <sub>trainiert</sub> ) - Regression .....	234
Tab. 93: Konfidenzintervalle der Mittelwerte für RSVT <sub>RIR3</sub> , RSVT <sub>RIR2</sub> und RSVT <sub>RIR1</sub> in der Stichprobe FKT <sub>detrainiert</sub> .....	257

---

---

Tab. 94: Konfidenzintervalle der Mittelwerte für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $FKT_{trainiert}$ .... 257

Tab. 95: Konfidenzintervalle der Mittelwerte für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$ .... 258

---

## Abkürzungsverzeichnis

1-RM	1-Repetition Maximum
ANOVA	Analysis of Variance
ATP	Adenosintriphosphat
AV	Abhängige Variable
CA <sup>2+</sup>	Calcium-Ion
DNA	Deoxyribonucleic Acid
ECC	Excitation-Contraction Coupling
ECCF	Excitation-Contraction Coupling Failure
EIMD	Exercise-induced Muscle Damage
FKT	Fitnessorientiertes Krafttraining
GABA	Gamma-Aminobutyric Acid
H <sup>+</sup>	Wasserstoff-Ion
IGF-1	Insulin-like Growth Factor 1
IMU	Inertial Measurement Unit
LKT	Leistungsorientiertes Krafttraining
LOA	Limits of Agreement
LPT	Linear Position Transducer
LVP	Load-Velocity Profile
MAPK/ERK	Mitogen-activated Protein Kinases/Extracellular-signal Regulated Kinases
MGF	Mechano Growth Factor
MPS	Muscle Protein Synthesis
MPV	Mean Propulsive Velocity
mRNA	Messenger Ribonucleic Acid
mTORC1	Mammalian Target of Rapamycin Complex 1
MV	Mean (Concentric) Velocity
MVT	Minimum Velocity Threshold
MVC	Maximum Voluntary Contraction
Na <sup>+</sup>	Natrium-Ion
<i>p</i>	Irrtums- bzw. $\alpha$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit

---

PI3K/PKB	Phosphoinositid-3-Kinases/Protein Kinase B
PGC-1 $\alpha$	Peroxisome proliferator-activated receptor- $\gamma$ coactivator-1 $\alpha$
PTEN	Phosphatase and Tensin Homolog
PTF	Proximity to Failure
PV	Peak Velocity
$r$	Korrelationskoeffizient
$R^2$	Determinationskoeffizient
RIR	Repetitions in Reserve
RMANOVA	Repeated Measures Analysis of Variance
RNA	Ribonucleic Acid
ROM	Range of Motion
ROS	Reactive Oxygen Species
RPE	Rating of Perceived Exertion
RSVT	Relative Stopping Velocity Threshold
TUT	Time Under Tension
UV	Unabhängige Variable
$v$	Geschwindigkeit
VBT	Velocity Based Training
VLT	Velocity Loss Threshold
X-RM	X-Repetition Maximum
ZNS	Zentrales Nervensystem
$\alpha$	Signifikanzniveau
$\eta^2$	Effektgröße Eta-Quadrat

Basiseinheiten des internationalen Einheitensystems sowie ihre Einheitenzeichen (z. B. kg, m, s etc.) werden als bekannt vorausgesetzt und daher nicht im Abkürzungsverzeichnis erwähnt.

---

I

EINLEITUNG IN DIE THEMATIK

---

## 1.1 Legitimation des Forschungsdesiderats

*„[...] Hältst du etwa diese Strafen der Körpervernachlässigung für gering und glaubst, solche Dinge mit Leichtigkeit ertragen zu können? Und doch, denke ich, weit leichter und angenehmer als dieses sei das, was der aushalten muß, welcher für das Wohlbefinden seines Körpers sorgt. Oder hältst du es für gesunder und zu andern Dingen nützlicher, einen schwächlichen als einen kräftigen Körper zu haben? Oder achtest du die aus einem kräftigen Körper entspringenden Folgen gering?“*

*„Es ist [...] eine Schande, aus eigener Vernachlässigung alt zu werden, ehe man sich in der vollen Schönheit und Kraft seines Körpers, deren er fähig ist, gesehen hat. Dieses kann man aber nicht sehen, wenn man sich körperlich vernachlässigt, denn von selbst pflegt es nicht zu kommen.“*

*Aus „Xenophon’s Erinnerungen an Sokrates“, Drittes Buch, Kapitel 12, Absätze 3 & 8*

*(Xenophon, übersetzt von Otto Güthling, 1883)*

Wie aus einer Übersetzung von Xenophons Erinnerungen an Sokrates (469 – 399 v. Chr.) entnommen werden kann, soll sich der griechische Philosoph bereits in der Antike für die Notwendigkeit des Trainings zur Optimierung der eigenen Gesundheit, Kraft und Ästhetik ausgesprochen haben, als er Epigenes seine Meinung über „die Wichtigkeit der körperlichen Übungen in Bezug auf Leib und Seele“ erläuterte (Xenophon & Güthling, 1883).

Auch annähernd 2500 Jahre nach Sokrates rät die Weltgesundheitsorganisation (World Health Organisation [WHO], 2020) in ihren aktuellen Aktivitätsempfehlungen erwachsenen Menschen, neben allgemeiner körperlicher Aktivität im Umfang von wöchentlich 150 bis 300 Minuten bei moderater Intensität oder 75 bis 150 Minuten bei höherer Intensität, mindestens zweimal pro Woche Aktivitäten zur Kräftigung der großen Muskelgruppen des Körpers durchzuführen, um den Gesundheits- und Funktionserhalt des Körpers zu unterstützen.

Zusätzlich zu dem breiten Spektrum gesundheitspositiver Effekte ist Krafttraining ein wirksames Mittel zur Verbesserung von Parametern der sportlichen Leistungsfähigkeit, wie beispielsweise der Maximalkraft, der Sprung- und Sprintleistung sowie der Geschwindigkeit bei Richtungswechseln (Liao et al., 2021). Die Effekte auf unterschiedliche Aspekte der Kraftleistung, zum Beispiel Maximalkraft, Schnellkraft und Kraftausdauer, können im Sinne des Spezifitätsprinzips je nach Höhe der gewählten Belastungsintensität und Bewegungsgeschwindigkeit in unterschiedlichem Ausmaß beeinflusst werden, was eine zielspezifische Belastungsgestaltung zur optimalen Realisierung verschiedener Trainingsziele erforderlich macht (Campos et al., 2002; Morris, Oliver, Pedley, Haff & Lloyd, 2022).

Da Krafttraining laut einer trainingswissenschaftlichen Definition von Schmidtbleicher (1992, S. 263) auf die Steigerung der Kraftfähigkeiten abzielt, ist die Verwendung dieses Begriffes für das Training zur Steigerung der Skelettmuskelmasse suboptimal. Aus diesem Grund werden sämtliche Formen des körperlichen Trainings mit externen Widerständen zur Verbesserung der Kraftfähigkeiten, zur Steigerung der Skelettmuskelmasse sowie zur Beeinflussung sonstiger sportmotorischer und biometrischer Parameter im weiteren Verlauf der vorliegenden Dissertation übergeordnet als „Widerstandstraining“ bezeichnet.

Widerstandstraining gilt, neben dessen Wirkung auf die Kraftleistung, als effektive Maßnahme zur Steigerung der Skelettmuskelmasse, wobei eine Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen dem wöchentlichen Trainingsvolumen und dem Ausmaß der Muskelhypertrophie zu bestehen scheint (Schoenfeld, Ogborn & Krieger, 2017; Schoenfeld, Contreras et al., 2019). Demgegenüber besitzen die Belastungsintensität (Carvalho et al., 2022) sowie die Belastungshäufigkeit (Schoenfeld, Grgic & Krieger, 2019) bei gleichem wöchentlichen Trainingsvolumen keinen feststellbaren Einfluss auf das Ausmaß der Steigerung der Skelettmuskelmasse, sofern jeder Trainingssatz zumindest bis in die Nähe der muskulären Ausbelastung ausgeführt wird (Refalo, Helms, Trexler, Hamilton & Fyfe, 2023) und eine ausreichende Proteinversorgung gewährleistet ist (Morton et al., 2018).

Darüber hinaus kann Widerstandstraining als präventives Mittel zur Vermeidung von Verletzungen bei intensiven körperlichen Belastungen (Lauersen, Andersen & Andersen, 2018) sowie zur Verbesserung der Beweglichkeit eingesetzt werden, insbesondere wenn dabei exzentrische Belastungen akzentuiert und möglichst große Bewegungsumfänge in den beanspruchten Muskel-Gelenk-Systemen realisiert werden (Alizadeh et al., 2023).

Die zuvor vorgestellten Effekte untermauern den multiperspektivischen Nutzen von Widerstandstraining zum Erhalt der Gesundheit, zur Prävention von Verletzungen, zur Verbesserung der Beweglichkeit, zum Aufbau von Skelettmuskelmasse sowie zur Steigerung der allgemeinen körperlichen und sportlichen Leistungsfähigkeit.

Dass besagter Nutzen innerhalb der deutschen Bevölkerung wahrgenommen wird, belegen Daten zu Anzahl von und Mitgliederzahlen in Fitness- und Gesundheitseinrichtungen aus dem Jahr 2019, also dem Jahr, bevor der Besuch von Sport-, Fitness- und Gesundheitsanlagen aufgrund der Auswirkungen der COVID-19-Pandemie bzw. der dadurch erforderlichen Einschränkungen des öffentlichen Lebens zeitweise nicht möglich war. Aus der Erhebung der Eckdaten der deutschen Fitness-Wirtschaft des Arbeitgeberverbandes deutscher Fitness- und Gesundheitsanlagen (DSSV, Deloitte & DHfPG, 2020) geht hervor, dass im Jahr 2019 in Deutschland insgesamt ca. 11,66 Millionen Menschen in 9669 kommerziellen Trainingseinrichtungen angemeldet waren. Durch eine erneute Erhebung dieser Daten für das Jahr 2022 konnte bestätigt werden, dass auch nach der COVID-19-Pandemie trotz der pandemiebedingten Kündigung vieler Mitgliedschaften in Fitness- und Gesundheitsanlagen noch immer ca. 10,3 Millionen Menschen in insgesamt 9149 Trainingseinrichtungen körperlich aktiv waren, wobei die Mitgliederentwicklung eine steigende Tendenz im Vergleich zum Vorjahr aufweist (DSSV, Deloitte & DHfPG, 2023).

Die Bereitschaft, finanzielle Mittel für die Nutzung der Angebote von Fitness- und Gesundheitsanlagen, wie beispielsweise das Widerstandstraining an geführten Maschinen oder freien Gewichten zu investieren, kann als Indikator dafür angesehen werden, welche Bedeutung dem körperlichen Training zur Erreichung der individuellen gesundheitlichen, ästhetischen oder sportlichen Ziele in der Bevölkerung beigemessen wird. Bei einer Befragung von insgesamt 262 Fitness- und Gesundheitssportlern zur Angebotsnutzung in ihren jeweiligen Trainingseinrichtungen gaben 73 Prozent der befragten Personen im Alter zwischen 16 und 44 Jahren an, im Rahmen ihrer Mitgliedschaft Widerstandstraining an geführten Maschinen durchzuführen, während 41 Prozent mit freien Gewichten trainieren (Appinio, 2019).

Ein Transfer der aus dieser Befragung erhobenen Relativwerte zur Nutzung der Trainingsangebote auf die zuvor dargestellten Mitgliederzahlen in deutschen Fitness- und Gesundheitsanlagen veranschaulicht die Wichtigkeit trainingswissenschaftlicher Forschung für die Ableitung anwendungsorientierter Handlungsempfehlungen zur zielspezifischen

Belastungssteuerung im Kraft- respektive Widerstandstraining sowie für die Entwicklung neuer Steuerungsansätze und Trainingsmethoden zur optimalen Zielerreichung.

In einer weiteren Umfrage waren die Erreichung der persönlichen optisch-ästhetischen Ideale, die Steigerung des Kraftpotenzials durch Vergrößerung der Muskelmasse sowie die Verbesserung der Gesundheit die meistgenannte Gründe für den Besuch von Fitness- und Gesundheitsstudios (Statista, 2016). Daraus lässt sich ein spezifischer Bedarf zur Weiterentwicklung bestehender Ansätze und Methoden zur Trainingssteuerung ableiten, der insbesondere für das Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse sowie das gesundheitsorientierte Training gilt.

Neben der individualisierten Anwendung aktueller Erkenntnisse zur Trainingssteuerung sind für das moderne Kraft- und Fitnesstraining auch die Entwicklung, Erforschung und Anwendung neuer technischer Möglichkeiten von zunehmender Bedeutung. Die Implementierung aufkommender Technologien, wie beispielsweise sogenannter Fitness Wearables, stellt Trainer und Sportler zwar vor die Herausforderung, diese Werkzeuge und Methoden sinnvoll in die Trainingssteuerung zu integrieren, ermöglicht jedoch in den meisten Fällen eine exaktere Belastungssteuerung oder ein umfassenderes Monitoring von Regenerations- und Leistungsparametern (Pizzo, Baker, Jones & Funk, 2021). Solche technischen Hilfsmittel basieren in der Regel auf kompakten Sensorsystemen, welche entweder am Körper getragen oder am Trainingsgerät befestigt werden, um relevante gesundheits- oder leistungsbezogene Parameter erfassen, verarbeiten und an andere Geräte übermitteln zu können. Fitness Wearables sowie andere sensorbasierte Hilfsmittel werden im Kontext des sportlichen Trainings nicht nur zur Testung des aktuellen Leistungsstandes oder zur Überprüfung der Leistungsentwicklung verwendet, sondern auch zur Erfassung des Gesundheits- und Regenerationsstatus, zum Monitoring der Trainingsbelastung und der individuellen Beanspruchung innerhalb einer Trainingseinheit sowie zur automatisierten Erfassung von Bewegungen (Passos et al., 2021).

Dass der Einfluss solcher tragbaren Sensorsysteme in Training und Sport stetig zunimmt, wird durch einen Blick auf die weltweiten Fitnesstrends der letzten Jahre deutlich. Laut einer Umfrage des American College of Sports Medicine (ACSM) wurden „Wearable Technologies“ im Jahr 2021 auf Platz zwei der weltweiten Fitnesstrends gewählt (Thompson, 2021). In den darauffolgenden Jahren 2022 und 2023 wurden diese tragbaren Sensorsysteme zur Erfassung

von trainings- und gesundheitsbezogenen Daten sogar zweimal in Folge zur Nummer eins der weltweiten Fitnesstrends erklärt (Thompson, 2022, 2023).

Eine spezielle Kategorie dieser tragbaren Sensorsysteme verwendet sogenannte Inertialsensoreinheiten (alt.: inertielle Messeinheit; engl.: "inertial measurement unit" [IMU]) zur Erfassung von Translations- und Rotationsbeschleunigungen im mehrdimensionalen Raum (Robert Bosch GmbH, 2023). Eine systematische Übersichtsarbeit über die Verwendung von tragbaren Inertialsensoreinheiten (Camomilla, Bergamini, Fantozzi & Vannozzi, 2018) konnte aufzeigen, dass solche Geräte im Sport insbesondere zur Erfassung sportlicher bzw. körperlicher Leistungsfähigkeit, körperlicher Aktivität und sportmotorischer Anforderungen sowie zur Analyse der Bewegungsqualität im Leistungs- und Hochleistungssport angewendet werden. Im Kontext des Widerstandstrainings werden diese Geräte primär dazu verwendet, um die Bewegungstrajektorie und -geschwindigkeit von freien Gewichten, wie beispielsweise Langhanteln, zu erfassen, wodurch unter anderem das Monitoring der Bewegungstechnik sowie die geschwindigkeitsbasierte Steuerung der Belastungsintensität und -dauer ermöglicht wird (Weakley et al., 2021). Die überwiegende Mehrheit der auf dem Markt verfügbaren Inertialsensorsysteme zur Erfassung der Hantelgeschwindigkeit gelten dabei als valide und reliabel (Clemente, Akyildiz, Pino-Ortega & Rico-González, 2021).

Im Kontext des Widerstandstrainings hat die Nutzung dieser Sensortechnologie zur Geschwindigkeitsmessung dazu geführt, dass sich ein neuer Ansatz der Belastungssteuerung etabliert hat, der als „Velocity Based Training“ (übersetzt: „geschwindigkeitsbasiertes Training“) bezeichnet wird. Im Gegensatz zum traditionellen, lastbasierten Ansatz, bei dem die Belastungsintensität über die Höhe der Last und die Belastungsdauer über die Anzahl der Wiederholungen gesteuert wird, verwendet der geschwindigkeitsbasierte Ansatz der Belastungssteuerung die Geschwindigkeit der bewegten Last bzw. das Ausmaß des Geschwindigkeitsverlustes über mehrere Wiederholungen innerhalb eines Trainingssatzes als zentrale Steuergröße (Weakley et al., 2021).

Diesem Steuerungsansatz im Widerstandstraining liegt das Newton'sche Kraftgesetz bzw. das Aktionsprinzip zugrunde, welches besagt, dass die Kraft (engl. „Force“ [F]) dem Produkt aus der Masse (engl. „mass“ [m]) und der Beschleunigung (engl. „acceleration“ [a]) entspricht (Joachim Herz Stiftung, 2023). Da in der Mechanik die Kraft als Ursache für die Geschwindigkeitsänderung eines Körpers gilt, bedeutet dies, dass ein Körper (z. B. eine Langhantel) umso stärker beschleunigt wird, je größer die Kraft ist, die auf ihn einwirkt

(Feuerlein, Näpfel & Schäflein, 1998, S. 97). Überträgt man dieses Wissen auf eine Person, die Widerstandstraining mit einer Langhantel betreibt, so ergibt sich daraus, dass diese Person eine bestimmte Last auf der Hantel bei Entfaltung ihrer maximal möglichen Kraftleistung nur in einem bestimmten Ausmaß beschleunigen kann. Aus diesem Umstand folgt, dass eine Bewegung mit maximalem Krafteinsatz in Abhängigkeit zur Höhe der Hantellast mit einer bestimmten Geschwindigkeit (engl. „velocity“ [v]) ausgeführt werden kann. Misst man diese Bewegungsgeschwindigkeit mithilfe eines dafür geeigneten Inertialsensorsystems, kann die erfasste Geschwindigkeit basierend auf dem Newtonschen Kraftgesetz als Indikator für die Höhe der Kraftleistung und somit als geeigneter Parameter zur Steuerung der Belastungsintensität angesehen werden. Dieser Zusammenhang zwischen der Bewegungsgeschwindigkeit und der Höhe der Last wurde bereits in trainingswissenschaftlichen Untersuchungen bestätigt und kann daher als geeignetes Steuerungsinstrument für das Widerstandstraining angesehen werden, sofern man sich im Training mit volitional maximaler Geschwindigkeit bzw. mit maximalem Krafteinsatz bewegt (Trybulski et al., 2022; Weakley et al., 2021, S. 35–37).

Da das neuromuskuläre System bei wiederholter Ausführung dieser maximalen Krafteinsätze innerhalb eines Trainingssatzes jedoch Ermüdungseffekten unterliegt, nimmt die Höhe der realisierbaren Kräfte von Wiederholung zu Wiederholung ab, wodurch die Hantel sukzessive weniger stark beschleunigt werden kann. Dies äußert sich in einer fortschreitenden Reduktion der Bewegungsgeschwindigkeit, was schlussendlich dazu führt, dass die Hantellast nicht mehr ausreichend beschleunigt werden kann, um die Erdanziehungskraft (Gravitation) zu überwinden. Der Geschwindigkeitsverlust innerhalb eines Trainingssatzes kann demnach zur objektiven Quantifizierung der neuromuskulären Ermüdung im Widerstandstraining angesehen werden, sofern man bei jeder Wiederholung mit maximalem Krafteinsatz gegen die Last arbeitet (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Demzufolge kann die Vorgabe eines bestimmten Geschwindigkeitsverlustes dazu verwendet werden, um die Belastungsdauer im Widerstandstraining über das Ausmaß der akuten Ermüdung zu steuern (Jukic, Castilla et al., 2023; Weakley et al., 2021, S. 37–38). Die Vorgabe des Geschwindigkeitsverlustes zielt darauf ab, eine vollständige muskuläre Ermüdung bis zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens zu vermeiden.

Laut einer Metaanalyse von Grgic, Schoenfeld, Orazem und Sabol (2022) erzeugt ein Widerstandstraining ohne vollständige muskuläre Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes

---

die gleichen Effekte hinsichtlich der Steigerung der Skelettmuskelmasse und Maximalkraftleistung wie ein Training bis zur vollständigen muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes. Da die vollständige muskuläre Ermüdung innerhalb der Trainingssätze laut einer Metaanalyse von Viera et al. (2022) zu einer stärkeren akuten Ermüdung sowie einem erhöhten Regenerationsbedarf infolge der Trainingseinheit führen kann, sollte im Widerstandstraining eine muskuläre Ausbelastung vermieden werden, um langfristig optimale Trainingseffekte hinsichtlich Kraftsteigerung und Muskelaufbau bei gleichzeitiger Limitierung des Regenerationsbedarfs zu erreichen. Trotz der Empfehlung zur Vermeidung einer vollständigen muskulären Ausbelastung gilt eine ausreichende Annäherung an den Punkt des momentanen Muskelversagens innerhalb eines Trainingssatzes jedoch als essenziell, um Hypertrophieeffekte zu optimieren (Refalo et al., 2023).

Die geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung bietet dahingehend einen enormen Vorteil gegenüber der last- und wiederholungsbasierten Belastungssteuerung, da bei starrer Vorgabe von Lasthöhe und Wiederholungsanzahl die Möglichkeit besteht, dass tagesformabhängige Schwankungen der Kraftleistung (Knaier et al., 2019) zu einer unbeabsichtigten Unter- oder Überforderung im Widerstandstraining führen. Beim geschwindigkeitsbasierten Ansatz wäre eine tagesformabhängige Abweichung der Kraftleistung einerseits bereits zu Beginn eines Trainingssatzes über das Monitoring der realisierten Bewegungsgeschwindigkeiten gegen die gewählte Hantellast erkennbar und andererseits würde sich die Belastungsdauer durch die Vorgabe eines prozentualen Geschwindigkeitsverlustes automatisch verlängern oder verkürzen, um die gewünschte muskuläre Beanspruchung zu erreichen.

Die dargestellten Vorteile müssen jedoch unter Vorbehalt betrachtet werden. Den bisher dargestellten Ausführungen zur geschwindigkeitsbasierten Steuerung der Belastungsintensität und -dauer lässt sich entnehmen, dass es bei der Anwendung dieses Steuerungsansatzes erforderlich ist, sich bei jeder einzelnen Wiederholung jedes Trainingssatzes bei jeder Übung mit maximalem Krafteinsatz gegen die Hantellast zu bewegen, da andernfalls die gemessenen Bewegungsgeschwindigkeiten beeinflusst werden (Trybulski et al., 2022).

Sobald sich Personen im Widerstandstraining nicht mit maximalem, sondern submaximalem Krafteinsatz bzw. mit submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit gegen die Hantellast bewegen, sind die verfügbaren Referenzwerte und Handlungsempfehlungen zur Steuerung der Belastungsintensität und -dauer nicht mehr uneingeschränkt anwendbar, was den Nutzen dieses Steuerungsansatzes, insbesondere im Widerstandstraining zur Steigerung der

Skelettmuskelmasse, in empfindlichem Maße schmälert. Untersuchungen zur Validität der Verwendung von Geschwindigkeitsverlusten während des Widerstandstrainings zur Überprüfung der muskulären Ermüdung kamen sowohl für eingelenkige als auch mehrgelenkige Bewegungen zu dem Schluss, dass der festgestellte Geschwindigkeitsverlust die tatsächliche muskuläre Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes nicht adäquat abbilden kann, wenn sich die Trainierenden mit submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit gegen die verwendete Last bewegen (Zhao, Nishioka & Okada, 2022; Zhao, Seo & Okada, 2023). Die Anwendung der aktuell verfügbaren Referenzwerte und Handlungsempfehlungen, welche auf der volitional maximalen Krafterzeugung respektive Bewegungsgeschwindigkeit gegen einen Widerstand beruhen, könnten demzufolge bei einem Training mit volitional submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten zur ungewollten Überlastung des neuromuskulären Systems führen und dadurch unerwünschte Auswirkungen hervorrufen.

Die im aktuellen Ansatz der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung inkludierte Notwendigkeit, sich im Widerstandstraining grundsätzlich und unabhängig von der verwendeten Trainingslast, der individuellen Trainingserfahrung sowie dem Trainingsziel mit maximaler Bewegungsgeschwindigkeit zu bewegen, muss aus trainingswissenschaftlicher Sicht kritisch hinterfragt werden. Im Kontext des Widerstandstrainings zur Steigerung der Skelettmuskelmasse sind die mechanische Spannung in der Zielmuskulatur sowie das wöchentliche Trainingsvolumen als wichtige Einflussgrößen auf die zu erwartenden Hypertrophieeffekte bekannt (Schoenfeld, Ogborn & Krieger, 2017; Schoenfeld, Contreras et al., 2019). Im Widerspruch dazu führen maximale Bewegungsgeschwindigkeiten laut mehreren Studien allerdings zu einer Reduktion der muskulären Spannungsdauer (engl.: „time under tension“ [TUT]) sowie zu einem verringerten Trainingsvolumen, was gegenüber submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten negative Auswirkungen auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse haben könnte (Trybulski et al., 2022; Wilk et al., 2018; Wilk, Tufano & Zajac, 2020).

Darüber hinaus sollte insbesondere bei Personen mit geringer Trainingserfahrung sowie im Widerstandstraining mit gesundheitsorientierter Zielsetzung beachtet werden, dass sich maximale Bewegungsgeschwindigkeiten möglicherweise negativ auf die Bewegungstechnik und -ökonomie sowie das Verletzungsrisiko auswirken können. Einer Studie von Koźlenia und Domaradzki (2021) zufolge vergrößert eine niedrige Qualität der Bewegungsmuster bei körperlicher Aktivität das Verletzungsrisiko. Aus diesem Grund empfehlen Bennett, Arnold und

Davison (2021) die Bewegungsqualität in jeder Trainingseinheit in den Vordergrund des Trainings zu stellen, da dies das Potenzial zur positiven Beeinflussung der Sicherheit und Effektivität des Trainings birgt und gleichzeitig die körperliche Leistungsfähigkeit verbessert. Vor dem Hintergrund, dass maximale Bewegungsgeschwindigkeiten sowohl für das Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse als auch für Personen mit geringer Trainingserfahrung oder gesundheitsorientierter Trainingsausrichtung als suboptimal angesehen werden können, ist der aktuell bestehende Ansatz zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Krafttraining für die beschriebenen Anwendungsgebiete als inadäquat zu bewerten. Die geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung bietet hinsichtlich der autoregulativen Anpassung an tagesformabhängige Schwankungen der Leistungsfähigkeit sowie im Hinblick auf die Möglichkeit zur objektiven Steuerung der muskulären Ermüdung allerdings deutliche Vorteile gegenüber lastbasierten Steuerungsansätzen. Daher erscheint es aus trainingswissenschaftlicher sowie anwendungsorientierter Sicht wünschenswert, sich mit der Adaption und Weiterentwicklung des geschwindigkeitsbasierten Steuerungsansatzes sowie der Ableitung entsprechender Handlungsempfehlungen für die Trainingspraxis zu befassen.

Einen möglichen Ausgangspunkt für eine alternative Herangehensweise zur Steuerung der Belastungsdauer über das Ausmaß der muskulären Ermüdung stellt die sogenannte „Minimum Velocity Threshold“ (MVT) dar (alt.:  $v_{1-RM}$ ). Die MVT kennzeichnet die Geschwindigkeit in der konzentrischen Phase der letzten vollständig ausführbaren Wiederholung eines maximal ausbelastenden Trainingssatzes vor dem Erreichen des Punktes des momentanen konzentrischen Muskelversagens (Caven et al., 2020; Fernandes et al., 2021; Weakley et al., 2021).

Die individuelle MVT ist zwar abhängig von der spezifischen Bewegung bzw. Übung sowie von der Trainingserfahrung, jedoch innerhalb der gleichen Übung als unabhängig von der Höhe der verwendeten Belastungsintensität bzw. Trainingslast zu betrachten (Izquierdo et al., 2006; Sánchez-Medina, González-Badillo, Pérez & Pallarés, 2014; Zourdos et al., 2016). Die Steuerung der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes könnte demzufolge statt über das Ausmaß der relativen Reduktion der Bewegungsgeschwindigkeit theoretisch auch über die Annäherung der gemessenen Bewegungsgeschwindigkeiten an die MVT gesteuert werden, da die MVT als die Geschwindigkeit der letzten ausführbaren Wiederholung den absoluten Endpunkt der Geschwindigkeitsreduktion darstellt.

Bei der Steuerung der muskulären Ermüdung auf Basis der relativen Geschwindigkeitsreduktion bezieht sich die Zielvorgabe des prozentualen Geschwindigkeitsverlustes innerhalb des Trainingssatzes immer auf die volitional maximale Bewegungsgeschwindigkeit, die mit einem bestimmten Gewicht realisierbar ist. Die Realisierung maximaler Bewegungsgeschwindigkeiten stellt hierbei also die Basis zur Steuerung der muskulären Ermüdung dar, weshalb dieser Ansatz nicht auf das Widerstandstraining mit volitional submaximalen Geschwindigkeiten übertragen werden kann. Im Gegensatz dazu wäre die Steuerung der muskulären Ermüdung auf Basis der MVT unabhängig davon, dass bei jeder Wiederholung innerhalb des Trainingssatzes maximale Krafteinsätze bzw. volitional maximale Bewegungsgeschwindigkeiten realisiert werden müssen.

Die MVT besitzt dadurch ein vielversprechendes Potenzial, um als Ausgangspunkt zur Entwicklung eines alternativen Ansatzes zur geschwindigkeitsbasierten Steuerung der muskulären Ermüdung im Widerstandstraining zu fungieren, der sowohl unabhängig von der verwendeten Trainingslast als auch von der Erzeugung volitional maximaler Bewegungsgeschwindigkeit wäre und trotzdem eine objektive Steuerung der muskulären Ermüdung ermöglichen würde.

Die dargestellten Überlegungen zur MVT bilden die theoretische Grundlage zur Formulierung der folgenden übergeordneten Forschungsfrage innerhalb dieser Untersuchung:

*Eignet sich die Minimum Velocity Threshold (MVT) als Ausgangspunkt zur Entwicklung eines adaptierten Ansatzes der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining, bei dem der Grad der muskulären Ermüdung über die Belastungsdauer unabhängig von der volitional maximalen Bewegungsgeschwindigkeit gesteuert werden kann?*

Aus den dargelegten Gründen verfolgt die vorliegende Dissertation das Ziel, eine adaptierte Variante des geschwindigkeitsbasierten Ansatzes zur Belastungssteuerung im Widerstandstraining zu untersuchen, welche die personen- und übungsspezifische MVT als Ausgangspunkt zur autoregulativen Steuerung der Belastungsdauer verwendet, um zu evaluieren, ob dadurch die objektive Steuerung der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes unabhängig von der volitional maximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit ermöglicht werden kann.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende monografische Dissertation gliedert sich zur adäquaten Behandlung des im Titel genannten Forschungsthemas in zwei übergeordnete Teile.

Im ersten Teil der Arbeit erfolgt die Darstellung der physiologischen und trainingstheoretischen Grundlagen der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining (Kapitel 2) sowie die Identifikation der Problemstellung inklusive der zugehörigen Ableitung von Forschungshypothesen (Kapitel 3).

Da sich die im Hauptteil der Arbeit dargestellte Untersuchung (ab Kapitel 4) auf die geschwindigkeitsbasierte Steuerung der Belastungsdauer im Widerstandstraining mit volitional submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten und submaximalen Belastungsintensitäten bezieht, was aus anwendungsorientierter sowie trainingswissenschaftlicher Sicht insbesondere für das Training zur Steigerung der Skelettmuskelmasse relevant ist, liegt der Fokus der in Kapitel 2 thematisierten Anpassungsprozesse auf der Skelettmuskelhypertrophie. Auf die Verbesserung der neuromuskulären Koordination wird aufgrund der geringen Relevanz im Widerstandstraining mit volitional submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten und submaximalen Belastungsintensitäten an dieser Stelle nicht im Detail eingegangen. Dazu werden zunächst die physiologischen Grundlagen von hypertrophieassoziierten Anpassungseffekten im Widerstandstraining thematisiert, wobei hauptsächlich auf die zellulären und molekularen Mechanismen der Anpassungsprozesse sowie auf die primären Mediatoren zur Auslösung dieser Prozesse eingegangen wird (Kapitel 2.1).

Aufbauend darauf werden die Belastungsparameter im Widerstandstraining – unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Belastungsintensität und -dauer, der muskulären Ermüdung sowie der Bewegungsgeschwindigkeit auf die erläuterten Anpassungsprozesse – dargestellt (Kapitel 2.2). Die Hervorhebung dieser Parameter sowie ihrer Relevanz im Kontext der Anpassungsprozesse dient als Verständnisgrundlage für die Herleitung des geschwindigkeitsbasierten Steuerungsansatzes im Widerstandstraining. Die anschließenden Inhalte widmen sich den trainingstheoretischen Grundlagen der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining sowie ihrer praktischen Anwendung. Dabei sollen insbesondere die Vorteile gegenüber der lastbasierten Belastungssteuerung hervorgehoben werden, um die Relevanz dieses Ansatzes gegenüber der last- und wiederholungsbasierten Belastungssteuerung zu verdeutlichen (Kapitel 2.3).

Als Abschluss des ersten Teils werden die theoretischen Überlegungen zur Bedeutung der Bewegungsgeschwindigkeit sowie der muskulären Ermüdung und die Erläuterungen zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung in einem gemeinsamen Kontext betrachtet. Dazu werden die zentralen Aussagen des theoretischen Hintergrundes zusammengefasst. Dies verfolgt den Zweck, jene Problemstellungen zu identifizieren, die sowohl aus trainingswissenschaftlicher als auch aus anwendungspraktischer Sicht relevant sind (Kapitel 3.1) und daraus herleitend Forschungsfragen zu formulieren (Kapitel 3.2), auf deren Basis abschließend die Hypothesen dieser Untersuchung abgeleitet werden (Kapitel 3.3).

Der zweite Teil, der gleichzeitig den Hauptteil dieser Dissertation darstellt, widmet sich der empirischen Untersuchung zur Adaption der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining mit submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit.

Da sich die zur Untersuchung des Forschungsthemas verwendete methodische Vorgehensweise aus einer Hauptuntersuchung und mehreren Voruntersuchungen zusammensetzt, befasst sich das Kapitel zur Untersuchungsmethodik in einem ersten Abschnitt mit der allgemeinen methodischen Vorgehensweise sowie der Aufteilung der Forschungsfragen auf die Haupt- und Voruntersuchungen (Kapitel 4). Um die methodische Vorgehensweise bei der Hauptuntersuchung umfassend und transparent nachvollziehbar abzubilden, werden an dieser Stelle neben der Probandenstichprobe auch Untersuchungsdesign und -ablauf, Messmethoden und -instrumente sowie die statistische Datenanalyse der Hauptuntersuchung thematisiert (Kapitel 4.1). Die Darstellung der methodischen Vorgehensweise und Ergebnisse der Voruntersuchungen (Validität und Reliabilität des Messinstrumentes; Bewegungsökonomie, MVT-Werte und geschlechtsspezifische Unterschiede) sowie die daraus resultierenden Konsequenzen für die Hauptuntersuchung sind Gegenstand der nachfolgenden Darstellungen (Kapitel 4.2).

Im Anschluss an die Methodik erfolgt eine umfassende Darstellung der Untersuchungsergebnisse (Kapitel 5). Danach werden die zuvor dargestellten Ergebnisse im Kontext der zugrundeliegenden Forschungsfragen und Hypothesenkomplexe diskutiert sowie die eigene methodische Vorgehensweise kritisch reflektiert und anwendungsorientierte Handlungsempfehlungen abgeleitet (Kapitel 6), bevor ein abschließendes Fazit zur durchgeführten Untersuchung und den daraus gewonnenen Erkenntnissen formuliert wird (Kapitel 7).



---

II

PHYSIOLOGISCHE UND TRAININGSTHEORETISCHE  
HINTERGRÜNDE ZUR GESCHWINDIGKEITSBASIERTEN  
BELASTUNGSSTEUERUNG IM WIDERSTANDSTRAINING

---

## 2.1 Anatomie, Physiologie und Adaptation der Skelettmuskulatur im Kontext des Widerstandstrainings

Die in Kapitel 1.1 erwähnten Anpassungseffekte durch Widerstandstraining sowie deren positiver Einfluss auf die Gesundheit und Leistungsfähigkeit beruhen in erster Linie auf einer Verbesserung der Kraftleistung, während der optisch-ästhetische Nutzen des Widerstandstrainings primär auf der Beeinflussung der Skelettmuskelmasse beruht.

Das theoretische Kraftpotenzial eines Muskels wird trainingsunabhängig vom physiologischen Muskelquerschnitt beeinflusst und beträgt ca.  $60 \text{ N/cm}^2$ . Dies veranschaulicht, dass eine Verbesserung der Fähigkeit zur Erzeugung maximaler Kräfte neben neuronalen (inter- und intramuskuläre Koordination) sowie motivationalen Faktoren primär vom Querschnitt eines Muskels bzw. der Skelettmuskelmasse abhängig ist (Fünten, Faude, Skorski & Meyer, 2023, S. 208; Taber, Vigotsky, Nuckols & Haun, 2019).

Dadurch wird ersichtlich, dass das Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse nicht nur im Kontext rein optisch-ästhetischer Trainingsziele von Bedeutung ist. Aufgrund der Tatsache, dass ein ausreichendes Maß an Skelettmuskulatur als Voraussetzung für die Krafterzeugung gilt, besitzt das Hypertrophietraining auch auf übergeordneter Ebene einen hohen Stellenwert als Grundlage für die trainingsinduzierte Verbesserung von Gesundheit, Leistung und Belastbarkeit.

Die nachfolgenden Unterkapitel widmen sich deshalb zunächst der detaillierten Darstellung von Aufbau und Funktionsweise der Skelettmuskulatur mit besonderem Fokus auf ihre Funktion zur Krafterzeugung sowie die Erläuterung der relevanten zellulären und molekularen Prozesse im Kontext der Steigerung der Skelettmuskelmasse. Abschließend werden aus diesen Erkenntnissen potenzielle Mediatoren zur Auslösung von Hypertrophieprozessen durch Widerstandstraining abgeleitet und deren Relevanz für die trainingspraktische Umsetzung diskutiert, um als Verständnisgrundlage für die nachfolgenden Teilkapitel zur Belastungssteuerung zu dienen.

### 2.1.1 Aufbau und Funktionsweise der Skelettmuskulatur im Kontext der Krafterzeugung

Das Newtonsche Kraftgesetz ( $F = m \times a$ ) besagt, dass die Kraft (engl.: „force“ [F]) aus physikalischer Sicht dem Produkt aus der Masse eines Körpers (engl.: „mass“ [m]) und der Beschleunigung (engl.: „acceleration“ [a]) entspricht. Da die Kraft eine vektorielle Größe darstellt und somit immer eine Richtung besitzt, wird eine Masse, im Sinne eines Körpers oder Gegenstandes, immer in die Richtung beschleunigt, in die auch die auf die Masse einwirkende Kraft wirkt. Dieser Zusammenhang ist als zweites Newton'sches Axiom (alt.: „Aktionsprinzip“) bekannt (Schwameder & Stein, 2023, S. 130). Die Umstellung dieses Zusammenhangs ergibt, dass die Beschleunigung dem Quotienten aus Kraft und Masse entspricht:

$$\tilde{a} = \frac{\tilde{F}}{m}$$

Da sich die Masse des menschlichen Körpers oder eines Gegenstandes, wie beispielsweise ein Trainingsgewicht in Form einer Langhantel, nicht spontan ändert und somit als konstant betrachtet werden kann, richtet sich das Ausmaß sowie die Richtung der Beschleunigung eines Körpers bzw. Gegenstandes immer nach der Höhe und der Richtung der einwirkenden Kraft (Schwameder & Stein, 2023, S. 123). Wenn  $m$  konstant ist, gilt daher:

$$\tilde{a} \sim \tilde{F}$$

Dadurch wird ersichtlich, dass immer eine Kraft erforderlich ist, um einen Körper oder einen Gegenstand zu beschleunigen, weshalb die Erzeugung von Kraft als Grundlage jeder Bewegung angesehen werden muss (Feuerlein et al., 1998, S. 97; Schwameder & Stein, 2023, S. 123). Die motorische Fähigkeit Kraft befähigt den menschlichen Körper zur Ausführung differenzierter Bewegungen in Sport und Alltag und tritt in den zentralen Erscheinungsformen Schnellkraft, Reaktivkraft und Kraftausdauer auf (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 2–3), wobei die Maximalkraft als limitierende Einflussgröße aller Dimensionen der Kraft gilt. Die Fähigkeit zur willkürlichen Erzeugung von Kräften wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst (Alt & Gollhofer, 2023, S. 193–196; Schnabel, Harre & Krug, 2014, S. 163–166):

- Muskelquerschnitt, Muskelfasertypen und -verteilung, Muskel- und Sehnenelastizität,
- Rekrutierung und Synchronisation der Aktivierung motorischer Einheiten, nervale Aktivierungsfrequenz, Reflexförderung (intramuskuläre Koordination),
- Energiebereitstellung und Stoffwechselprozesse im Muskel,
- Muskelform, Zugwinkel des Muskels am Knochen, Muskellänge,
- Kontraktionsform und -geschwindigkeit,
- Bewegungstechnik (intermuskuläre Koordination) sowie
- Motivation und Volition.

Im menschlichen Körper werden Kräfte durch Muskelaktivität erzeugt. Diese Muskelkraft ermöglicht es, Widerstände zu überwinden, ihnen nachgebend entgegenzuwirken oder sie zu halten. Im Kontext der Körperbewegungen gilt die Fähigkeit zur Erzeugung von Muskelkraft daher als generelle Voraussetzung zur Bewegung des eigenen Körpers oder eines Gegenstandes gegen den Widerstand der Erdanziehungskraft sowie der Massenträgheit (Schwameder & Stein, 2023, S. 138–148).

Durch die Kontraktionsfähigkeit der Skelettmuskulatur können Kräfte erzeugt werden, die bei Übertragung auf das passive Bewegungssystem zur kontrollierten Veränderung oder Aufrechterhaltung bestimmter Gelenkpositionen führen und dadurch letztlich die Bewegung des menschlichen Körpers ermöglichen. Jeder Muskel des aktiven Bewegungssystems ist von einer bindegewebigen Faszie umhüllt, welche dem Muskel seine Form verleiht und die Reibung zwischen benachbarten Muskeln sowie sonstigen Strukturen während der Bewegung reduziert. Ein Skelettmuskel besteht aus einer Vielzahl von Muskelfasern bzw. Muskelzellen, welche durch Bindegewebshüllen zu Muskelfaserbündeln zusammengefasst werden (Abb. 1). Muskelzellen besitzen mehrere Zellkerne, sind von einer Zellmembran (Sarkolemm) umgeben und setzen sich aus mehreren Hundert Myofibrillen zusammen, deren Zwischenräume durch Sarkoplasma gefüllt sind. Im Sarkoplasma befinden sich nicht-kontraktile Proteine, energiereiche Substrate, Zellorganellen zur ATP- (Mitochondrien) und Proteinsynthese (Ribosomen) sowie andere Hilfseinrichtungen der Muskelzelle. Myofibrillen bestehen aus Sarkomeren, welche sich aus einer strukturierten Anordnung kontraktiler Proteine (Aktin und Myosin) sowie anderen Proteinen (z. B. Titin) zusammensetzen und durch sogenannte Z-Scheiben voneinander abgegrenzt sind. Die Aktinfilamente setzen dabei an beiden Seiten des Sarkomers direkt an den

Z-Scheiben an, wohingegen die Myosinfilamente indirekt durch Titin mit den Z-Scheiben verbunden sind. Daraus ergibt sich, dass Myosinfilamente in der Mitte des Sarkomers verortet sind, wodurch die Aktin- und Myosinfilamente in der Ruheposition des Muskels einen gewissen Überlappungsgrad aufweisen (Abb. 1; Fünten, Faude, Hecksteden et al., 2023, S. 94–95).

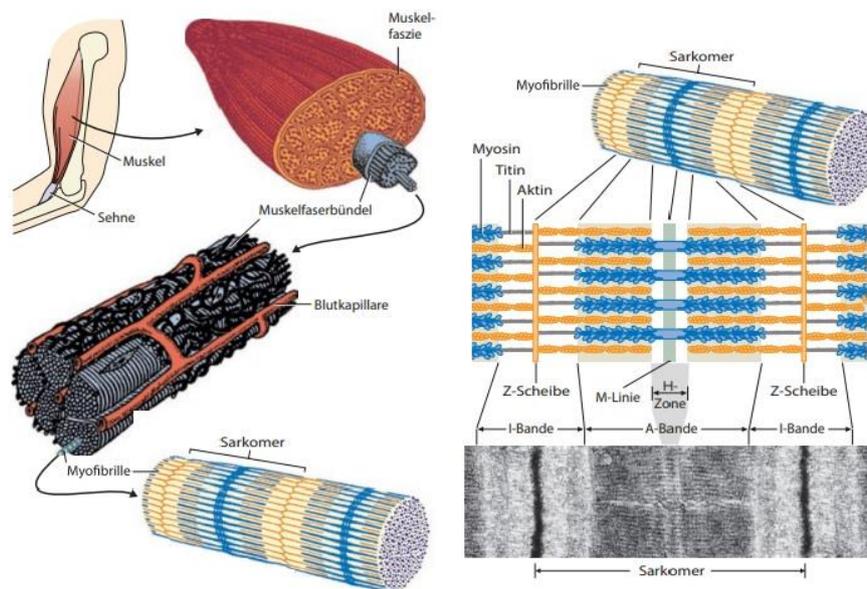


Abb. 1: Aufbau der Skelettmuskulatur (modifiziert nach Fünten, Faude, Hecksteden et al., 2023, S. 95)

Die Kontraktionsfähigkeit der Skelettmuskulatur begründet sich darin, dass sich innerhalb einer Myofibrille die Aktin- und Myosinfilamente bei Energieverbrauch (Adenosintriphosphat [ATP]) verbinden und ihren Überlappungsgrad ändern können, wodurch eine Verkürzung der Muskelfaser bzw. in Konsequenz daraus eine Kontraktion des gesamten Muskels zustande kommt. Das Aktinfilament ist von einem weiteren komplexen Eiweißmolekül, dem Tropomyosin umwunden, dessen Troponinmoleküle im Ruhezustand die Bindungsstellen am Aktinfilament blockieren, über die sich das Myosinfilament mit dem Aktinfilament verbinden könnte. Wird nun durch Ausschüttung des Neurotransmitters Acetylcholin ein Aktionspotenzial an der Membran der Muskelzelle ausgelöst, wird  $\text{Ca}^{2+}$  aus dem sarkoplasmatischen Retikulum in das Innere der Muskelzelle freigesetzt. Aufgrund der höheren Bindungsaffinität der Troponinmoleküle für  $\text{Ca}^{2+}$  findet nun eine räumliche Umlagerung des Tropomyosins statt, wodurch die Bindungsstellen am Aktinfilament freigegeben werden und die Myosinköpfe des Myosinfilamentes eine Verbindung mit dem Aktinfilament eingehen können. Wird nun eine Phosphatgruppe des im Myosin befindlichen ATPs unter Beteiligung von Magnesium durch das

Enzym ATPase abgespaltet, klappen die Myosinköpfe mittels einer scharnierartigen Bewegung durch die freigesetzte Energie zur Mitte des Sarkomers hin ab (Fünten, Faude, Hecksteden et al., 2023, S. 59). Aufgrund der vorhandenen Verbindung von Myosin- und Aktinfilament vergrößert sich ihr Überlappungsgrad, wodurch sich die Z-Scheiben des Sarkomers aufeinander zubewegen, was sich letztlich in der Verkürzung der Myofibrille bzw. der Kontraktion der gesamten Muskelzelle äußert (Fünten, Faude, Hecksteden et al., 2023, S. 94). Da die Skelettmuskulatur durch Sehngewebe mit den knöchernen Strukturen verbunden ist, werden die durch Muskelkontraktion erzeugten Kräfte auf das passive Bewegungssystem übertragen, was die Bewegung von Muskel-Gelenk-Systemen bzw. das Überwinden, das kontrollierte Nachgeben oder das Halten von Widerständen ermöglicht (Fröhlich & Kemmler, S. 3–4). Durch diesen Kontraktionsprozess innerhalb der Myofibrillen wird die chemische Energie von ATP, dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik folgend, in mechanische Energie umgewandelt (Fünten, Faude, Hecksteden et al., 2023, S. 94).

Um diesen Kontraktionsprozess der Muskelzelle willkürlich auszulösen, ist es erforderlich, dass das zentrale Nervensystem (ZNS) ein elektrisches Signal aussendet, welches über das periphere Nervensystem an die Muskulatur übermittelt wird. Der Prozess der Weiterleitung des elektrischen Erregungssignals und der dadurch initiierten Muskelkontraktion wird als Erregungs-Kontraktions-Kopplung (engl.: „excitation-contraction-coupling“; [ECC]) bezeichnet (Sandow, 1952; Shishmarev, 2020). Diese Signalübermittlung und die darauffolgende Kontraktion der Muskelzellen erfolgt innerhalb sogenannter motorischer Einheiten, die als kleinste funktionelle Einheiten des neuromuskulären Systems gelten und den strukturellen Zusammenschluss von  $\alpha$ -Motoneuronen sowie den von ihnen innervierten Muskelfasern beschreiben. Diese  $\alpha$ -Motoneurone entspringen den Vorderhornzellen des Rückenmarks und besitzen über ihr Axon und die motorischen Endplatten als einzige Nervenzellen eine direkte Verbindung zur Muskulatur. Erfolgt im ZNS die willkürliche Bildung eines elektrischen Innervationsimpulses zur Kontraktion eines Muskels, so wird dieses Signal über die dafür verantwortlichen  $\alpha$ -Motoneurone zu den Muskelfasern der Zielmuskulatur weitergeleitet, wo es an der motorischen Endplatte der aktiven präsynaptischen Zelle eine Ausschüttung von exzitatorischen Neurotransmittern (z. B. Acetylcholin) in den synaptischen Spalt auslöst. Diese Neurotransmitter können auf der gegenüberliegenden Seite des synaptischen Spalts, an der postsynaptischen Zellmembran der Muskelzelle, spezifische ionotrope Rezeptoren aktivieren. Durch Aktivierung dieser Rezeptorionenkanäle mittels exzitatorischer Neurotransmitter,

insbesondere Acetylcholin, wird die postsynaptische Membran depolarisiert und ein exzitatorisches postsynaptisches Potenzial ausgebildet. Diese Depolarisation kommt dadurch zustande, dass positiv geladene Ionen ( $\text{Na}^+$ ) durch die aktivierten Ionenkanäle aus dem extrazellulären Raum in das Zellinnere gelangen. Da das Ruhepotenzial der Muskelzelle an der Innenseite ihrer Zellmembran eine negative und extrazellulär eine positive Ladung aufweist, bewirkt ein starker Anstieg der Anzahl von positiv geladenen  $\text{Na}^+$ -Ionen im Zellinnenraum eine Ladungsveränderung bzw. Umkehrung des Membranpotenzials, was als Depolarisation bezeichnet wird. Überschreitet die räumliche und zeitliche Summation der an der postsynaptischen Membran anliegenden exzitatorischen Potenziale (Depolarisation) ein gewisses Schwellenpotenzial (ca. +30mV), löst dies nach dem „Alles-oder-Nichts-Prinzip“ ein sogenanntes Aktionspotenzial aus, das sich in Form eines elektrischen Signals durch die T-Tubuli über die Zellmembran der gesamten Muskelzelle ausbreitet. Da diese T-Tubuli mit dem sarkoplasmatischen Retikulum verbunden sind, verursacht die Ausbreitung des Aktionspotenzials eine Ausschüttung großer Mengen an  $\text{Ca}^{2+}$  aus dem sarkoplasmatischen Retikulum in das Zellinnere, was letztlich die Kontraktion der Muskelzelle ermöglicht (Gruber & Giboin, 2020, S. 6–7; Schwameder & Stein, 2023, S. 161; Shishmarev, 2020). Die spezifische Höhe der summierten exzitatorischen Potenziale bzw. die Höhe der Erregbarkeitsschwelle, die zur Auslösung eines Aktionspotenzials an der Muskelzelle erforderlich ist, ist insbesondere von der Dichte der  $\text{Na}^+$  Ionenkanäle in der Zellmembran abhängig. Die Rekrutierungs- und Frequenzierungseigenschaften werden dadurch stark von den Membraneigenschaften beeinflusst (Gruber & Giboin, 2020, S. 6–7).

Bei struktureller Betrachtung müssen kleine und große motorische Einheiten in Abhängigkeit von der Anzahl der durch ein  $\alpha$ -Motoneuron innervierten Muskelzellen unterschieden werden. Kleine motorische Einheiten können dabei weniger als 100 Muskelzellen umfassen, wohingegen große motorische Einheiten aus mehr als 1000 Muskelzellen pro  $\alpha$ -Motoneuron bestehen können (Gruber & Giboin, 2020, S. 1–2). Entsprechend des Kraft-Zeit-Verlaufs bei der synchronisierten Einzelzuckung aller Muskelzellen einer motorischen Einheit werden den motorischen Einheiten unterschiedliche kontraktile Eigenschaften zugeschrieben. Diese kontraktile Eigenschaften beziehen sich einerseits auf die maximale Höhe der pro Einzelzuckung erzeugbaren Kraft sowie andererseits auf die Verkürzungsgeschwindigkeit der Muskelzellen pro Einzelzuckung. Dabei werden die motorischen Einheiten in die übergeordneten Kategorien Fast Twitch (hohes Kraftmaximum sowie hohe

Verkürzungsgeschwindigkeit pro Einzelzuckung) und Slow Twitch (geringeres Kraftmaximum sowie geringere Verkürzungsgeschwindigkeit pro Einzelzuckung) unterteilt (Gruber & Giboin, 2020, S. 4). Größere motorische Einheiten besitzen in der Regel eher Fast Twitch-Eigenschaften, während kleiner motorische Einheiten tendenziell vermehrt Slow Twitch-Charakteristika aufweisen. Davon ausgehend lassen sich motorische Einheiten sowohl auf Basis der Anzahl innervierter Muskelzellen als auch in Bezug auf ihre kontraktile Eigenschaften unterscheiden, wodurch sich unterschiedliche Anforderungen an die Höhe des vom ZNS generierten Innervationsimpulses zur Auslösung von Kontraktionen ergeben. Dies spiegelt sich auch in der Größe der zugehörigen  $\alpha$ -Motoneurone wider. Bei größeren und schnell zuckenden motorischen Einheiten sind auch größere  $\alpha$ -Motoneurone vorzufinden als bei kleineren, langsam zuckenden motorischen Einheiten. Dabei weisen größere  $\alpha$ -Motoneurone einen deutlich (bis zu 10-fach) höheren Eingangswiderstand auf als kleinere  $\alpha$ -Motoneurone, was sich direkt auf die jeweiligen Anforderungen zur Rekrutierung und Frequenzierung auswirkt (Gruber & Giboin, 2020, S. 7). Dass zur Auslösung von Aktionspotenzialen bzw. Kontraktionsprozessen in großen, schnell zuckenden motorischen Einheiten deutlich höhere Innervationsimpulse als in kleinen, langsam zuckenden motorischen Einheiten erforderlich sind, bildet die Grundlage zur dosierten Kräfteerzeugung im neuromuskulären Funktionssystem. Dies bedeutet, dass in Abhängigkeit zur Höhe des willentlich gebildeten Innervationsimpulses eine unterschiedliche Anzahl und Größe motorischer Einheiten für die Kräfteerzeugung rekrutiert werden, wodurch sich die willkürlich erzeugte Muskelkraft situativ an die äußeren Kraftanforderungen anpassen lässt. Die Abhängigkeit der Rekrutierung motorischer Einheiten von der Höhe des Innervationsimpulses bzw. der äußeren Kraftanforderung ist auch als „Hennemansches Größenordnungsprinzip“ (engl.: „Hennemans size principle“) bekannt und spielt für die menschliche Motorik sowie im spezifischen Kontext des Widerstandstrainings eine bedeutende Rolle (Gruber & Giboin, 2020, S. 9–10; Henneman, 1957; Henneman & Olson, 1965).

Neben den Effekten der muskulären Kraft auf die Positionsveränderung des eigenen Körpers sowie auf Gegenstände und Körper im direkten Umfeld, besitzen Kräfte allerdings auch eine biologische Wirkung auf das neuromuskuläre Funktionssystem, in dem diese Kräfte erzeugt werden. Diese biologische Wirkung von Kräften gilt laut Schwameder und Stein (2023, S. 123) einerseits als Grundlage für den Erwerb, den Erhalt und die Verbesserung der Bewegungstechnik und andererseits für den Erhalt oder die Verbesserung der Quantität und Qualität von biologischen Materialien und Strukturen. Daneben bestimmen die Höhe der

Belastungsintensität, das Ausmaß der muskulären Ermüdung und die Bewegungsgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 2.2), in welchem Ausmaß die Rekrutierung und Frequenzierung von motorischen Einheiten innerhalb der beanspruchten Muskeln erfolgen muss, um dem äußeren Widerstand eine ausreichend hohe innere Kontraktionskraft entgegenzusetzen zu können. Während solche inneren Kräfte in nicht-biologischen Materialien zu Verschleiß oder Beschädigung führen, können biologische Strukturen durch gezielte und dosierte Krafteinwirkung funktional sowie quantitativ erhalten oder sogar verbessert werden. Insbesondere Muskelstrukturen sind auf solche mechanischen Belastungen angewiesen, da diese sonst langfristig atrophieren, wodurch sich funktionelle sowie quantitative Merkmale des Muskelgewebes bei fehlender mechanischer Beanspruchung verschlechtern (Schwameder & Stein, 2023, S. 123). Im Gegensatz dazu wirkt sich die regelmäßige Einwirkung muskulär erzeugter Kräfte positiv auf Belastbarkeit, Leistungskapazität und Masse des Muskelgewebes aus (Schoenfeld, 2021, S. 56; Wackerhage, Schoenfeld, Hamilton, Lehti & Hulmi, 2019).

## 2.1.2 Steigerung der Skelettmuskelmasse durch Widerstandstraining

Durch Muskelkontraktion erzeugte Kräfte besitzen laut Schwameder und Stein (2023, S. 123) eine biologische Wirkung auf die Quantität und Qualität der Skelettmuskulatur, was im Kontext eines Widerstandstrainings zur Steigerung der Skelettmuskelmasse von zentraler Bedeutung ist.

Eine Neubildung von Muskelfasern, was als Hyperplasie (Abb. 2) bezeichnet wird, konnte bei erwachsenen Menschen bisher nicht eindeutig als kurz- oder langfristiger Anpassungseffekt infolge eines Widerstandstrainings beobachtet werden und wird aus diesem Grund im Kontext der trainingsinduzierten Steigerung der Skelettmuskelmasse als irrelevant betrachtet (Fünten, Faude, Skorski & Meyer, 2023, S. 208–209; Jorgenson, Phillips & Hornberger, 2020).

Auf zellulärer Ebene werden durch bestimmte Belastungsstimuli im Widerstandstraining verschiedene Prozesse ausgelöst, die zu einer Steigerung der Skelettmuskelmasse durch Hypertrophie führen können (Wackerhage et al., 2019). Die Hypertrophie (Abb. 2) der Skelettmuskulatur resultiert in erster Linie aus einer Volumenzunahme der Muskelzellen (Haun et al., 2019; Russell, Motlagh & Ashley, 2000).

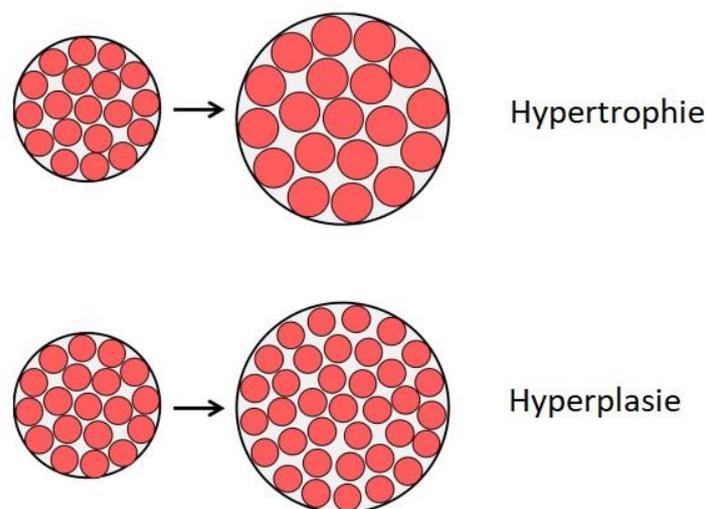


Abb. 2: Hypertrophie und Hyperplasie der Skelettmuskulatur (modifiziert nach Jorgenson et al., 2020)

Bisher geht man davon aus, dass diese Volumenzunahme infolge eines Widerstandstrainings primär durch die Neubildung zusätzlicher Myofibrillen sowie die Vergrößerung der

vorhandenen Myofibrillen innerhalb bestehender Skelettmuskelfasern zustande kommt, wobei noch nicht final geklärt ist, ob der relative Anteil der Neubildung oder der Vergrößerung von Myofibrillen stärker zu den Hypertrophieprozessen beiträgt (Jorgenson et al., 2020). Die Vergrößerung bestehender Myofibrillen kann aktuellen Theorien zufolge entweder durch die serielle oder parallele Addition von zusätzlichen Sarkomeren erfolgen, wobei angenommen wird, dass die parallele Sarkomeraddition einen größeren Anteil der Muskelhypertrophie ausmacht (Jorgenson et al., 2020; Kruse, Rivas, Weide, Tilp & Jaspers, 2021; Schoenfeld, 2010).

Darüber hinaus besteht noch kein einheitlicher wissenschaftlicher Konsens darüber, ob neben der Vermehrung kontraktile Proteine, was als myofibrilläre Hypertrophie bezeichnet wird, auch die Vermehrung nicht-kontraktile Proteine sowie die Volumenvergrößerung des Sarkoplasmas innerhalb der Muskelzelle, was als sarkoplasmatische Hypertrophie bezeichnet wird, für die Steigerung der Skelettmuskelmasse von Relevanz ist (Brumitt & Cuddeford, 2015). Haun et al. (2019) propagieren die Unterscheidung der Skelettmuskelhypertrophie in mehrere Typen, namentlich die Hypertrophie von Bindegewebsstrukturen, die myofibrilläre Hypertrophie und die sarkoplasmatische Hypertrophie. In einer weiteren Publikation der gleichen Forschungsgruppe aus demselben Jahr (Roberts, Haun, Vann, Osburn & Young, 2020) wird kritisch diskutiert, ob die sarkoplasmatische Hypertrophie tatsächlich unabhängig von der myofibrillären Hypertrophie auftreten kann oder ob die Zunahme des Sarkoplasmas sowie nicht-kontraktile Proteine lediglich eine Folge der myofibrillären Hypertrophie zur Aufrechterhaltung eines bestimmten Zell-Plasma-Verhältnisses ist, wodurch sie als Begleiterscheinung der myofibrillären Hypertrophie betrachtet werden müsste. Ein hypothetischer Erklärungsansatz dieser Zusammenhänge, der als „sarcoplasm expansion hypothesis of muscle hypertrophy during resistance training“ veröffentlicht wurde, besagt, dass die sarkoplasmatische und myofibrilläre Hypertrophie keine unterschiedlichen Prozesse darstellen, sondern vermutlich den gleichen Adaptationsprozess der Muskelzelle zu unterschiedlichen Zeitpunkten abbilden. Dabei gehen die Autoren davon aus, dass das Plasmavolumen in Relation zu den kontraktile Strukturen zunächst überproportional ansteigt, um die räumliche Dichte der Myofibrillen innerhalb der Muskelzelle zu verringern. Laut besagter Theorie könnte diese verringerte Dichte dazu dienen, freien Raum für eine nachfolgende Bildung neuer Myofibrillen sowie die Vergrößerung vorhandener Myofibrillen zu

schaffen und erst dadurch die Anlagerung neuer kontraktile Proteine innerhalb der Muskelzelle zu ermöglichen (Roberts et al., 2020).

Unabhängig davon, ob sich die Hypothese von Roberts et al. bewahrheitet oder ob die myofibrilläre und die sarkoplasmatische Hypertrophie unabhängig voneinander auftreten können, wird der Vermehrung kontraktile Proteine eine deutlich größere Bedeutung im Hinblick auf strukturelle Anpassungen der Skelettmuskulatur sowie die Steigerung der muskulären Leistungsfähigkeit beigemessen. Aus diesem Grund gilt die myofibrilläre Hypertrophie im Sinne der Neubildung kontraktile Proteine weiterhin als zellulärer Schlüsselmechanismus für die langfristige Steigerung der Skelettmuskelmasse (Jorgenson et al., 2020; Wackerhage et al., 2019).

Die zuvor dargestellten Erläuterungen zur Muskelhypertrophie sowie zum strukturellen Aufbau von Myofibrillen führen zu der Schlussfolgerung, dass zur Steigerung der Skelettmuskelmasse im Sinne einer Neubildung oder Vergrößerung von Myofibrillen respektive der darin enthaltenen Proteinstrukturen eine gesteigerte Synthese von Muskelproteinen erforderlich ist (Jorgenson et al., 2020; Wackerhage et al., 2019).

Es gilt mittlerweile als bestätigt, dass bereits eine einzige Einheit Widerstandstraining zur Steigerung der Muskelproteinsynthese führen kann, was den Stellenwert von Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse verdeutlicht (Hajj-Boutros et al., 2022). Allerdings sind sämtliche Proteinstrukturen innerhalb der Skelettmuskulatur auch ständig ablaufenden Umbau- und Reparaturprozessen unterworfen. Infolge einer muskulären Beanspruchung, wie sie beispielsweise durch Widerstandstraining hervorgerufen wird, finden diese Prozesse zur Regeneration und Remodellierung des beanspruchten Muskelgewebes in gesteigertem Ausmaß statt (McGlory, Devries & Phillips, 2017). Demzufolge bewirkt Widerstandstraining zwar einerseits die Steigerung der Muskelproteinsynthese, andererseits lässt sich jedoch eine gesteigerte Muskelproteindegradation infolge muskulärer Beanspruchung beobachten. Das Verhältnis zwischen Muskelproteinsynthese und -degradation wird als Netto-Muskelprotein-Bilanz bezeichnet. Überwiegt das Ausmaß der gesteigerten Muskelproteinsynthese infolge eines Widerstandstrainings gegenüber der hervorgerufenen Degradation, ist die Netto-Muskelprotein-Bilanz positiv (Kumar, Atherton, Smith & Rennie, 2009; Phillips, Tipton, Aarsland, Wolf & Wolfe, 1997).

Auf Basis dieser Betrachtungen zur trainingsinduzierten Synthese und Degradation von Muskelprotein lässt sich festhalten, dass die wiederholte und regelmäßige Steigerung der

Muskelproteinsynthese durch Widerstandstraining bei gleichzeitiger Vermeidung einer überproportionalen Verstärkung der Proteindegradation die Grundlage dafür darstellt, um zur langfristigen Steigerung der Skelettmuskelmasse möglichst dauerhaft eine positive Netto-Muskelprotein-Bilanz sicherzustellen (McGlory et al., 2017; Wackerhage et al., 2019). Gleichzeitig wird dadurch die Bedeutung einer adäquaten Belastungssteuerung im Widerstandstraining ersichtlich, da das Ausmaß der muskulären Beanspruchung durch die zielgerichtete Manipulation der Belastungsparameter derart gesteuert werden kann, dass die Trainingseinheit die gewünschte Steigerung der Muskelproteinsynthese auslöst ohne einen überproportionales Ausmaß an Proteindegradation zu bewirken (Refalo et al., 2023).

Parallel zum Widerstandstraining kann die Zufuhr ausreichender Mengen von Nahrungsprotein als geeignete Strategie zur Unterstützung der trainingsinduzierten Wirkung auf die Muskelproteinsynthese angesehen werden, da die Neubildung von körpereigenem Muskelprotein nur dann effektiv erfolgen kann, wenn dem menschlichen Organismus ausreichend Proteine bzw. die darin enthaltenen Aminosäuren über die Nahrungsaufnahme zur Verfügung gestellt werden (Phillips, 2014; Ribeiro, Nunes & Schoenfeld, 2019).

Zusammengefasst kann die Hypertrophie der Skelettmuskulatur als Produkt einer langfristig positiven Netto-Muskelprotein-Bilanz verstanden werden, die insbesondere durch die gesteigerte Muskelproteinsynthese als Akutreaktion auf die muskuläre Beanspruchung im Widerstandstraining beeinflusst wird.

### 2.1.3 Molekulare Anpassungsmechanismen der Skelettmuskelhypertrophie

Die Synthese von Muskelprotein findet innerhalb der Muskelzelle statt und ist das Resultat eines mehrstufigen Zusammenspiels komplexer molekularer Mechanismen. Diese Mechanismen umfassen die physiologischen Prozesse zur Signaltransduktion sowie die mit der Genexpression assoziierten Prozesse zur Transkription und Translation spezifischer Gene, die den Weg von der DNA bis zur Herstellung eines spezifischen Proteins beschreiben (Brown & Clancy, 2008; Esbenschade & Duzic, 2006; Schiaffino, Reggiani, Akimoto & Blaauw, 2021).

Die Signaltransduktion stellt in der Physiologie und Biochemie einen Prozess dar, bei dem ein lokales oder systemisches Signal erfasst, verarbeitet und in das Zellinnere weitergeleitet wird, wo in Abhängigkeit von der Art dieses Signals spezifische zelluläre Funktionen reguliert werden, zu denen auch die Proteinsynthese zählt (Wackerhage & Ratkevicius, 2008).

Dies veranschaulicht die Rolle der Signaltransduktion als Initiator intrazellulärer Reaktionen auf bestimmte extra- oder intrazelluläre Signale. Im Kontext des Widerstandstrainings zur Steigerung der Skelettmuskelmasse bedeutet dies, dass auf Muskelzellebene spezifische physiologische Signale erzeugt werden müssen, die, nach Erfassung durch geeignete Sensoren und der Weiterleitung über bestimmte Signalwege in das Zellinnere, eine gesteigerte Neubildung von Muskelproteinen bewirken können (Wackerhage et al., 2019).

Diese zellulären Signale zur Auslösung einer gesteigerten Muskelproteinsynthese infolge von Widerstandstraining umfassen einerseits verschiedene Hormone, Myokine und Wachstumsfaktoren, wie beispielsweise IGF-1/MGF, Androgene und Follistatin, die die Muskelproteinsynthese entweder direkt positiv beeinflussen oder indirekt auf sie einwirken, indem negative Einflussfaktoren auf die MPS gehemmt werden. Andererseits schließen diese spezifischen Signale auch mechanische Stimuli ein, die über komplexe Proteinstrukturen innerhalb oder im direkten Umfeld der Muskelzelle, sogenannte Mechanosensoren, erfasst werden können. Diese mechanosensorischen Proteinkomplexe sind sowohl direkt in der Plasmamembran des Sarkolemms, der Verbindungsstelle der extrazellulären Matrix mit dem intrazellulären Zytoskelett der Muskelzelle (z. B. Costamere: Dystrophin-Glycoprotein-Komplex und Vinculin-Talin-Integrin-Komplex), als auch innerhalb der einzelnen Sarkomerstrukturen, an den Z-Scheiben sowie den I- und M-Banden (z. B. Titin, Filamin-C-Bag3) verortet und reagieren auf mechanische Beanspruchung bzw. Deformation (Lim et al., 2022; Schiaffino et al., 2021; Wackerhage et al., 2019).

Darüber hinaus werden derzeit weitere Signale, wie beispielsweise Autophagie, die Deformation von Muskelzellkernen, metabolischer Stress oder die trainingsinduzierte Mikrotraumatisierung der Muskelzelle diskutiert, die einen potenziellen Einfluss auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse haben könnten. Da bisher allerdings kein klarer wissenschaftlicher Nachweis eines kausalen Zusammenhangs dieser Signale mit der Beeinflussung der Muskelproteinsynthese im Sinne einer Steigerung der Skelettmuskelmasse, erbracht wurde, werden diese Signale im weiteren Verlauf nicht berücksichtigt (Wackerhage et al., 2019).

Die Transduktion jener Signale, die im Kontext des Widerstandstrainings zur Steigerung der Skelettmuskelmasse von Bedeutung sind, erfolgt primär über die Signalkaskade mit der Bezeichnung „mammalian target of rapamycin complex 1“ (mTORC1). mTORC1 ist ein Multiproteinkomplex, der als Knotenpunkt zur Regulation mehrerer hypertrophieassoziiierter Signalwege (z. B. PI3K-PKB/Akt & MAPK/ERK; Abb. 3) fungiert, und durch zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen als wichtigster Signalweg zur Regulation der Muskelproteinsynthese identifiziert werden konnte (Lim et al., 2022; Schiaffino et al., 2021; Wackerhage et al., 2019).

Die Signaltransduktion von mechanischen Stimuli wird auch als Mechanotransduktion bezeichnet. Dem aktuellen Kenntnisstand zufolge werden mechanische Signale über den sogenannten Hippo-Signalweg primär durch Aktivierung der Proteine Bag3, YAP und TAZ, verarbeitet und weitergeleitet. Dabei wird derzeit vermutet, dass dieser Signalweg über eine Suppression des Enzyms PTEN dessen hemmenden Einfluss auf mTORC1 reduziert, wodurch die Muskelproteinsynthese indirekt beeinflusst wird. Nach aktuellem Kenntnisstand scheint die direkte Regulation der Muskelproteinsynthese durch Mechanotransduktion über den Hippo-Signalweg jedoch weitestgehend unabhängig von mTORC1 stattzufinden. Sämtliche Darstellungen zur Signaltransduktion sind allerdings unter der Prämisse zu verstehen, dass viele Prozesse sowie deren Auslöser und Interaktionen noch nicht gänzlich erforscht sind (Lim et al., 2022; Wackerhage et al., 2019; Watt, Goodman, Hornberger & Gregorevic, 2018).

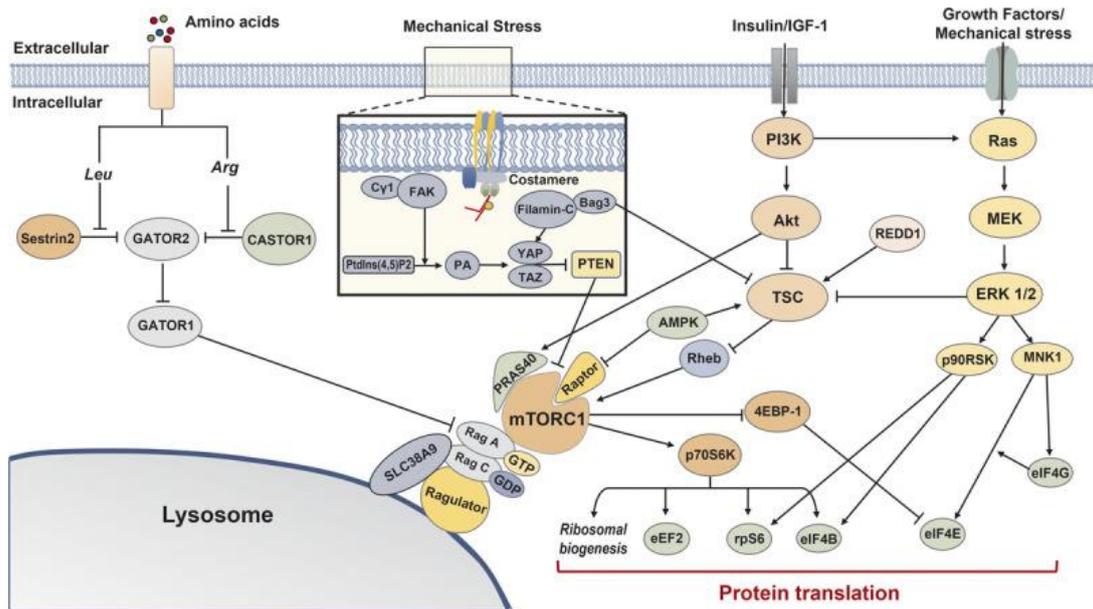


Abb. 3: Signaltransduktion über mTORC1-verbundene Signalwege zur Steigerung der MPS (Lim et al., 2022)

Unter Berücksichtigung der zuvor dargestellten Erläuterungen kann die Neubildung von Muskelproteinen als kausale Folge aus einer gesteigerten Genexpression im Inneren der Muskelzelle betrachtet werden, die durch die Aktivierung von mTORC1 (Abb. 3) oder dem Hippo-Signalweg ausgelöst wird (Lim et al., 2022). Die Genexpression (Abb. 4) erfolgt in zwei Schritten: der Transkription und Translation (Brown & Clancy, 2008; Walden, 2019).

Die Transkription beschreibt einen Prozess, bei dem, nach der Transduktion eines entsprechenden Signals, ein spezifischer Abschnitt (Gen) der im Zellkern einer Muskelzelle gespeicherten DNA abgelesen und in eine transportfähige Form, die sogenannte messengerRNA (mRNA), übertragen wird. Das durch Widerstandstraining induzierte Signal würde in diesem konkreten Fall unter anderem dazu führen, dass jener Abschnitt der DNA abgelesen wird, auf dem die genetische Information über den Aufbau von Muskelprotein gespeichert ist. Die genetische Information dieses speziellen DNA-Abschnitts wird anschließend mithilfe des Enzyms RNA-Polymerase in eine mRNA übertragen. Die Transkription eines Gens ist deshalb essenziell zur Neubildung von Proteinen, da es ohne das Umschreiben genetischer Informationen in eine mRNA nicht möglich wäre, den „Bauplan für Muskelprotein“ aus dem Zellkern hinaus zu transportieren und dort als Vorlage zur Neubildung von Proteinen zu nutzen. Der zweite Schritt der Genexpression wird als Translation bezeichnet und beschreibt die Übersetzung der mRNA in Proteine. Die im ersten Schritt durch Transkription gebildete mRNA wandert hierbei aus dem Zellkern hinaus in das Sarkoplasma, wo sich die Ribosome der

Muskelzelle befinden. Bei Eintreffen der mRNA im Sarkoplasma setzt sich ein Ribosom an die mRNA, liest die darin enthaltene genetische Information zum Aufbau von Muskelprotein ab und bildet aus ihr die entsprechenden Aminosäuren, die schlussendlich zum fertigen Muskelprotein zusammengesetzt werden (Egan & Zierath, 2013; Schiaffino et al., 2021; Wen, Alimov & McCarthy, 2016).

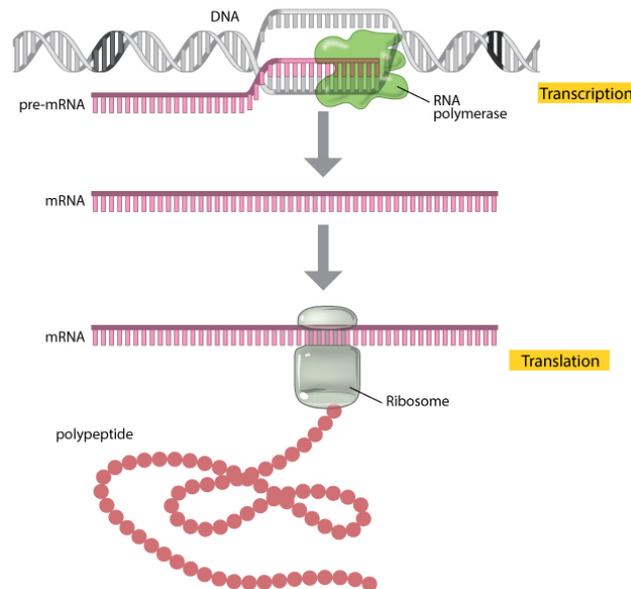


Abb. 4: Genexpression durch Transkription und Translation (Brown & Clancy, 2008)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Muskelproteinsynthese auf einer gesteigerten Transkription und Translation spezifischer Gene (Abb. 4) infolge der Transduktion eines entsprechenden lokalen oder systematischen Signals basiert. Die Transkription der genetischen Information zum Aufbau von Muskelprotein (mRNA-Synthese) erfolgt dabei in den Zellkernen einer Muskelzelle. Die synthetisierte mRNA gelangt anschließend über Mikrotubuli aus dem Zellkern hinaus in das Sarkoplasma zu den Ribosomen, wo die mRNA in Proteine übersetzt werden (Translation).

Die Signaltransduktion über mTORC1 beeinflusst die Muskelproteinsynthese sowohl auf der transkriptionalen als auch der translationalen Ebene über diverse Mechanismen. Dabei wird auf der transkriptionalen Ebene das Ablesen der entsprechenden Gene aus der DNA sowie die Expression der transportfähigen mRNA gesteuert. Auf der translationalen Ebene reguliert mTORC1 einerseits die ribosomale Proteinsynthese, also die Neubildung von Muskelprotein durch „Übersetzung“ der mRNA, sowie andererseits die ribosomale Biogenese, was die

Neubildung von Ribosomen im Sarkoplasma beschreibt. Wenn infolge einer mTORC1-Aktivierung die ribosomale Biogenese eine Neubildung von Ribosomen innerhalb der Muskelzelle bewirkt, stehen nachfolgend mehr Ribosome zur Translation der mRNA zur Verfügung, wodurch die translationale Kapazität zur Neubildung von Muskelproteinen gesteigert wird. Neben mTORC1 und dem Hippo-Signalweg existieren weitere Signalwege (z. B. Ca<sup>2+</sup>-abhängige Signaltransduktion) sowie zusätzliche Transkriptions- und Co-Faktoren (z. B. PGC-1 $\alpha$ 4 und YAP), die regulierend auf die Muskelproteinsynthese einwirken können. Die exakten Mechanismen und Signale dieser untergeordneten Prozesse werden an dieser Stelle allerdings nicht näher thematisiert (Benavides Damm & Egli, 2014; Brown & Clancy, 2008; Chaillou, Kirby & McCarthy, 2014; Schiaffino et al., 2021; Walden, 2019).

Wie zuvor dargestellt ist die Genexpression abhängig von der im Zellkern stattfindenden mRNA-Synthese sowie der ribosomalen Proteinsynthese. Es wurde bereits erläutert, dass die Genexpression bzw. Muskelproteinsynthese auf der translationalen Ebene dadurch gesteigert werden kann, dass neue, zusätzliche Ribosome im Umfeld eines Zellkerns innerhalb der Muskelzelle gebildet werden. Da neben der Translationskapazität der Ribosome allerdings auch die Syntheserate von mRNA im Zellkern begrenzt ist, leitet sich daraus folglich eine Begrenzung der transkriptionalen Kapazität zur Genexpression in Abhängigkeit zur Anzahl der in einer Muskelzelle vorhandenen Zellkerne (Myonuklei) ab. In diesem Kontext ist erneut zu erwähnen, dass Muskelzellen im Gegensatz zu vielen anderen Zelltypen des menschlichen Körpers einen multinukleären Aufbau besitzen (Bagley, Denes, McCarthy, Wang & Murach, 2023).

Es wird derzeit vermutet, dass die Strecke, die eine mRNA innerhalb der Muskelzelle nach Bildung im Zellkern zurücklegen kann, limitiert ist, weshalb das Vorhandensein mehrerer Zellkerne diverse physiologische Vorteile besitzt, sofern diese Zellkerne eine bestimmte Verteilungsstruktur innerhalb der Muskelzelle aufweisen (Hansson, Solbrå, Gundersen & Bruusgaard, 2020). Diese Verteilungsstruktur gestaltet sich innerhalb der Muskelzelle derart, dass jeder Nukleus einen bestimmten Bereich innerhalb der Muskelzelle kontrolliert, der aus diesem Grund auch als myonukleäre Domäne bezeichnet wird. Diese Bereiche bzw. diese Domänen sind dabei nicht als fest voneinander abgegrenzt zu betrachten, sondern passen sich entsprechend der gegebenen situativen Anforderungen an. Besteht beispielsweise eine erhöhte intrazelluläre Anforderung zur Muskelproteinsynthese, z. B. durch eine muskuläre Verletzung oder aufgrund entsprechender trainingsinduzierter Signale, so können sich

myonukleäre Domänen in Abhängigkeit zu ihrer maximalen transkriptionalen und translationalen Kapazität ausdehnen, um diesen Bedarf zu decken (Bagley et al., 2023).

Übersteigen die Anforderungen zur Muskelproteinsynthese in einer Muskelzelle allerdings die Kapazität der myonukleären Domänen bzw. der vorhandenen Myonuklei, so kann die transkriptionale Kapazität dadurch gesteigert werden, dass die Anzahl an Zellkernen innerhalb der Muskelzelle gesteigert wird. Dies ist beispielsweise bei muskulären Verletzungen der Fall, bei denen einerseits die Zellkerne selbst von der Verletzung betroffen sein können und andererseits die Traumatisierung des Muskelgewebes ein erhöhtes Maß an Muskelproteinsynthese zur Regeneration der kontraktilen und nicht-kontraktilen Proteinstrukturen der Muskelzelle erforderlich macht. Zusätzlich zur regenerativen Bedeutung ist die Anzahl der Myonuklei auch im Kontext der Skelettmuskelhypertrophie durch Widerstandstraining relevant. Erfolgt eine trainingsinduzierte Steigerung der Anzahl und Größe von Myofibrillen, während die Anzahl an Zellkernen unverändert bleibt, nimmt das Verhältnis von Zellkernen zu Zellmasse innerhalb der Muskelfaser ab, wodurch sich die myonukleäre Domäne verkleinert (Bagley et al., 2023; Fukada, Akimoto & Sotiropoulos, 2020).

Eine Steigerung der Anzahl an Zellkernen innerhalb einer Muskelzelle erfolgt über die Aktivierung sogenannter Satellitenzellen. Als Satellitenzellen bezeichnet man spezialisierte Stammzellen, die als Vorläufer von Muskelzellen (Myoblasten) gelten und sich zwischen der Basalmembran der Muskelzelle und dem Sarkolemm befinden. Diese Satellitenzellen können bei Beschädigung eines Zellkerns oder bei erhöhtem Bedarf zur Muskelproteinsynthese innerhalb der Muskelzelle ihre Lokalisation verlassen und zur entsprechenden Stelle der Muskelzelle wandern, wo sie mit den vorhandenen Strukturen fusionieren, um die Anzahl an Zellkernen wiederherzustellen oder diese zu steigern (Fukada et al., 2020; Schiaffino et al., 2021).

Im Kontext des Widerstandstrainings zur Steigerung der Skelettmuskelmasse besitzt eine gesteigerte Satellitenzellaktivität demzufolge keinen direkten Einfluss auf die Muskelproteinsynthese selbst, sondern lediglich auf die maximale transkriptionale Kapazität der Muskelzelle. Auf Basis dieser Erläuterungen lässt sich hypothetisieren, dass, sofern durch das Widerstandstraining keine Beschädigung der Muskelzelle hervorgerufen wurde, eine gesteigerte Satellitenzellaktivität auch nicht als direkte Reaktion auf die Trainingsbelastung zu

verstehen ist, sondern vielmehr eine langfristige Reaktion auf die trainingsinduzierte Steigerung des Bedarfs an Muskelprotein darstellt (Conceição et al., 2018).

Im Widerspruch zu manchen älteren Modellen der Skelettmuskelhypertrophie ergibt sich daraus, dass die Satellitenzellaktivität zwar keinen Einfluss auf das Ausmaß der kurzfristigen Steigerung der Muskelproteinsynthese infolge eines Widerstandstrainings besitzt, auf lange Sicht aber limitierend auf mögliche Hypertrophieeffekte wirkt, da ab einem bestimmten Verhältnis von Zellmasse zu Zellkernen innerhalb der Muskelzellen keine ausreichend hohe Muskelproteinsynthese zur weiteren Steigerung der Skelettmuskelmasse mehr möglich ist, sofern sich die Anzahl an Zellkernen nicht entsprechend der gesteigerten Skelettmuskelmasse vergrößert (Adams, 2006; Fukada et al., 2020; Fukada, Higashimoto & Kaneshige, 2022).

Eine gesteigerte Satellitenzellaktivität sollte demnach nicht als primäre Zielstellung innerhalb bzw. infolge einer einzelnen Trainingseinheit angesehen werden, sondern stellt vielmehr die Konsequenz einer langfristigen Vergrößerung der Muskelzelle dar, weshalb die Steigerung der MPS sowohl kurz- als auch langfristig betrachtet als zentrales Ziel des Widerstandstrainings gilt.

### 2.1.4 Mediatoren zur Steigerung der Muskelproteinsynthese im Widerstandstraining

Die wiederholte Erzeugung der zuvor erläuterten Signale, die über den mehrstufigen Prozess der Transduktion, Transkription und Translation zu einer Steigerung der Muskelproteinsynthese führen können, gilt als grundsätzliche Voraussetzung dafür, langfristig eine Vergrößerung der Skelettmuskelmasse zu erreichen. Jene zellulären Mechanismen, die in ihrer Gesamtheit den Hypertrophieprozess abbilden, lassen sich insbesondere durch regelmäßiges Widerstandstraining sehr effektiv anstoßen (Hajj-Boutros et al., 2022; McGlory et al., 2017).

Welche physiologischen Beanspruchungssituationen durch die konkrete Belastungsgestaltung innerhalb einer Trainingseinheit hervorgerufen werden müssen, um die Erzeugung hypertrophiespezifischer Signale zu forcieren, stellt aus anwendungsorientierter Sicht eine essenzielle Fragestellung für das Widerstandstraining zur Vergrößerung der Skelettmuskelmasse dar. Laut einer früheren Veröffentlichung von Schoenfeld (2010) wurde angenommen, dass im Kontext des Widerstandstrainings insbesondere den folgenden drei beanspruchungsassoziierte Mediatoren eine wichtige Funktion zur Auslösung hypertrophiespezifischer Signale zukommt:

- Mechanische Spannung
- Mikrotraumatisierung der Muskelzelle
- Metabolischer Stress

Die von Schoenfeld (2010) zugesprochene Bedeutung dieser Mediatoren muss bei Berücksichtigung der aktuellen trainingswissenschaftlichen Studienlage allerdings zumindest in Teilen kritisch betrachtet werden. Aus diesem Grund soll nachfolgend eine differenzierte Betrachtung dieser Faktoren, sowohl einzeln als auch hinsichtlich ihrer potenziellen Wechselwirkungen untereinander, erfolgen, um deren tatsächliche Relevanz für die Mediation von trainingsinduzierten Hypertrophieprozessen nach aktuellem wissenschaftlichen Kenntnisstand abzubilden.

Die mechanische Spannung ist ein direktes Produkt der inneren und äußeren Kräfte, die bei Muskelkontraktionen gegen innere (z. B. die Aktivierung antagonistischer Muskeln) oder äußere Widerstände (z. B. die Gravitationskraft einer Langhantel) auf einen Muskel wirken (Schoenfeld, 2010, 2021, S. 30–31).

Dies beruht auf den Beobachtungen, dass im Widerstandstraining ein äußerer Widerstand eine Verlängerung des Muskels bzw. der darin subsummierten Muskelfasern forciert und gleichzeitig durch Muskelkontraktionen auf myofibrillärer Ebene innere Kräfte zur Verkürzung der Strukturen erzeugt werden, um dieser extern forcierten Muskelverlängerung entgegenzuwirken. Die gegensätzlich verlaufenden Vektoren der extern einwirkenden Kraft des Widerstands und der intern erzeugten Kontraktionskraft des Muskels resultieren in einer auf die aktive Muskulatur einwirkenden mechanischen Spannung, welche als Maß der Dehn- oder Zugbeanspruchung des Muskelgewebes angesehen werden kann (Alt & Gollhofer, 2023, S. 185–186).

Die Höhe und Dauer der einwirkenden mechanischen Spannung wird innerhalb des Muskels auf zellulärer Ebene sowohl als direktes Signal (über Mechanosensoren) als auch als indirektes Signal (über die Ausschüttung von Hormonen, Myokinen und Wachstumsfaktoren) erfasst. Dadurch wird ersichtlich, dass die Erzeugung von mechanischer Spannung durch Widerstandstraining zur Auslösung jener Signalkaskaden führt, die für die Steigerung der Muskelproteinsynthese innerhalb einer Muskelzelle verantwortlich sind, was bereits in Kapitel 2.1.3 ausführlich erläutert wurde (Jorgenson et al., 2020; Lim et al., 2022; Schiaffino et al., 2021; Wackerhage et al., 2019).

Da die Muskelproteinsynthese jedoch nur in jenen Muskelzellen gesteigert wird, auf die im Widerstandstraining auch eine mechanische Spannung wirkt, muss die Trainingsbelastung zur Maximierung der Muskelproteinsynthese innerhalb der Zielmuskulatur derart gestaltet sein, dass möglichst alle motorischen Einheiten in Abhängigkeit zur verwendeten Trainingslast entweder gleichzeitig oder nacheinander für die Erzeugung innerer Kräfte gegen einen Widerstand rekrutiert werden (Carvalho et al., 2022; Lasevicius et al., 2022).

Die Erzeugung mechanischer Spannung ist über unterschiedliche Mechanismen dazu geeignet, die Muskelproteinsynthese zu beeinflussen, und gilt daher nach aktuellem wissenschaftlichen Konsens als einflussreichster Mediator der Skelettmuskelhypertrophie im Kontext des Widerstandstrainings (Jorgenson et al., 2020; Lim et al., 2022; Schiaffino et al., 2021; Schoenfeld, 2021, S. 30-38; S. 56; Wackerhage et al., 2019). Die detaillierte Darstellung und

Erläuterung der physiologischen Prozesse und trainingsassoziierten Belastungsparameter, durch die die mechanische Spannung der Muskelzelle beeinflusst bzw. gesteuert werden kann, ist Gegenstand von Kapitel 2.2 und wird daher an dieser Stelle ausgelassen, um ausufernde Redundanzen zu vermeiden.

Der von Schoenfeld (2010) vor mehr als zehn Jahren postulierte Einfluss der trainingsinduzierten Mikrotraumatisierung der Muskelzelle (engl.: „exercise induces muscle damage“, [EIMD]) auf die Skelettmuskelhypertrophie muss nach derzeitigem Kenntnisstand der trainingswissenschaftlichen Forschung kritisch hinterfragt werden (Schoenfeld, 2021, S. 56; Wackerhage et al., 2019).

EIMD wird als trainingsinduzierte Beschädigung der mikroskopischen Strukturen der Muskelzelle, wie beispielsweise der Z-Scheiben der Myofibrillen, verstanden und tritt im Kontext des Widerstandstrainings insbesondere dann auf, wenn neue bzw. ungewohnte Trainingsübungen oder Übungen mit akzentuierter exzentrischer Muskelarbeitsweise über große Bewegungsumfänge ausgeführt werden. Diese ungewohnten mechanischen Beanspruchungen übersteigen ab einem gewissen Ausmaß die plastische Belastbarkeit der mikroskopischen Strukturen, wodurch diese Schaden nehmen (Schoenfeld, 2012; Wackerhage et al., 2019). Diese mechanisch verursachte Form der EIMD tritt bei Personen mit Erfahrung im Widerstandstraining allerdings seltener auf, was auf den sogenannten „repeated bout effect“ zurückgeführt wird (McHugh, 2003; Schoenfeld, 2012).

Darüber hinaus tritt EIMD sowohl nach Widerstands- als auch nach Ausdauertrainingseinheiten zusätzlich aufgrund metabolischer Ursachen auf, in denen es aufgrund zunehmender peripherer Ermüdung zur Aufrechterhaltung der Kontraktionsfähigkeit der Muskulatur zu einem erhöhten  $\text{Ca}^{2+}$ -Influx aus dem sarkoplasmatischen Retikulum in die Muskelzellen kommt. Ab einem gewissen Maß der peripheren bzw. muskulären Ermüdung übersteigt die Menge des in die Muskelzelle einströmenden  $\text{Ca}^{2+}$  die Kapazität zum Rücktransport von  $\text{Ca}^{2+}$  aus der Zelle hinaus, was bei Aufrechterhaltung der muskulären Beanspruchung eine zunehmende  $\text{Ca}^{2+}$ -Akkumulation zur Folge hat. Durch eine erhöhte intrazelluläre  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration werden bestimmte Enzyme (z. B. Calpain und Phospholipase  $\text{A}_2$ ) aktiviert, die den Abbau von Proteinstrukturen innerhalb der Myofibrillen via Proteolyse sowie eine Schwächung der Membranintegrität des Sarkolemms verursachen (Gissel, 2000; Gissel & Clausen, 2001; Gissel, 2005).

EIMD muss unabhängig davon, ob die Traumatisierung mechanische oder metabolische Ursachen hat, in jedem Fall zunächst als kataboler Prozess betrachtet werden, da die Beschädigung von strukturellen Komponenten der Muskelzelle immer eine Erhöhung der Proteindegradation zur Folge hat. Dementsprechend wirkt die Erzeugung von zellulären Mikrotraumata bei akuter Betrachtung gegensätzlich zur erwünschten Steigerung der Muskelproteinsynthese. Bei ausreichender Regenerationszeit und Zufuhr von Nahrungsprotein kann die Remodellierung der beschädigten Mikrostrukturen allerdings laut der Theorie von Schoenfeld (2010, 2012) zu einer superkompensatorischen Vergrößerung der Myofibrillen führen. In diesem Kontext wurde geäußert, dass die Fähigkeit der EIMD zur Auslösung von langfristigen Hypertrophieeffekten nicht nur von den Regenerationsbedingungen, sondern auch vom Ausmaß der Mikrotraumatisierung abhängig ist, da die Vergrößerung von Proteinstrukturen innerhalb einer Muskelzelle nur dann entstehen kann, wenn die ausgelöste Muskelproteinsynthese die schadensinduzierte Proteindegradation in ausreichendem Ausmaß übersteigt (Damas, Libardi & Ugrinowitsch, 2018; Kumar et al., 2009; Schoenfeld, 2012).

In einer Übersichtsarbeit zum Einfluss der Mikrotraumatisierung der Muskelzelle und der Muskelproteinsynthese im Widerstandstraining zur Auslösung von Muskelhypertrophie äußerten Damas, Libardi und Ugrinowitsch (2018) die Vermutung, dass die trainingsinduzierte Steigerung der Muskelproteinsynthese zu größeren Hypertrophieeffekten führt, wenn das Ausmaß der EIMD minimal gehalten wird. Darüber hinaus konstatierten sie, dass Widerstandstraining auch bei nicht feststellbarer EIMD zu ähnlichen Hypertrophieeffekten führt wie ein Widerstandstraining, das eine Mikrotraumatisierung der Muskelzellen hervorruft. Die Schlussfolgerung der Autoren (Damas et al., 2018) lautete dementsprechend, dass die trainingsinduzierte Steigerung der Skelettmuskelmasse unabhängig davon zu sein scheint, ob das Widerstandstraining eine Mikrotraumatisierung auf zellulärer Ebene erzeugt, weshalb EIMD nicht als relevanter Mediator der Muskelhypertrophie angesehen werden kann.

Aus dieser Erkenntnis lässt sich die Hypothese ableiten, dass die im Widerstandstraining erzeugte mechanische Beanspruchung der Muskelzellen einerseits als verantwortlicher Mediator der beobachteten Hypertrophieeffekte angesehen werden kann und andererseits als plausible Ursache der zellulären Mikrotraumatisierung des Muskelgewebes gilt. Dieser These folgend, sollte EIMD lediglich als logische Begleiterscheinung bzw. als „Kollateralschaden“ der mechanischen Spannung und nicht als eigenständiger Mediator der Muskelhypertrophie betrachtet werden.

Diese Hypothese kann auf Basis der vorhandenen trainingswissenschaftlichen Evidenz allerdings noch nicht schlüssig überprüft werden, weshalb mögliche Einflüsse der Mikrotraumatisierung der Muskelzelle auf die Muskelhypertrophie weiterhin nicht vollständig ausgeschlossen werden können, auch wenn die Bedeutung der mechanischen Spannung als Mediator von Hypertrophieprozessen im Widerstandstraining mittlerweile unbestritten als gesichert gilt. Bis exaktere Erkenntnisse zu diesem Sachverhalt vorliegen, besteht weiterhin die theoretische Möglichkeit, dass EIMD in geringfügigem Ausmaß durch die Beeinflussung der Satellitenzellaktivität langfristig einen unterstützenden Effekt auf die MPS haben könnte, weshalb EIMD in aktuelleren themenspezifischen Publikationen immer noch Erwähnung findet (Schoenfeld, 2021, S. 56), wenngleich diese unter den genannten Gesichtspunkten in jedem Fall kritisch betrachtet werden sollte.

Neben der mechanischen Spannung und der trainingsinduzierten Mikrotraumatisierung der Muskelzelle nannte Schoenfeld (2010) metabolischen Stress als dritten potenziellen Mediator der Skelettmuskelhypertrophie.

Metabolischer Stress wird definiert als Akkumulation von Metaboliten, wie beispielsweise Laktat und  $H^+$ , die als Nebenprodukt der anaeroben Energiebereitstellung (anaerobe Glykolyse) während körperlicher Aktivität entstehen (Schoenfeld, 2010, 2013). Dies kommt zustande, wenn die erforderliche Energieflussrate zur Aufrechterhaltung der muskulären Leistung die Kapazität der aeroben Energiebereitstellung überschreitet, wodurch anaerobe Energiebereitstellungsprozesse angestoßen werden, bei denen besagte Stoffwechselnebenprodukte entstehen, deren intrazelluläre Konzentration bei fortdauernder Muskelarbeit zunimmt und letztlich durch ein Absinken des pH-Wertes der Muskelzelle zur peripheren Ermüdung beiträgt. Die Zunahme der Menge an Metaboliten kann somit als zellulärer Marker für die fortschreitende muskuläre Ermüdung betrachtet werden, wobei aufgrund des größeren Umfangs an Muskelarbeit beim Widerstandstraining mit geringeren Trainingslasten in der Regel eine stärkere Metabolitenakkumulation zu beobachten ist als beim Training mit höheren Lasten (Allen, Lamb & Westerblad, 2008; Nicholson, Mcloughlin, Bissas & Ispoglou, 2014; Wackerhage et al., 2019).

Der beschriebenen Metabolitenakkumulation wurde bereits vor mehreren Jahren eine Rolle bei der Auslösung potenzieller Mechanismen zur Beeinflussung von Hypertrophieprozessen zugeschrieben, beispielsweise durch die Steigerung der Rekrutierung motorischer Einheiten,

die vermehrte Ausschüttung systemischer Hormone, die gesteigerte Bildung radikaler Sauerstoffspezies (engl.: „reactive oxygen species“; [ROS]), das Anschwellen der Muskelzelle aufgrund des Anstiegs der intrazellulären Hydratation (alt.: intrazelluläre Ödembildung; engl.: „cell swelling“) und die Veränderungen der lokalen Myokinausschüttung (Freitas, Gerosa-Neto, Zanchi, Lira & Rossi, 2017; Schoenfeld, 2013).

Die Vermutung, dass metabolischer Stress Einfluss auf die Muskelproteinsynthese hat, stützt sich auf diverse Beobachtungen, bei denen sowohl gesteigerte Hypertrophieeffekte als auch höhere Konzentrationen von Metaboliten beim Widerstandstraining unter hypoxischen Bedingungen festgestellt wurden (Nishimura et al., 2010; S. J. Pearson & Hussain, 2015; Scott, Slattery, Sculley & Dascombe, 2014). Dieser Zusammenhang zwischen metabolischem Stress und dem Auftreten von Hypertrophieeffekten muss allerdings kritisch betrachtet werden, da eine stark erhöhte Metabolitenakkumulation auch bei körperlichen Belastungen (z. B. 400-Meter-Sprint) nachgewiesen wurden, die typischerweise keine signifikanten Effekte auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse besitzen (Hirvonen, Nummela, Rusko, Rehunen & Härkönen, 1992; Morales-Alamo & Calbet, 2014). Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass Widerstandstraining mit kürzeren interseriellen Pausen zu geringeren Effekten auf die Muskelhypertrophie führt als längere interserielle Pausen, obwohl eine kürzere Regenerationspause zwischen den Trainingssätzen zu einer verstärkten Metabolitenakkumulation über die Gesamtheit der Trainingssätze hinweg führt (Grgic, Lazinica, Mikulic, Krieger & Schoenfeld, 2017; Henselmans & Schoenfeld, 2014; McKendry et al., 2016). Darüber hinaus wurde bereits mehrfach nachgewiesen, dass Widerstandstraining mit hohen Lasten auch in relativer Abwesenheit von metabolischem Stress zu vergleichbaren Hypertrophieeffekten führt wie Widerstandstraining mit geringeren Lasten respektive vermehrtem metabolischen Stress, selbst wenn diese unter vergleichbaren Rahmenbedingungen hinsichtlich der muskulären Ausbelastung und dem Trainingsvolumen betrachtet wurden (Carvalho et al., 2022; Lasevicius et al., 2022; Lopez et al., 2021). Trotz der Vermutung, dass das Anschwellen der Muskelzelle infolge von trainingsinduziertem metabolischen Stress tatsächlich zu einem kausalen Anstieg der Muskelproteinsynthese führen kann (Freitas et al., 2017; Lang et al., 1998; Zhou, Naguro, Ichijo & Watanabe, 2016), ist der bedeutendste Einfluss von metabolischem Stress auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse vermutlich eher von indirekter Art.

Da metabolischer Stress zur peripheren Ermüdung beiträgt und bei fortschreitender Dauer der muskulären Arbeit die Fähigkeit zur Krafterzeugung in den rekrutierten motorischen Einheiten beeinflusst, wird das zentrale Nervensystem bei zunehmender peripherer Ermüdung dazu gezwungen, stärkere Innervationsimpulse auszusenden, um größere motorische Einheiten zur Krafterzeugung zu rekrutieren und dadurch die muskuläre Leistung aufrechtzuerhalten (Allen et al., 2008; Gruber & Giboin, 2020, S. 9–10; Henneman & Olson, 1965; Herda, 2022). Die Muskelproteinsynthese wird, wie bereits zuvor erläutert, nur in jenen Muskelzellen gesteigert, die innerhalb des Widerstandstrainings auch einer ausreichenden mechanischen Spannung ausgesetzt waren. Die durch Metabolitenakkumulation beeinflusste periphere Ermüdung sowie die forcierte Rekrutierung von größeren motorischen Einheiten in deren Folge kann als Grundvoraussetzung dafür verstanden werden, dass im Widerstandstraining mit relativ geringen Lasten (z. B. 40% 1-RM) vergleichbare Hypertrophieeffekte erreicht werden können wie mit deutlich höheren Trainingslasten (Carvalho et al., 2022).

Metabolischer Stress könnte dieser Logik folgend als unterstützender Faktor der mechanischen Spannung angesehen werden, der, insbesondere im Widerstandstraining mit deutlich submaximalen Lasten, die Rekrutierung aller motorischen Einheiten und damit die Steigerung der MPS in allen Muskelzellen ermöglicht (Gonzalez et al., 2017). Dieser indirekte Einfluss von metabolischem Stress auf die mechanische Spannung wird durch die Beobachtung untermauert, dass im Widerstandstraining mit geringen Intensitäten ein höheres Maß an peripherer Ermüdung bzw. eine stärkere muskuläre Ausbelastung als bei höheren Belastungsintensitäten erforderlich ist, um optimale Hypertrophieeffekte zu erzielen (Lasevicius et al., 2022). Da metabolischer Stress laut einigen Theorien potenziell dazu in der Lage sein könnte, über diverse Mechanismen auch eine direkte Beeinflussung der Muskelproteinsynthese zu bewirken, kann sein Stellenwert als Mediator von Hypertrophieprozessen auf Basis der existierenden Studienlage noch nicht final beurteilt werden. Nichtsdestotrotz muss der vermutete Einfluss von metabolischem Stress auf die Muskelproteinsynthese selbst im Falle einer zukünftigen Bestätigung desselben in Relation zum Stellenwert der mechanischen Spannung als ungleich kleiner betrachtet werden (Lawson, Vann, Schoenfeld & Haun, 2022; Wackerhage et al., 2019).

Zusammenfassend kann zu den zuvor dargestellten Betrachtungen festgehalten werden, dass es einen wissenschaftlichen Konsens dazu gibt, dass die mechanische Spannung im Kontext des Widerstandstrainings als zentraler Mediator von Hypertrophieprozessen in der Skelettmuskulatur gilt, während der Einfluss der Mikrotraumatisierung der Muskelzelle sowie von metabolischem Stress selbst im Fall einer finalen wissenschaftlichen Bestätigung ihrer Beteiligung am Hypertrophieprozess als verhältnismäßig gering eingeschätzt werden kann (Lim et al., 2022; Schiaffino et al., 2021; Schoenfeld, 2021, S. 56; Wackerhage et al., 2019). Vielmehr gibt der aktuelle Kenntnisstand in diesen Forschungsfeldern Grund zur Vermutung, dass die Mikrotraumatisierung nur als Begleiterscheinung der mechanischen Spannung gilt und metabolischer Stress, insbesondere im Widerstandstraining mit submaximalen Intensitäten, als unterstützender Faktor der mechanischen Spannung angesehen werden kann (Damas et al., 2018; Lasevicius et al., 2022; Lawson et al., 2022).

Aus den genannten Gründen konzentrieren sich die nachfolgenden Kapitel zur Belastungssteuerung im Widerstandstraining primär auf die Beeinflussung der mechanischen Spannung zur Optimierung trainingsinduzierter Hypertrophieeffekte.

## 2.2 Belastungssteuerung im Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse

Das allgemeine Krafttraining gilt als Basis zur Steigerung der allgemeinen und sportlichen Leistungsfähigkeit sowie für die Gesundheitserhaltung (Prävention) und -wiederherstellung (Rehabilitation) in allen Lebensphasen (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 5–6). Der zentrale Inhalt des Krafttrainings ist immer darauf ausgerichtet, durch Muskelkontraktionen innere Kräfte zur Überwindung von externen Widerständen zu erzeugen. Aus diesem Grund wird der Begriff „Widerstandstraining“ als Synonym des Krafttrainings betrachtet, wobei er unter Berücksichtigung des speziellen Anwendungsfalles sogar als präzisere Bezeichnung dieser Trainingsform angesehen werden kann. Da es im Krafttraining immer um die Überwindung von Widerständen, jedoch beispielsweise beim Training zur Beeinflussung rein optisch-ästhetischer Merkmale nicht immer um die gezielte Steigerung der Kraftfähigkeit geht, gilt der Begriff „Widerstandstraining“ als unabhängig von der Trainingszielstellung und damit als universell einsetzbarer Begriff zur Beschreibung der Gesamtheit aller Trainingsformen, die die Überwindung externer Widerstände beinhalten. Als externe Widerstände können sowohl das eigene Körpergewicht als auch eine Vielzahl an Trainingsmitteln, wie geführte Krafttrainingsmaschinen, Seilzugsysteme, Widerstandsbänder oder freie Gewichte, verwendet werden (Hottenrott, Hoos, Stoll & Blazek, 2023, S. 599–600). Im Widerstandstraining lässt sich durch die Krafterzeugung gegen diese externen Widerstände die von Schwameder und Stein (2023, S. 123) erläuterte biologische Wirkung des Widerstandstrainings im Sinne spezifischer Anpassungseffekte der Skelettmuskelmasse und der neuromuskulären Koordination (intra- und intermuskuläre Koordination) erklären. Die Steuerung der Höhe des Widerstandes, der Anzahl an wiederholten Muskelkontraktionen gegen diesen Widerstand sowie weiterer Belastungsparameter bestimmt, in welcher Art und Ausprägung spezifische Anpassungsprozesse durch das Widerstandstraining ausgelöst werden. Für eine effektive und zielspezifische Belastungssteuerung ist es demnach essenziell zu wissen, durch welche physiologischen Anpassungsprozesse die gewünschten Effekte zustande kommen, welche Mediatoren diese Prozesse auslösen und welche zusätzlichen Einflussfaktoren für die kurz- und langfristige Entstehung von Anpassungseffekten existieren (Kapitel 2.1).

Nur bei ausreichender Kenntnis über diese Zusammenhänge ist es in der trainingspraktischen Anwendung möglich, durch die zielgerichtete Manipulation der Belastungsparameter im Widerstandstraining eine spezifische Beanspruchungssituation zu schaffen, die langfristig in den gewünschten Anpassungseffekten resultiert. Das Widerstandstraining muss demnach sowohl hinsichtlich der Qualität als auch der Quantität der Belastung gesteuert werden, um eine trainingswirksame Beanspruchung zur Auslösung spezifischer Anpassungsreaktionen zu erzeugen (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 9–10).

Aus diesem Grund werden nachfolgend verschiedene Ansätze und Parameter zur Belastungssteuerung im Widerstandstraining erläutert und jene Parameter ausführlicher betrachtet, die im Kontext des Themas der vorliegenden Dissertation von besonderer Relevanz sind.

### 2.2.1 Methodik und Parameter der Belastungssteuerung im Widerstandstraining

Die Entwicklung der sportlichen Leistungsfähigkeit durch Training wird laut Hottenrott, Hoos, Stoll und Blazek (2023, S. 575) maßgeblich durch die optimale Konfiguration der Belastungsparameter und deren gegenseitige Beeinflussung bestimmt. Die konkrete Belastungsgestaltung erfolgt dabei in der Regel in Abhängigkeit von Alter, Trainingserfahrung und Geschlecht sowie von der individuellen Belastbarkeit und der Zielsetzung des Trainings. Im Hinblick auf den langfristigen Trainingsprozess sollte die Belastungsgestaltung periodisiert erfolgen, wobei eine zielspezifische Variation der Belastungskonfiguration im Jahresverlauf anzustreben ist (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 14–15).

Zur Erreichung bestimmter Trainingsziele werden verschiedene Belastungsparameter im Widerstandstraining methodenspezifisch festgelegt. Die innerhalb einer solchen Trainingsmethode vorgegebene Belastungskonfiguration bestimmt gemeinsam mit der Übungsauswahl, -variation und -reihenfolge den auf spezifische Funktionssysteme des Körpers einwirkenden Trainingsreiz, wodurch die Zieldimension und das Einsatzgebiet des Widerstandstrainings definiert werden (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 9–10).

Als übergeordnete Belastungsparameter zur Steuerung des Widerstandstrainings werden in Anlehnung an Fröhlich und Kemmler (2020, S. 10) folgende definiert:

- **Belastungsintensität:**  
Stärke des einzelnen Reizes, ausgedrückt in % 1-RM, % X-RM, % MVC oder RPE (subjektives Belastungsempfinden; engl.: „rating of perceived exertion“)
- **Belastungsdichte:**  
zeitliches Verhältnis von Belastungs- und Erholungsphasen innerhalb einer Trainingseinheit, ausgedrückt als Dauer der interseriellen Pause in Sekunden oder Minuten
- **Belastungsdauer:**  
Dauer und Anzahl (Wiederholungen) der Reize innerhalb einer Reizserie, ausgedrückt als zeitliche Dauer der Belastung pro Wiederholung (Sekunden) oder über die gesamte Reizserie (Sekunden oder Minuten)

- Belastungsumfang bzw. -volumen:  
Dauer und Anzahl der Reize innerhalb einer gesamten Trainingseinheit, ausgedrückt als Gesamtdauer (Sekunden oder Minuten), Anzahl der Reizserien (Satzanzahl [n]; engl.: „set volume“), Gesamtwiederholungsanzahl (n) oder Volume Load ([kg] Wiederholungsanzahl × Satzanzahl × Höhe der bewegten Last)
- Belastungshäufigkeit bzw. -frequenz:  
Anzahl der Trainingseinheiten bzw. Belastungsreize in einem zeitlich abgegrenzten Zyklus (z. B. Anzahl [n] der Trainingseinheiten innerhalb einer Woche)

Neben den zuvor dargestellten Beschreibungsgrößen, die als klassische Belastungsparameter bezeichnet werden können, muss diese Auflistung zur präzisen Steuerung der Belastungs- bzw. Beanspruchungssituation sowie der daraus resultierenden Anpassungsprozesse um weitere Parameter ergänzt werden.

Zu diesen erweiterten Belastungsnormativa zählen unter anderem folgende Parameter, die im Kontext der vorliegenden Arbeit von besonderer Relevanz sind (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 10; Toigo & Boutellier, 2006):

- Reizspannungsdauer:  
Zeitspanne innerhalb welcher der mechanische Reiz tatsächlich auf den Muskel einwirkt (engl.: Time under Tension; (TUT))
- Muskelausschöpfung:  
Ausmaß der muskulären Ermüdung, ausgedrückt als Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens
- Bewegungsumfang:  
Reichweite bzw. räumliches Ausmaß der Bewegung (engl.: „Range of Motion“; [ROM])
- Bewegungsausführung:  
Qualitative Merkmale der Bewegungsausführung (Bewegungstechnik und -geschwindigkeit)

- Übungsabbruchkriterium:

Erreichen einer definierten Wiederholungszahl oder Muskelanspannungsdauer, Erreichen des Punktes des momentanen Muskelversagens oder einer definierten Nähe zum Muskelversagen, Nichterreichen eines definierten Bewegungsumfangs oder Veränderung der Übungsausführung (z. B. Unterschreiten einer bestimmten Bewegungsgeschwindigkeit oder Verschlechterung der Bewegungstechnik)

Die dargestellten Belastungsparameter erlauben sowohl die kurz- als auch langfristige Steuerung des Widerstandstrainings sowie der dadurch ausgelösten Anpassungsprozesse. Für die langfristige Belastungssteuerung im Widerstandstraining ist der wöchentliche Gesamtbelastungsumfang von besonderer Bedeutung, der unmittelbar durch den Belastungsumfang pro Trainingseinheit sowie die Belastungshäufigkeit pro Woche beeinflusst wird.

Schoenfeld, Ogborn und Krieger (2017) konnten in einer systematischen Übersichtsarbeit und Metaanalyse zum wöchentlichen Belastungsvolumen im Widerstandstraining auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse feststellen, dass eine abgestufte Dosis-Wirkungs-Beziehung zu bestehen scheint, bei der höhere wöchentliche Belastungsumfänge (>10 Trainingssätze pro Muskelgruppe pro Woche) zu größeren Hypertrophieeffekten führt als moderate (5-9 Trainingssätze pro Muskelgruppe pro Woche) oder geringe Belastungsumfänge (<5 Trainingssätze pro Muskelgruppe pro Woche). Weitere Studien geben Anlass zur Vermutung, dass diese Dosis-Wirkungs-Beziehung interindividuelle Unterschiede hinsichtlich der Höhe des optimalen wöchentlichen Belastungsvolumens aufweist und ab einer bestimmten Höhe des Belastungsvolumens sogar einen negativen Einfluss auf die beobachteten Hypertrophieeffekte besitzt. Dabei konnte bei einigen Individuen ein wöchentlicher Belastungsumfang von über 30 Sätzen pro Muskelgruppe als Optimum identifiziert werden, während in anderen Fällen bereits 10 Trainingssätze pro Muskelgruppe pro Woche als optimales Belastungsvolumen festgestellt wurden (Brigatto et al., 2022; Schoenfeld, Ogborn & Krieger, 2017; Schoenfeld, Contreras et al., 2019).

Schoenfeld (2021, S. 78–84) leitet aus der vorhandenen Studienlage ab, dass im Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse ein wöchentliches Gesamttrainingsvolumen pro Muskelgruppe von ca. 10-20 Trainingssätzen als genereller

Orientierungspunkt verwendet werden sollte, wobei bei Personen mit weit fortgeschrittener Trainingserfahrung ein höheres Belastungsvolumen erforderlich sein könnte.

Hinsichtlich der Frage, auf wie viele Trainingseinheiten pro Woche dieses Gesamttrainingsvolumen verteilt werden sollte, um optimale Hypertrophieeffekte zu erzielen, wurde in einer weiteren systematischen Übersichtsarbeit und Metaanalyse festgestellt, dass die Trainingshäufigkeit keinen signifikanten Einfluss auf die Hypertrophieeffekte zu haben scheint, sofern das erforderliche wöchentliche Belastungsvolumen pro Muskelgruppe erreicht wurde (Schoenfeld, Grgic & Krieger, 2019; Schoenfeld, 2021, S. 86–91).

Bei wissenschaftlicher Betrachtung des Belastungsvolumens über subsequente Trainingssätze innerhalb einer einzelnen Trainingseinheit wurde beobachtet, dass die Anzahl an Wiederholungen pro Trainingssatz positiv beeinflusst werden konnte, sofern längere interserielle Pausenzeiten eingehalten wurden (Grgic et al., 2017). Sofern die durch kürzere interserielle Pausen bedingte Verringerung der Wiederholungsanzahl innerhalb dieser Trainingssätze jedoch durch Ergänzung weiterer Trainingssätze ausgeglichen wurde, konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Hypertrophieeffekte festgestellt werden (Longo et al., 2022). Die generelle Empfehlung hinsichtlich der Belastungsdichte im Widerstandstraining lautet daher aus zeitökonomischer Sicht, dass die interserielle Pause idealerweise mindestens zwei Minuten betragen sollte (Grgic et al., 2017; Schoenfeld, 2021, S. 114). In diesem Zusammenhang kann das Training anderer Muskelgruppen während der interseriellen Pause im Sinne eines sogenannten Supersatzes als zusätzliche Strategie zur Verbesserung der Trainingseffizienz implementiert werden, ohne negative Effekte auf die Skelettmuskelhypertrophie erwarten zu müssen (Iversen, Norum, Schoenfeld & Fimland, 2021).

Im Widerstandstraining zur Steigerung der Maximalkraftleistung wurde ebenfalls eine Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen dem wöchentlichen Belastungsumfang und einer gesteigerten Kraftleistung beobachtet, wobei die erforderliche Anzahl an wöchentlichen Trainingssätzen pro Muskelgruppe etwas geringer zu sein scheint als im Hypertrophietraining (Ralston, Kilgore, Wyatt & Baker, 2017). Ähnlich wie im Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse scheint eine Verteilung des Gesamtbelastungsumfangs auf mehrere Trainingseinheiten pro Woche keinen signifikanten Einfluss auf die Verbesserung der Kraftleistung zu besitzen, wobei es von einem anwendungspraktischen Standpunkt sinnvoll

erscheint, aufgrund der erforderlichen Höhe der Belastungsintensität zur Auslösung neuromuskulärer Adaptationen eine Verteilung des Belastungsvolumens auf mehrere Trainingseinheiten pro Woche zu präferieren (Colquhoun et al., 2018; Gomes, Franco, Nunes & Orsatti, 2019; Grgic et al., 2018).

Die zuvor dargestellten Beobachtungen und Schlussfolgerungen verdeutlichen die übergeordnete Bedeutung des Belastungsvolumens zur langfristigen Steigerung der Skelettmuskelmasse sowie der Kraftleistung durch Widerstandstraining. Im Kontext der kurzfristigen Trainingsplanung innerhalb einer Trainingseinheit sind demgegenüber jedoch andere Belastungsparameter von höherem Stellenwert.

Laut Fröhlich und Kemmler (2020, S. 10) gelten die Belastungsintensität und -dauer als entscheidende Parameter zur unmittelbaren Trainingssteuerung im Widerstandstraining. Der bereits zuvor dargestellten Erweiterung der klassischen Parametern zur Belastungssteuerung folgend besitzen allerdings auch die muskuläre Ermüdung und die Bewegungsgeschwindigkeit einen bedeutenden Einfluss auf die spezifische physiologische Beanspruchungssituation, die durch ein Widerstandstraining erzeugt wird (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 10; Toigo & Boutellier, 2006). Demzufolge müssen diese Parameter zur detaillierten Darstellung der kurzfristigen Belastungssteuerung innerhalb eines Trainingssatzes näher betrachtet werden, um ihren Einfluss auf die Anpassungseffekte im Kontext des Widerstandstrainings adäquat abbilden zu können.

Da die Belastungsintensität und -dauer, die muskuläre Ermüdung sowie die Bewegungsgeschwindigkeit als zentrale Themen der vorliegenden Dissertation gelten, werden diese Belastungsparameter, ihre jeweiligen Einflussfaktoren sowie ihre gegenseitigen Wechselwirkungen nachfolgend in eigenständigen Unterkapiteln detailliert erläutert, um eine ausreichende Verständnisgrundlage zur Identifikation der Problemstellung und Ableitung der allgemeinen Forschungshypothesen, zur Herleitung der Untersuchungsmethodik sowie für die spätere Ergebnisdiskussion zu schaffen.

## 2.2.2 Einfluss von Belastungsintensität und -dauer auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse

Die Belastungsintensität und -dauer stellen jene Belastungsparameter dar, anhand derer einerseits die Höhe des zu überwindenden Widerstandes innerhalb eines Trainingssatzes gesteuert wird und andererseits wie lange bzw. wie häufig der Muskel diesem Widerstand entgegenwirken oder ihn überwinden muss. Dadurch beeinflusst die Belastungsintensität das Ausmaß der Rekrutierung motorischer Einheiten bei der initialen Wiederholung, also wie viele Muskelzellen ab der ersten Wiederholung gleichzeitig gegen diesen Widerstand kontrahieren und dadurch eine mechanische Spannung erfahren. Die Belastungsdauer charakterisiert demgegenüber, wie lange diese Muskelkontraktionen aufrechterhalten werden müssen, bevor ein bestimmtes maximales oder submaximales Ausmaß an muskulärer Ermüdung erzeugt wurde. Da die vollständige Rekrutierung aller motorischen Einheiten eines Muskels, insbesondere bei deutlich submaximalen Lasten, vom Ausmaß der muskulären Ermüdung am Ende eines Trainingssatzes abhängig ist, kann über die Vorgabe der Belastungsdauer auch indirekt gesteuert werden, wie viele Muskelzellen innerhalb eines Trainingssatzes eine mechanische Spannung erfahren (vgl. Kapitel 2.1.1 & 2.1.4; Gonzalez et al., 2017).

Geht man davon aus, dass innerhalb eines Trainingssatzes maximal ermüdend, d. h. bis zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens, gearbeitet wird, so verhalten sich die Höhe der Belastungsintensität und die Anzahl der damit realisierbaren Wiederholungen in der Regel umgekehrt proportional zueinander. Demzufolge lassen sich mit höheren Intensitäten nur wenige Wiederholungen realisieren, während bei geringeren Intensitäten mehr Wiederholungen ausgeführt werden können (Fröhlich & Marschall, 1999; Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 10).

Die Belastungsintensität wird bei deduktiven Steuerungsansätzen im Widerstandstraining entweder als absolute (in Kilogramm) oder relative Lastangaben angegeben. Die relative Lastangabe erfolgt dabei entweder im Verhältnis zur konzentrischen Maximalkraft (% 1-RM) oder orientiert sich an der konkreten Wiederholungszahl (% X-RM), die für einen Trainingssatz vorgesehen ist (Fröhlich & Marschall, 1999; Fröhlich, Schmidtbleicher & Emrich, 2002; Fröhlich, 2011; Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 10). Darüber hinaus hat sich im gesundheitsorientierten Widerstandstraining sowie im Kontext trainingstherapeutischer Anwendungen ein induktiver

bzw. beanspruchungsorientierter Ansatz zur Intensitätssteuerung nach dem subjektiven Belastungsempfinden etabliert (Borg, 2004; Hottenrott et al., 2023, S. 600).

Die relative Angabe der Trainingslast in Relation zum konzentrischen Kraftmaximum (% 1-RM) ist außerhalb der rein gesundheitsorientierten und therapeutischen Anwendungsformen des Widerstandstrainings jedoch am weitesten verbreitet, um die Belastungsintensität innerhalb eines Trainingssatzes unmittelbar zu steuern (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 10).

Auf Basis der gegenseitigen Beeinflussung von Belastungsintensität und -dauer haben sich in der trainingswissenschaftlichen Literatur diverse Belastungsvorgaben etabliert, die entsprechend ihrer spezifischen Konfiguration zur trainingsinduzierten Auslösung bestimmter Anpassungsprozesse dienen sollen. Die realisierbare körperliche Leistung im Widerstandstraining sowie die daraus resultierenden Anpassungsreaktionen des Körpers wurden auf Grundlage verschiedener Beobachtungen mit dem Verhältnis der Belastungsintensität zu der Anzahl ausgeführter Wiederholungen in Verbindung gebracht. Es wurde festgestellt, dass höhere Intensitäten und geringere Wiederholungszahlen zu einer größeren Steigerung der Maximalkraftleistung führen, während geringere Intensitäten und höhere Wiederholungszahlen einen stärkeren Anstieg von Parametern der Kraftausdauerleistung bewirken. Dieser beobachtete Zusammenhang wurde unter der Bezeichnung „strength-endurance-continuum“ zusammengefasst (Campos et al., 2002).

Dies hat dazu geführt, dass die Anpassungsreaktionen des Krafttrainings sowie die zur Erreichung selbiger als optimal angenommenen Vorgaben der Belastungsintensität und -dauer gemäß ihrer Haupteffekte in drei Trainingsbereiche eingeordnet wurden (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 12–13):

- Maximalkrafttraining:  
1–5 Wiederholungen pro Serie, Dauer <20 s, 90–100 % 1-RM
- Hypertrophie- oder Muskelaufbautraining:  
8–15 Wiederholungen., Dauer ca. 20–50 s, 70–85 % 1-RM
- Kraftausdauertraining:  
20–30 Wiederholungen, Dauer ca. 50 s bis 2 min, 50–70 % 1-RM

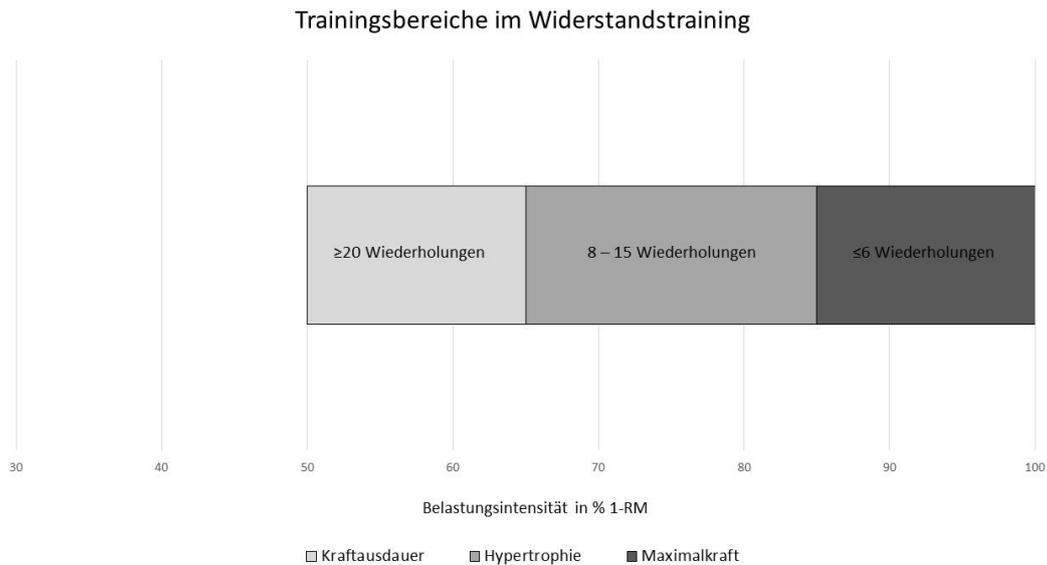


Abb. 5: Trainingsbereiche im Widerstandstraining (modifiziert nach Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 12–13)

Eine grafische Visualisierung dieser Trainingsbereiche (Abb. 5) veranschaulicht, dass innerhalb des von Campos et al. (2002) vorgestellten Kraft-Ausdauer-Kontinuums bzw. der daraus abgeleiteten Trainingsbereiche (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 12–13) in einem niedrigen Intensitätsbereich zunächst eine sportmotorische Anpassungsreaktion (Steigerung der Kraftausdauer) auf das Widerstandstraining erfolgt und im nächsthöheren Trainingsbereich morphologische Anpassungsreaktionen (Steigerung der Skelettmuskelmasse) ausgelöst werden, während im nachfolgenden Trainingsbereich bei annähernd maximalen Belastungsintensitäten erneut sportmotorische Adaptationen (Steigerung der Maximalkraft) dominant sind.

Von einem physiologischen Standpunkt aus betrachtet, erscheint diese intensitätsabhängige Hierarchie der Trainingsbereiche, insbesondere hinsichtlich der Auslösung von Hypertrophieprozessen, unlogisch (vgl. Kapitel 2.1.1 & 2.1.4). Während es hinsichtlich neuromuskulärer Anpassungseffekte zur Steigerung der Maximalkraft erforderlich ist, durch hohe Belastungsintensitäten bereits ab der ersten Wiederholung eine möglichst hohe Anforderung zur Rekrutierung und Frequenzierung motorischer Einheiten zu schaffen, können Hypertrophieprozesse durch ein breites Intensitätsspektrum ausgelöst werden (Carvalho et al., 2022; Lacio et al., 2021; Lopez et al., 2021; Suchomel, Nimphius, Bellon & Stone, 2018).

Dies ist darauf zu begründen, dass die mechanische Spannung im Widerstandstraining als zentraler Mediator zur Steigerung der Muskelproteinsynthese gilt, welche wiederum als

Voraussetzung für eine positive Netto-Muskel-Proteinbilanz zur langfristigen Vergrößerung der Muskelzelle angesehen wird (Kumar et al., 2009; Lim et al., 2022; McGlory et al., 2017; Wackerhage et al., 2019). Die mechanische Spannung sollte innerhalb eines Trainingssatzes auf möglichst alle Muskelzellen der Zielmuskulatur einwirken, um die Hypertrophiereaktion des gesamten Muskels zu optimieren. Hierzu ist es allerdings nicht erforderlich, dass diese mechanische Spannung bereits ab der ersten Wiederholung in allen Muskelzellen gleichzeitig hervorgerufen wird. Für die Auslösung eines optimalen Hypertrophiestimulus ist vielmehr von Bedeutung, dass am Ende eines Trainingssatzes möglichst alle motorischen Einheiten rekrutiert wurden, um das Einwirken von mechanischer Spannung auf alle Muskelzellen zu gewährleisten. Obwohl bei geringen Belastungsintensitäten zu Beginn eines Trainingssatzes nicht alle verfügbaren motorischen Einheiten zur muskulären Krafterzeugung rekrutiert werden müssen, sendet das zentrale Nervensystem bei fortschreitender muskulärer Ermüdung immer höhere Innervationssignale aus, um die muskuläre Leistung durch Rekrutierung der nächstgrößeren motorischen Einheiten aufrechtzuerhalten (Allen et al., 2008; Gonzalez et al., 2017; Herda, 2022).

Aus dieser Betrachtung wird ersichtlich, dass das Ausmaß der mechanischen Spannung in einer Muskelzelle sowie die dadurch ausgelöste Steigerung der Muskelproteinsynthese unabhängig von der Belastungsintensität zu sein scheinen, sofern eine gewisse Mindesthöhe der Intensität sichergestellt (>30 % 1-RM) ist und am Ende des Trainingssatzes ein ausreichendes Maß an muskulärer Ermüdung erreicht wurde (Carvalho et al., 2022; Weakley, Schoenfeld, Ljungberg, Halson & Phillips, 2023). Zur Optimierung des Hypertrophiestimulus in der Zielmuskulatur ist es lediglich erforderlich, dass am Ende eines Trainingssatzes möglichst alle motorischen Einheiten rekrutiert wurden und diese eine ausreichende mechanische Spannung erfahren haben. Auf Grundlage des aktuellen Kenntnisstandes ist es in diesem Kontext allerdings irrelevant, ob diese mechanische Spannung gleichzeitig oder erst nacheinander auf die Muskelzellen einwirkt. Diese intensitäts- bzw. lastunabhängige Wirkung des Widerstandstrainings auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse wurde bereits in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen und war in den vergangenen Jahren mehrfach Gegenstand systematischer Übersichtsarbeiten und Metaanalysen, wobei keine signifikanten Unterschiede zwischen unterschiedlichen Belastungsintensitäten (30-90 % 1-RM) auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse bei unterschiedlichen Personengruppen festgestellt werden konnten, sofern im Widerstandstrainings ein hohes Ausmaß muskulärer Ermüdung sowie ein vergleichbares

Belastungsvolumen in den betrachteten Untersuchungsgruppen vorhanden waren (Carvalho et al., 2022; Grgic, 2020; Lacio et al., 2021; Lopez et al., 2021; Schoenfeld, Grgic, Ogborn & Krieger, 2017).

Auf Basis der existierenden Studienlage kann demzufolge festgehalten werden, dass Hypertrophieeffekte im Widerstandstraining als intensitätsunabhängig (>30 % 1-RM) anzusehen sind und die Effektivität eines breiten Spektrums an Belastungsintensitäten zur Steigerung der Skelettmuskelmasse als gesichert gilt. Der bereits mehrfach angedeutete Einfluss der muskulären Ermüdung im Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse wird im nachfolgenden Unterkapitel 2.2.3 ausführlich thematisiert und wird daher an dieser Stelle nicht näher erläutert.

Unabhängig davon, dass ein übergeordneter Zusammenhang zwischen der Höhe der Belastungsintensität und der Anzahl maximal realisierbarer Wiederholungen zu bestehen scheint, muss die Eignung einer konkreten Wiederholungsvorgabe als Parameter zur Steuerung der Belastungsdauer sowie der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes in Frage gestellt werden. Hierbei muss kritisch angemerkt werden, dass die exakte Steuerung der realisierbaren Wiederholungszahlen bei deduzierten submaximalen Intensitäten in Relation zur Maximalkraft (% 1-RM) als problematisch betrachtet werden muss, da dieser Zusammenhang von zahlreichen Einflussgrößen abhängig ist, was sich in inter- und intraindividuellen Unterschieden äußert (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 10–11).

In diesem Kontext wurde beobachtet, dass die gleiche Intensitätsvorgabe bei unterschiedlichen Trainingsübungen zu einer unterschiedlichen Anzahl maximal realisierbarer Wiederholungen führt (Fröhlich & Marschall, 1999). Diese übungsspezifische Abhängigkeit der realisierbaren Wiederholungszahl wurde durch die Ergebnisse weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen bestätigt und kann demnach als gesichert angesehen werden (Iglesias, Boullosa, Dopico & Carballeira, 2010; Shimano et al., 2006). Dadurch wird ersichtlich, dass eine vorgegebene Belastungsintensität bei der Ausführung unterschiedlicher Übungen durch die gleiche Person unterschiedliche Wiederholungszahlen ermöglicht (Nuzzo, Pinto, Nosaka & Steele, 2023). Diese intraindividuellen Unterschiede des Zusammenhangs zwischen Belastungsintensität und -dauer werden dadurch verstärkt, dass die Kraftleistungsfähigkeit eines Individuums zusätzlich von der Tagesform und Tageszeit abhängig zu sein scheint (Knaier et al., 2019; Knaier et al., 2022). Aus dieser Beobachtung kann die Vermutung abgeleitet werden, dass im

Widerstandstraining mit der gleichen Intensitätsvorgabe in Relation zum konzentrischen Kraftmaximum an unterschiedlichen Tagen und zu unterschiedlichen Tageszeiten auch Unterschiede hinsichtlich der Anzahl maximal realisierbarer Wiederholungen zu erwarten sind. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass die individuelle Belastungsdauer auch von der Bewegungsgeschwindigkeit im Widerstandstraining beeinflusst wird (Trybulski et al., 2022; Wilk et al., 2018; Wilk et al., 2020). Da der Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit nachfolgend in einem eigenständigen Unterkapitel (2.2.4) ausführlich thematisiert wird, findet an dieser Stelle keine nähere Erläuterung hierzu statt.

Neben den festgestellten intraindividuellen Unterschieden scheint die intensitätsspezifische Belastungsdauer auch interindividuell unterschiedlich zu sein. In einer Untersuchung von Shimano et al. (2006) wurde neben dem Einfluss der ausgeführten Übung im Widerstandstraining beobachtet, dass die realisierbare Wiederholungszahl zumindest geringfügig von der Trainingserfahrung bzw. dem Leistungsstand abhängig zu sein scheint. Obwohl die Trainingserfahrung im Widerstandstraining laut dieser Studie nur einen geringfügigen Einfluss besitzt, wurde in einer anderen Untersuchung beobachtet, dass Personen mit unterschiedlicher Ausrichtung des Trainings (kraft- vs. ausdauerorientiertes Training) unterschiedlich viele Wiederholungen mit der gleichen relativen Belastungsintensität ausführen können. Dabei wurde festgestellt, dass Läufer eine signifikant größere Wiederholungsanzahl realisieren konnten als Gewichtheber (Richens & Cleather, 2014).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Zusammenhang der Belastungsintensität und -dauer zahlreichen Einflüssen unterworfen ist, wodurch die exakte Steuerung der Belastungsdauer im Widerstandstraining durch eine konkrete Vorgabe der zu realisierenden Wiederholungsanzahl bei deduzierten submaximalen Intensitäten (% 1-RM) weder möglich noch sinnvoll erscheint. Demzufolge ist auch die Steuerung der muskulären Ermüdung anhand der Wiederholungszahl als nicht oder nur stark eingeschränkt möglich anzusehen.

Durch die zahlreichen Einflussfaktoren des Zusammenhangs zwischen Belastungsintensität und -dauer sowie der dadurch bedingten Ungenauigkeit, entsteht durch die Vorgabe einer konkreten Wiederholungszahl bei vorgegebener Trainingslast immer die Gefahr, dass dadurch eine zu geringe oder zu starke muskuläre Ermüdung erzeugt wird. Die inadäquate Steuerung der muskulären Ermüdung kann im Rahmen des Widerstandstrainings zu ausbleibenden oder

suboptimalen Anpassungseffekten sowie im schlimmsten Fall zu Überlastungserscheinungen und Verletzungen führen. Aufgrund des hohen Stellenwertes der muskulären Ermüdung für die Erzeugung von Anpassungsprozessen im Widerstandstraining, insbesondere der Steigerung der Skelettmuskelmasse, werden die physiologischen Hintergründe der muskulären Ermüdung, ihre Bedeutung im Kontext der Auslösung von Anpassungsreaktionen sowie subjektive Ansätze zur trainingspraktischen Steuerung nachfolgend in Kapitel 2.2.3 thematisiert.

### **Vorstellung des Ebenenmodells der Trainingsbereiche im Widerstandstraining**

Auf Grundlage der zuvor dargestellten Kritik am etablierten Modell der Trainingsbereiche im Widerstandstraining, der belegten Effektivität eines breiten Intensitätsspektrums zur Erzeugung von Hypertrophieeffekten sowie der Kritik an der Eignung von Wiederholungsvorgaben zur Steuerung der Belastungsdauer muss die in der trainingswissenschaftlichen Literatur übliche Darstellung des Kraft-Ausdauer-Kontinuums als überarbeitungsbedürftig angesehen werden (Schoenfeld, Grgic, van Every & Plotkin, 2021).

Daher soll nachfolgend ein überarbeitetes Modell der Trainingsbereiche im Widerstandstraining vorgestellt werden, bei dem im Gegensatz zu bestehenden Modellen eine differenzierte Darstellung der übergeordneten Ebene der Anpassungseffekte vorgenommen wird. Darin wird eine Vorgabe der zielspezifischen Belastungsintensität abgebildet, die in einem (zumindest annähernd) ausbelastenden Training auch die individuelle Belastungsdauer determiniert.

Dem zuvor geäußerten Gedanken folgend, dass eine Verknüpfung von sportmotorischen und morphologischen Anpassungseffekten auf der gleichen Ebene aus trainingswissenschaftlicher Sicht als unlogisch erscheint, da Effekte auf beiden Ebenen gleichzeitig auftreten und sich gegenseitig beeinflussen können, unterscheidet dieses Modell der Trainingsbereiche zwischen einer sportmotorischen und einer morphologischen Anpassungsebene, weshalb es als Ebenenmodell der Trainingsbereiche im Widerstandstraining bezeichnet werden kann (Abb. 6).

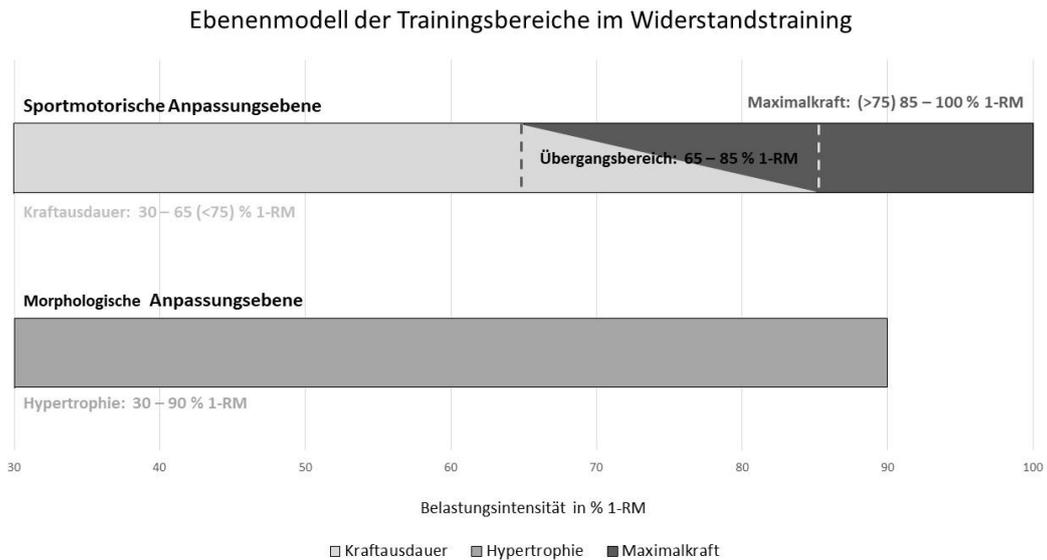


Abb. 6: Ebenenmodell der Trainingsbereiche im Widerstandstraining

Hinsichtlich der sportmotorischen Anpassungseffekte werden die Steigerung der Maximalkraft und der Kraftausdauer als gegenüberliegende Extrempunkte eines Kontinuums dargestellt, da zur Auslösung optimaler Adaptationen dieser Kraftdimensionen große Unterschiede hinsichtlich der spezifischen Belastungsintensität erforderlich sind. Dabei weist das Modell auf der sportmotorischen Ebene einen Bereich des graduellen Überganges zwischen Anpassungen der Maximalkraft und der Kraftausdauer auf, in dem aufgrund der fehlenden Spezifität der Belastungskonfiguration bzw. der Belastungsintensität auf keine der beiden Anpassungsreaktionen ein größerer Anteil entfällt.

### 2.2.3 Einfluss der muskulären Ermüdung auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse

Die Ermüdung kann allgemein als reversible Herabsetzung der Leistungsfähigkeit im Kontext physischer oder psychischer Belastungen verstanden werden. Die unter dem Begriff der Ermüdung zusammengefassten leistungsmindernden Prozesse werden entsprechend der Lokalisation ihrer primären Wirkung in die zentrale und die periphere Ermüdung differenziert (Marées, 2003, S. 657–658). Im spezifischen Kontext des körperlichen Trainings rufen die periphere und zentrale Ermüdung Symptome hervor, die sich sowohl auf der koordinativen als auch auf der konditionellen Ebene in einer Abnahme der sportlichen Leistung äußern und darüber hinaus als größere Anstrengung bzw. Schwierigkeit bei der weiteren Ausführung bestimmter motorischer Aufgaben empfunden werden. Entsprechend der sogenannten „(Integrative) Governor Fatigue Theory“ (Abb. 7) stellen die periphere und zentrale Ermüdung zwei gemeinsam agierende Konstrukte dar, die sowohl physiologischen als auch psychologischen Einflüssen und Anforderungen unterliegen und zusammen über unterschiedliche Mechanismen die Homöostase des menschlichen Organismus beeinflussen (Tornero-Aguilera, Jimenez-Morcillo, Rubio-Zarapuz & Clemente-Suárez, 2022).

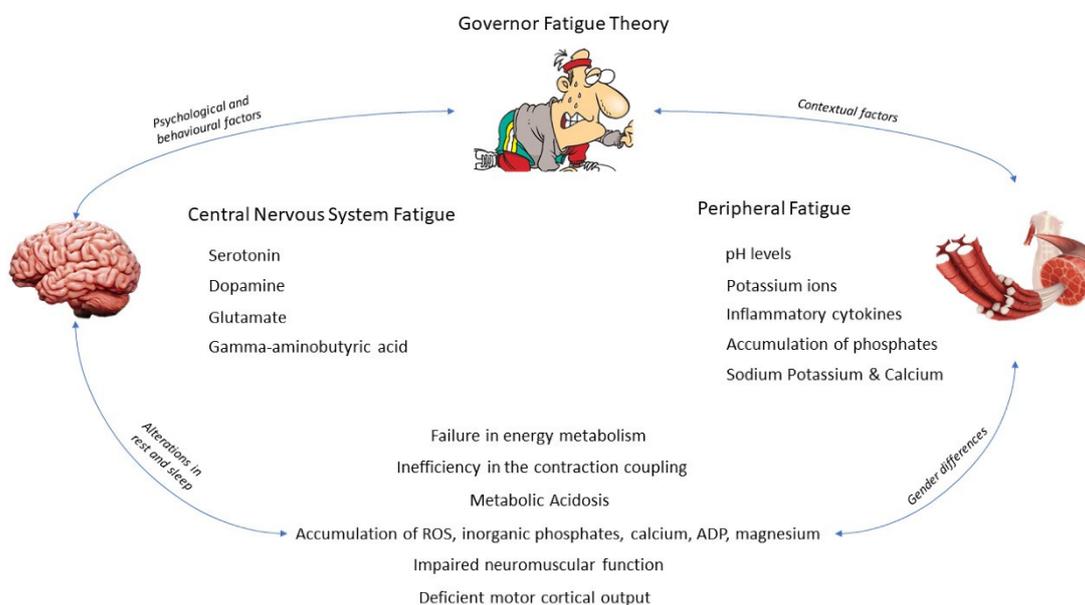


Abb. 7: „(Integrative) Governor Fatigue Theory“ (Tornero-Aguilera et al., 2022)

Die zentrale Ermüdung wird übergeordnet als eine Verringerung der ausgesendeten Innervationssignale sowie einer verschlechterten neuronalen Informationsweiterleitung verstanden. Diese Veränderung der neuronalen Leistungsfähigkeit ist abhängig von Strukturen im Gehirn (u. a. dem präfrontalen Cortex, dem Motorcortex, den Basalganglien und dem Cerebellum) sowie dem Rückenmark, die als zentrales Nervensystem zusammengefasst werden und den dort lokalisierten Ermüdungsprozessen ihre übergeordnete Bezeichnung verleihen. Für die Verringerung der neuronalen Leistung im Kontext körperlicher Aktivität werden laut aktuellen Theorien primär biochemische Veränderungen im Gehirn verantwortlich gemacht, bei denen die Akkumulation von Serotonin, Glutamat, Dopamin und Gamma-Aminobuttersäure (engl.: „gamma-aminobutyric acid“; [GABA]) eine bedeutende Rolle einnimmt. Die ermüdungsbedingte Herabsetzung der Fähigkeit zur Erzeugung und Weiterleitung neuronaler Signale führt bei Unterschreiten einer gewissen Signalhöhe dazu, dass motorische Aufgaben, wie die Auslösung von Muskelkontraktionen sowie die bewegungsspezifische Koordination der Kontraktion mehrerer Muskeln zur gleichen Zeit, nicht mehr adäquat bewältigt werden können. Neben der negativen Beeinflussung der Motorik, äußert sich die zentrale Ermüdung auch in einer Herabsetzung kognitiver Funktionen, wie beispielsweise einer verringerten Aufmerksamkeit, geringerer Konzentrationsfähigkeit und verlängerten Reaktionszeiten, sowie in einer veränderten Stimmung und generellen Verhaltensweise (Tornero-Aguilera et al., 2022; Zajac, Chalimoniuk, Maszczyk, Gołaś & Lngfort, 2015).

Die periphere Ermüdung findet im neuromuskulären System (außerhalb des zentralen Nervensystems) primär auf der Ebene der Muskelzellen und der motorischen Endplatte statt (Tornero-Aguilera et al., 2022). Da sich die unter dem Begriff der peripheren Ermüdung subsumierten Prozesse demzufolge primär in der Muskelzelle oder in ihrem direkten Umfeld der Muskelzelle abspielen, hat sich in der trainingswissenschaftlichen und sportphysiologischen Literatur die Bezeichnung „muskuläre Ermüdung“ als Synonym der peripheren Ermüdung etabliert (Marées, 2003, S. 658). Bei der muskulären Ermüdung kommt es zu einer reduzierten Effizienz der Reizweiterleitung an der motorischen Endplatte sowie zu metabolischen und biochemischen Veränderungen innerhalb der Muskelzelle, die infolge zu einer verringerten Fähigkeit der Muskelzelle zur Krafterzeugung führt. Zu diesen Veränderungen zählen unter anderem die Akkumulation von Metaboliten, wie beispielsweise  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ , Laktat, anorganischem Phosphat, ADP und Magnesium, sowie die Abnahme der intrazellulären

Konzentrationen von Glykogen, Kreatinphosphat und ATP, wodurch die Homöostase der Muskelzellen gestört wird. Eine verstärkte Metabolitenakkumulation sowie Energieverarmung treten primär im Kontext hochintensiver körperlicher Belastungen wie dem Widerstandstraining auf und führen zu einer Beeinträchtigung der Interaktion zwischen den Aktin- und Myosinfilamenten bei der Querbrückenbildung sowie einer Reduktion der ATPase-Aktivität. Dabei sorgen insbesondere die intrazelluläre Anhäufung von anorganischen Phosphaten,  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{H}^+$  für eine zunehmende Hemmung der Bildung von Aktin-Myosin-Querbrücken, wodurch sich die Kontraktionskraft der Muskelzellen subsequent verringert. Bei Betrachtung der ermüdungsbedingten Prozesse an der Zellmembran bzw. der motorischen Endplatte wurde festgestellt, dass es durch eine gestörte Wiederaufnahme des intrazellulären  $\text{Ca}^{2+}$  in das sarkoplasmatische Retikulum (Baylor & Hollingworth, 2012) sowie einer Akkumulation von  $\text{K}^+$  in den T-Tubuli der Muskelzellmembran einerseits zu einer gestörten Ausbreitung des Aktionspotenzials und andererseits zu einer Funktionsminderung des sarkoplasmatischen Retikulums kommt. Als direkte Konsequenz aus diesen Prozessen verringert sich die Fähigkeit der motorischen Einheit zur Erregungs-Kontraktions-Kopplung (engl.: „excitation-contraction coupling“; vgl. Kapitel 2.1.1), bis es bei fortschreitender peripherer Ermüdung schlussendlich zum bioenergetischen Versagen der Muskelzelle kommt und die Kontraktionsfähigkeit der Muskelzelle vollständig zum Erliegen kommt (engl.: „excitation-contraction coupling failure“; [ECCF]). Begründet durch die zuvor erläuterten Prozesse, äußert sich die muskuläre Ermüdung in einer objektivierbaren Abnahme der Fähigkeit zur Kraftproduktion innerhalb eines Muskels (Baylor & Hollingworth, 2012; Calderón, Bolaños & Caputo, 2014; Cè et al., 2020; Marées, 2003, S. 658–659; Tornero-Aguilera et al., 2022; Zajac et al., 2015).

Im Kontext des Widerstandstrainings wird das Ausmaß der muskulären Ermüdung von der konkreten Steuerung der Belastungsparameter beeinflusst. Die konkrete Konfiguration der Belastungsparameter dient im Widerstandstraining dazu, die Höhe der Belastung innerhalb des Trainings zu definieren. Diese objektiv messbare Trainingsbelastung ruft in Abhängigkeit zum Trainingszustand und der Belastbarkeit einer Person eine individuelle Beanspruchung hervor. Diese Beanspruchung (engl.: „internal load“) drückt sich im Ausmaß der hervorgerufenen muskulären Ermüdung als Reaktion auf eine bestimmte Belastung (engl.: „external load“) aus, weshalb die im Widerstandstraining beobachtete Verringerung der Fähigkeit zur muskulären

Krafterzeugung als Indikator der individuellen Beanspruchung angesehen werden kann (Impellizzeri, Marcora & Coutts, 2019).

Bei biomechanischer Betrachtung werden laut Alt und Gollhofer (2023, S. 185) äußere Kräfte bzw. Widerstände sowie deren Momente in Bezug zu einem Drehzentrum als Belastungen verstanden, welche in unterschiedlichem Ausmaß auf die inneren Strukturen des Bewegungsapparates, wie beispielsweise auf die Muskelzellen, wirken. Wirkt eine äußere Kraft auf einen Muskel, so erzeugt diese in Abhängigkeit von der Fähigkeit dieses Muskels, innere Kräfte zu produzieren, eine gewisse Spannung. Da die Fähigkeit zur Kraftproduktion direkt durch den Muskelquerschnitt beeinflusst wird, verringert sich die durch eine äußere Kraft induzierte Muskelspannung, je größer der Muskelquerschnitt ist, auf den diese Kraft einwirkt (Fünten, Faude, Skorski & Meyer, 2023, S. 208; Taber et al., 2019). Demzufolge kann die Spannung eines Muskels als Maß der Beanspruchung verstanden werden. Die Höhe der Belastungsintensität bzw. der Trainingslast definiert dabei, welche akute Beanspruchung in Form einer Zugspannung auf einen Muskel mit einem bestimmten Querschnitt wirkt (Alt & Gollhofer, 2023, S. 185).

Betrachtet man die Ausführung einer einzelnen Wiederholung gegen einen Widerstand, so äußert sich die Beanspruchung entsprechend des Hennemanschen Größenordnungsprinzips (vgl. Kapitel 2.1.1) zunächst in der Anzahl der motorischen Einheiten, die zur Erzeugung der erforderlichen Kraft respektive Spannung rekrutiert werden müssen. Demzufolge wäre beispielsweise die Ausführung einer Wiederholung mit einer Belastungsintensität von 100 % der Maximalkraftleistung (1-RM), bei der alle motorischen Einheiten gleichzeitig zur Krafterzeugung rekrutiert werden müssen, als maximal beanspruchend anzusehen. Gegensätzlich dazu stellt eine einzelne Wiederholung mit einer Belastungsintensität von 30 % des 1-RM nur eine sehr geringe Beanspruchung dar, da aufgrund des geringen Widerstandes nur wenige motorische Einheiten rekrutiert werden müssen. Führt man allerdings mehrere Wiederholungen mit einer geringen Belastungsintensität aus, so nimmt die Kontraktionsfähigkeit der rekrutierten motorischen Einheiten aufgrund der einsetzenden Ermüdungsprozesse immer weiter ab. Das zentrale Nervensystem kompensiert diese Verringerung dadurch, dass höhere elektrische Signale produziert werden, wodurch die nächstgrößeren motorischen Einheiten des Muskels rekrutiert werden, um die muskuläre Leistung aufrechtzuerhalten. Dieser Prozess setzt sich bei fortdauernder Ausführung von Wiederholungen bei submaximalen Belastungsintensitäten so lange fort, bis am Ende eines

ausbelastenden Trainingssatzes alle motorischen Einheiten innerhalb des Muskels aufgrund der zunehmenden muskulären Ermüdung zur Aufrechterhaltung der muskulären Leistung rekrutiert wurden (Gonzalez et al., 2017; Zajac et al., 2015).

Entsprechend der dargestellten Wirkmechanismen wird die Beanspruchung im Widerstandstraining nicht nur durch die initiale Höhe der Belastungsintensität, sondern insbesondere über das Ausmaß der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes beeinflusst. Im Kontext des Trainings zur Vergrößerung der Skelettmuskelmasse ist dies von besonderer Relevanz, da die Steigerung der Muskelproteinsynthese nur in denjenigen Muskelzellen ausgelöst wird, die innerhalb eines Trainingssatzes durch die Kontraktion gegen einen äußeren Widerstand eine mechanische Spannung erfahren haben (vgl. Kapitel 2.1). Demzufolge ist die Auslösung von Hypertrophieprozessen im Widerstandstraining zwar nahezu unabhängig von der Belastungsintensität (vgl. Kapitel 2.2.2), allerdings wird die hypertrophiespezifische Effektivität des Trainings maßgeblich vom Ausmaß der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes beeinflusst (Lasevicius et al., 2022). Die Beanspruchung innerhalb eines Trainingssatzes gilt somit als zentraler Steuerungsparameter im Widerstandstraining zur langfristigen Steigerung der Skelettmuskelmasse (González-Badillo, Sánchez-Medina, Ribas-Serna & Rodríguez-Rosell, 2022).

Nimmt man einen linearen Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der muskulären Ermüdung und dem Ausmaß der im Widerstandstraining ausgelösten Hypertrophieprozesse an, könnte es als sicherste Variante zur Steigerung der Skelettmuskelmasse angenommen werden, jeden einzelnen Trainingssatz im Widerstandstraining ausnahmslos bis zu einem Punkt der maximalen muskulären Ermüdung auszuführen (Dankel et al., 2017). Dieser Punkt wird aufgrund des damit einhergehenden Verlustes der Fähigkeit zur ausreichenden Kraftproduktion gegen den gewählten Widerstand auch als Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens bezeichnet (Steele, Fisher, Giessing & Gentil, 2017).

Im Widerspruch dazu ist die muskuläre Beanspruchung bis zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens hinsichtlich der Netto-Muskelprotein-Bilanz als suboptimal anzusehen, da durch eine maximale Ermüdung auch ein höherer Regenerationsbedarf als bei submaximaler Ermüdung entsteht. Wie in Kapitel 2.1.4 im Kontext der Mikrotraumatisierung der Muskelzelle erläutert wurde, führt eine maximale muskuläre Ermüdung innerhalb eines

Trainingssatzes aufgrund des Anstiegs der intrazellulären Konzentration von  $\text{Ca}^{2+}$  zu einem erhöhten Regenerationsbedarf (Gissel, 2000; Gissel & Clausen, 2001; Gissel, 2005; Morán-Navarro et al., 2017). Aus einer ökonomischen Perspektive muss die maximale muskuläre Ermüdung im Widerstandstraining daher hinsichtlich der Auslösung von Hypertrophieeffekten zumindest in der Theorie, als ineffizient angesehen werden, da dieser erhöhte Regenerationsbedarf die Netto-Muskelprotein-Bilanz verringert (Damas et al., 2018; Kumar et al., 2009). Aus anwendungsorientierter Sicht ist zusätzlich anzumerken, dass eine maximale Ermüdung im Widerstandstraining durch metabolische sowie mechanische Ursachen eine Schädigung der Mikrostruktur hervorrufen kann (EIMD; vgl. Kapitel 2.1.4). Diese trainingsinduzierte Mikrotraumatisierung der Muskelzelle äußert sich ab einem gewissen Ausmaß durch ein verzögertes Eintreten temporärer Symptome, wie beispielsweise eine schmerzhafteste Bewegungsrestriktion, verringerte Kraftleistungsfähigkeit, Steifigkeitsgefühl und Schwellung der betroffenen Muskelstrukturen (engl.: „delayed-onset muscle soreness“; [DOMS]), was aus sportmedizinischer Sicht sogar als milde Form einer Verletzung angesehen wird (Heiss et al., 2019; Hotfiel et al., 2018).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Vermeidung der vollständigen muskulären Ermüdung innerhalb der Trainingssätze eines Widerstandstrainings aus mehreren Gründen als sinnvoll angesehen werden kann, da anderenfalls negative Auswirkungen auf die sportliche Leistungsfähigkeit, den Regenerationsbedarf und die Netto-Muskelprotein-Bilanz sowie eine schmerzbedingte Verringerung der Kontinuität und Adhärenz bei der Umsetzung des Trainingsprogrammes zu erwarten sind (Refalo et al., 2023; J. G. Vieira et al., 2022). Im Hinblick auf die trainingspraktische Steuerung der muskulären Ermüdung stellt sich daher die Frage, ob ein submaximal ermüdendes Training vergleichbare muskuläre Anpassungseffekte hervorrufen kann wie ein Training bis zum Punkt des momentanen Muskelversagens.

Diese Fragestellung wurde mittlerweile durch zahlreiche wissenschaftliche Studien untersucht und deren Ergebnisse auf metaanalytischer Ebene betrachtet, was nachfolgend exemplarisch dargestellt wird.

In einer systematischen Übersichtsarbeit und Metaanalyse von Grgic, Schoenfeld, Orazem und Sabol (2022) wurde festgestellt, dass das Widerstandstraining bis zum Muskelversagen nicht erforderlich zu sein scheint, um eine Steigerung der Kraftleistung sowie der

Skelettmuskelmasse zu erreichen. Die Autoren äußern darüber hinaus, dass ein negativer Einfluss auf das Ausmaß der Trainingseffekte nicht eindeutig festgestellt werden konnte und insbesondere im Kontext des Trainings von älteren Menschen sowie von hochtrainierten Personen weitere Studien erforderlich sind.

Eine weitere systematische Übersichtsarbeit und Metaanalyse zum Vergleich der Effekte von maximaler und submaximaler Ermüdung im Widerstandstraining auf die Leistungsentwicklung und Muskelhypertrophie kam zu der Schlussfolgerung, dass eine submaximale Beanspruchung vergleichbare oder sogar größere Steigerungen der Maximalkraft und Schnellkraft hervorrufen kann als ein maximal ausbelastendes Training. Hinsichtlich der Steigerung der Skelettmuskelmasse konnten keine Unterschiede festgestellt werden, sofern Trainingsprogramme mit gleichen Belastungsvolumen verglichen wurden (A. F. Vieira et al., 2021).

In einer metaanalytischen Betrachtung dieser Fragestellung von Refalo, Helms, Hamilton und Fyfe (2022) wurde als Schlussfolgerung festgehalten, dass ein Widerstandstraining bis zum Muskelversagen gegenüber einem submaximal ermüdenden Training keine überlegenen Effekte hinsichtlich der Skelettmuskelhypertrophie hervorruft. Als Ergänzung dazu wurde geäußert, dass das maximal ausbelastende Widerstandstraining ein größeres Maß an neuromuskulären Ermüdungsprozessen, Mikrotraumata und empfundenem Unbehagen auslöst als ein Training, bei dem das Satzende bereits vor dem Muskelversagen liegt. Die Autoren leiten daraus die praktische Handlungsempfehlung ab, die ständige Beanspruchung bis zum Muskelversagen zu vermeiden, um keine negativen Effekte auf die muskuläre Leistungsfähigkeit, die Regenerationsfähigkeit sowie die langfristige Trainingsadhärenz hervorzurufen, was durch die Ergebnisse weiterer Arbeiten untermauert wird (J. G. Vieira et al., 2022). Allerdings merkten die Autoren der vorgestellten Metaanalyse kritisch an, dass bei den verglichenen Studien kein einheitlicher Konsens zur Definition des Muskelversagens im Widerstandstraining zu bestehen scheint.

Aufgrund dieser Kritik führt die gleiche Forschergruppe um Refalo ein Jahr später erneut eine systematische Übersichtsarbeit und Metaanalyse durch, um den Zusammenhang zwischen der Nähe zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens und der hervorgerufenen Hypertrophieeffekte zu untersuchen (Refalo et al., 2023). Zusammenfassend konstatierten die Autoren, dass es nach aktuellem wissenschaftlichen Kenntnisstand keine Evidenz für die Annahme gibt, dass das Widerstandstraining bis zum Punkt des momentanen konzentrischen

Muskelversagens einem nicht ausbelastenden Training hinsichtlich der Effekte auf die Skelettmuskelhypertrophie überlegen ist. Sie schlussfolgern weiterhin, dass eine stärkere Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens im Widerstandstraining keine stärkere Auslösung von Hypertrophieprozessen verursacht. Es scheint demzufolge eine nicht-lineare Beziehung zwischen der Annäherung an das Muskelversagen (engl.: „proximity to failure“; [PTF]) und der Skelettmuskelhypertrophie zu existieren.

Auf Basis der zuvor dargestellten Ergebnisse kann festgehalten werden, dass es im Widerstandstraining weder zur Vergrößerung der Skelettmuskelmasse noch zur Steigerung der Kraftleistung erforderlich ist, innerhalb der Trainingssätze eine maximale muskuläre Ermüdung bis zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens zu erzeugen. Die von Refalo et al. (2023) vermutete nicht-lineare Beziehung zwischen der PTF und der Hypertrophie sowie der zuvor erläuterte Einfluss der muskulären Ermüdung auf die Auslösung von Hypertrophieprozessen gibt allerdings Anlass zu der Annahme, dass zur Optimierung der Trainingseffekte eine ausreichende Annäherung an den Punkt des momentanen Muskelversagens erreicht werden muss, ohne diesen jedoch tatsächlich zu erreichen. Die aktuelle Evidenz deutet an, dass signifikante Effekte auf die Skelettmuskelhypertrophie bei einer Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens bis auf einen Abstand von ungefähr drei bis vier Wiederholungen zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens (engl.: „repetitions in reserve“) ausgelöst werden (Helms, Cronin, Storey & Zourdos, 2016; Helms et al., 2018; Krzysztofik, Wilk, Wojdała & Gołaś, 2019). Diesbezüglich gilt zu beachten, dass die Trainingserfahrung und der Leistungsstand sowie insbesondere die gewählte Belastungsintensität einen Einfluss auf das erforderliche Ausmaß der Annäherung an das Muskelversagen zur Optimierung der muskulären Trainingseffekte zu besitzen scheinen. Nach aktuellem Kenntnisstand wird hierbei angenommen, dass insbesondere bei geringeren Belastungsintensitäten sowie bei hochtrainierten Personen eine stärkere Annäherung an das Muskelversagen erforderlich ist als bei hohen Intensitäten und niedrigerem Leistungsstand (Lasevicius et al., 2022; Refalo et al., 2023).

Da die Belastungsdauer im Sinne einer Wiederholungszahlvorgabe bei einer bestimmten Trainingslast zahlreichen Einflussfaktoren unterworfen und demnach zur präzisen Steuerung der individuellen Beanspruchung ungeeignet ist, müssen neue Herangehensweisen erschlossen werden, die eine Steuerung der muskulären Ermüdung ermöglichen. Hierzu haben sich mittlerweile mehrere Ansätze zur Steuerung der Annäherung an das Muskelversagen, wie beispielsweise über das subjektive Belastungsempfinden (engl.: „rating of perceived exertion“; [RPE]) oder die geschätzte Anzahl realisierbarer Wiederholungen bis zum Erreichen des Muskelversagens (engl.: „repetitions in reserve“; [RIR]), etabliert (Hackett, Johnson, Halaki & Chow, 2012). Diese Ansätze gelten zwar grundsätzlich als effektiv, unterliegen aber gleichzeitig gewissen individuellen Ungenauigkeiten bei der Steuerung der Annäherung an das Muskelversagen, da diese stark durch individuelle und subjektive Faktoren beeinflusst werden (Helms et al., 2018; Pelland et al., 2022; Zourdos et al., 2021). Pelland et al. (2022) schlagen aus diesem Grund insbesondere die Anwendung eines Ansatzes zur Steuerung der muskulären Ermüdung auf Basis der Bewegungsgeschwindigkeit vor (Morán-Navarro et al., 2019), der in Kapitel 2.3 ausführlich erläutert wird.

## 2.2.4 Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse

Die Bewegungsgeschwindigkeit zählt im Widerstandstraining nicht zu den klassischen Parametern der Belastungssteuerung, sondern ist gemäß des erweiterten Modells der Belastungsnormative als Bestandteil der Bewegungsausführung charakterisiert (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 10; Toigo & Boutellier, 2006).

Sowohl in der Trainingspraxis als auch in trainingswissenschaftlichen Veröffentlichungen wird die Bewegungsgeschwindigkeit häufig als Gesamtdauer einer Einzelwiederholung oder in Form von Kadenzen (z. B. 2/0/1/1) gesteuert, bei denen jeweils die Dauer der exzentrischen Phase, der Haltephase am exzentrisch-konzentrischen Übergang, der konzentrischen Phase sowie der Haltephase am konzentrisch-exzentrischen Übergang in Sekunden angegeben wird (Tavares et al., 2020). Daneben sind auch beschreibende Angaben (z. B. „explosiv“, „schnell“, „zügig“, „langsam“ usw.) üblich, mit denen die Geschwindigkeit der Bewegungsausführung übergeordnet charakterisiert wird (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 13; Wilk, Zajac & Tufano, 2021). Hierbei ist kritisch anzumerken, dass die Vorgabe von beschreibenden Angaben der Bewegungsausführung keine exakte Steuerung der Bewegungsgeschwindigkeit ermöglicht, da dies von der individuellen Interpretation der trainierenden Person abhängig ist. Darüber hinaus ist die Vorgabe von Kadenzen ebenfalls als problematisch anzusehen, da hierbei die tatsächliche Bewegungsgeschwindigkeit von der Größe der trainierenden Person sowie dem räumlichen Ausmaß der Bewegung abhängig ist (Krzysztofik et al., 2021). Eine Steuerung der Geschwindigkeit als physikalische Größe, ausgedrückt in der zurückgelegten Strecke pro Zeiteinheit (z. B. m/s) wäre hierfür deutlich besser geeignet, da dieses Maß intra- und interindividuell standardisiert einsetzbar ist. Für diese Vorgehensweise ist allerdings die Messung und das direkte Feedback der Geschwindigkeit über bestimmte technische Hilfsmittel erforderlich, was an späterer Stelle in Kapitel 2.3 ausführlich erläutert wird.

Gemäß des zweiten Newtonschen Axioms (alt.: Aktionsprinzip; vgl. Kapitel 2.1.1) wird eine bestimmte Masse (z. B. eine Last in Form einer Langhantel) in Abhängigkeit zu der auf sie wirkenden Kraft beschleunigt (Schwameder & Stein, 2023, S. 123). Daraus ergibt sich, dass eine Last, deren Gravitationskraft deutlich geringer ist als die maximale willkürlich realisierbare Kraftleistung des neuromuskulären Systems, sehr stark beschleunigt werden kann. Je stärker

sich die Gravitationskraft der Last an die Maximalkraftleistung einer Person annähert, desto weniger kann diese Last beschleunigt werden. Die auf eine Last wirkende Beschleunigung bedingt im Widerstandstraining bei der Ausführung einer bestimmten Bewegung mit einem definierten räumlichen Umfang eine spezifische Bewegungsgeschwindigkeit. Diese Wechselwirkung setzt sich bei isolierter Betrachtung so lange fort, bis die Gravitationskraft der Last die Höhe der dynamischen Maximalkraft erreicht und nicht mehr konzentrisch bewegt werden kann, sondern nur noch in ihrer Position gehalten oder ihr kontrolliert nachgegeben werden kann (Fernandes et al., 2021; García-Ramos, Haff et al., 2018; Marées, 2003, S. 184).

Der Zusammenhang zwischen dem Lastwiderstand und der Verkürzungsgeschwindigkeit eines Muskels wurde erstmalig auf Basis der frühen Arbeit von Hill (1938) nachgewiesen und ist unter der Bezeichnung Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung (engl.: „force-velocity-relationship“) bekannt (Alcazar, Csapo, Ara & Alegre, 2019; Lin, 2009; Marées, 2003, S. 184–186).

Aus dieser Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung leitet sich auf Grundlage der bei einer Bewegung durch alle beteiligten Muskeln erzeugten Kontraktionskraft ein Zusammenhang zwischen der Belastungsintensität, ausgedrückt als Höhe der Last in Relation zur Maximalkraftleistung, und der maximal möglichen Bewegungsgeschwindigkeit beim Bewegen dieser Last ab (vgl. Kapitel 2.3). Demzufolge können bei Betrachtung eines Individuums mit einem definierten neuromuskulären Maximalkraftpotenzial bei einer bestimmten Bewegung mit unterschiedlichen Lasten unterschiedlich hohe maximale Bewegungsgeschwindigkeiten erzeugt werden, sofern unabhängig von der Höhe der aufgelegten Last bei jeder Wiederholung volitional maximale Krafteinsätze realisiert werden. Die Erzeugung maximal willkürlicher Krafteinsätze setzt voraus, dass möglichst viele motorische Einheiten zur Muskelkontraktion rekrutiert werden (vgl. Kapitel 2.1.1). Das Ausmaß der Rekrutierung motorischer Einheiten ist somit nicht nur abhängig von der Belastungsintensität, sondern auch von der Bewegungsgeschwindigkeit, da sowohl zur langsamen Bewegung hoher Lasten als auch zur schnellen Bewegung niedriger Lasten hohe Kräfte erforderlich sind (Gonzalez et al., 2017; Herda, 2022; Mc Dermott, Balshaw, Brooke-Wavell, Maden-Wilkinson & Folland, 2022).

Hinsichtlich des Einflusses der Bewegungsgeschwindigkeit auf die Auslösung von Hypertrophieprozessen könnte demzufolge angenommen werden, dass bei schnellstmöglichen Kontraktionen gegen einen Widerstand, unabhängig von dessen Höhe, immer eine hohe mechanische Spannung auf den gesamten Muskel wirkt, da in beiden Fällen hohe Kraftanforderungen bestehen. Im Umkehrschluss ließe sich daraus ableiten, dass bei bewusst

langsamen Kontraktionen gegen einen submaximalen Widerstand auch die auf den gesamten Muskel einwirkende mechanische Spannung nur gering ist, da die Kraftanforderung dieser Bewegung ebenfalls gering ist. Dieser theoretischen Annahme folgend, wäre die Realisierung volitional maximaler Bewegungsgeschwindigkeiten gegen eine bestimmte Last im Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse besser geeignet als volitional submaximale Bewegungsgeschwindigkeiten. In diesem Kontext ist allerdings unbedingt zu beachten, dass für die Auslösung von Hypertrophieprozessen nicht die Spannung des gesamten Muskels, sondern die auf eine einzelne Muskelzelle einwirkende mechanische Spannung entscheidend ist (Lim et al., 2022; Schiaffino et al., 2021; Wackerhage et al., 2019).

Aus diesem Grund muss zur genaueren Beurteilung des tatsächlichen Einflusses der Bewegungsgeschwindigkeit auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse auch die Wechselwirkung zwischen der Verkürzungsgeschwindigkeit einer Muskelzelle und ihrer Fähigkeit zur Krafterzeugung berücksichtigt werden. Betrachtet man statt des ganzen Muskels eine einzelne Muskelzelle bei unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten, so wird ersichtlich, dass sich die Anzahl der gleichzeitig bildbaren Querbrücken zwischen Aktin und Myosin umgekehrt proportional zur Verkürzungsgeschwindigkeit der Muskelzelle verhält (Alcazar et al., 2019; Piazzesi et al., 2007; Abb. 8).

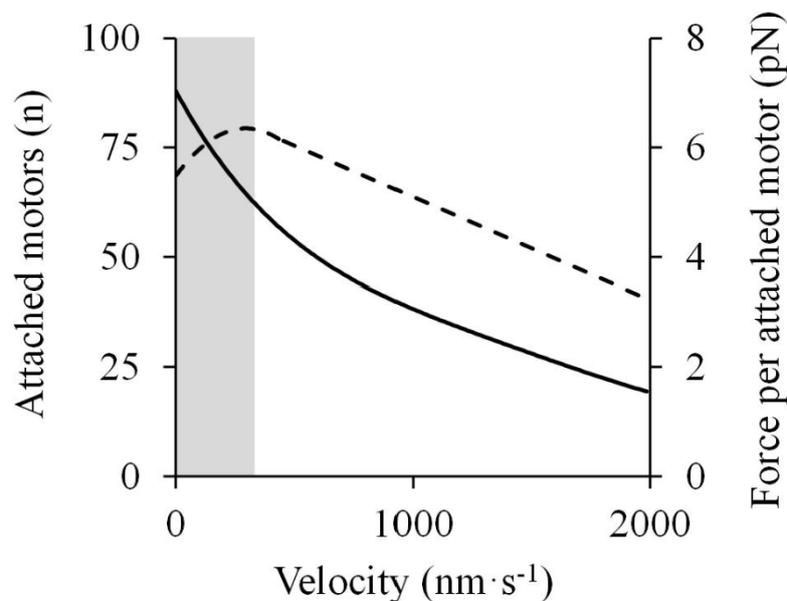


Abb. 8: Zusammenhang zwischen der Verkürzungsgeschwindigkeit, der Anzahl aktiver Querbrücken und der Kontraktionskraft einer Muskelzelle nach Piazzesi et al. (2007) (modifiziert nach Alcazar et al., 2019)

Aufgrund der hohen Verkürzungsgeschwindigkeit müssen die Aktin- und Myosinfilamente in einer höheren Frequenz miteinander interagieren, da eine zu hohe Anzahl aktiver Querbrücken eine schnelle Zunahme des Überlappungsgrades der Mikrostrukturen innerhalb der Sarkomere verhindern würde. Demzufolge kann bei hohen Verkürzungsgeschwindigkeiten nur eine geringere Anzahl an Aktin-Myosin-Verbindungen zur gleichen Zeit aktiv sein als bei langsameren Kontraktionen, was gleichzeitig bedeutet, dass bei hohen Verkürzungsgeschwindigkeiten geringere Kräfte als bei langsameren Kontraktionen auf die einzelnen Muskelzellen wirken (Piazzesi et al., 2007).

Da die mechanische Spannung, wie bereits in Kapitel 2.1.4 aufgezeigt wurde, unmittelbar von der in einer Muskelzelle durch Kontraktion erzeugten Kraft abhängig ist, resultieren langsamere Verkürzungsgeschwindigkeiten im Widerstandstraining in einer höheren mechanischen Spannung der Muskelzelle (Alcazar et al., 2019; Hill, 1938; Lin, 2009; Piazzesi et al., 2007).

Die Verkürzungsgeschwindigkeit und die durch sie bedingten Unterschiede hinsichtlich des Ausmaßes der Kontraktionskraft pro Muskelzelle sind dafür verantwortlich, dass langsame und schnelle Bewegungen bei submaximalen Belastungsintensitäten unterschiedliche neuromuskuläre Rekrutierungsmuster aufweisen. Bei langsamen Muskelkontraktionen müssen durch die größere Krafterzeugung pro Muskelzelle und die insgesamt geringere Kraftanforderung im nicht ermüdeten Zustand nur wenige motorische Einheiten rekrutiert werden. Bei schnellen Bewegungen hingegen müssen aufgrund der insgesamt höheren Kraftanforderung und der niedrigeren Krafterzeugung pro Muskelzelle bereits ab der ersten Wiederholung mehr motorische Einheiten rekrutiert werden. Im Hinblick auf die Zielsetzung im Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse kann als physiologisches Ziel eines Trainingssatzes angesehen werden, dass an dessen Ende eine möglichst vollständige Rekrutierung aller motorischen Einheiten sowie eine möglichst hohe mechanische Spannung pro Muskelzelle erreicht wird, um die Auslösung der Hypertrophieprozesse zu optimieren (vgl. Kapitel 2.1.4, 2.2.2 & 2.2.3).

Bei Ausführung mehrerer Wiederholungen ist am Ende eines Trainingssatzes aufgrund der ermüdungsbedingten Reduktion der Kraftleistung (vgl. Kapitel 2.2.3) sowohl eine abnehmende Bewegungsgeschwindigkeit als auch eine zunehmende Rekrutierung motorischer Einheiten zu beobachten, um die muskuläre Leistung möglichst lange aufrechtzuerhalten (Fernandes et al., 2021; Gonzalez et al., 2017; Morán-Navarro et al., 2019; Morgan, Clafin & Julian, 1991; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011; vgl. Kapitel 2.3). Dadurch kann angenommen

werden, dass es hinsichtlich der mechanischen Spannung sowie der Auslösung von Hypertrophieprozessen irrelevant zu sein scheint, mit welcher initialen Bewegungsgeschwindigkeit man den Trainingssatz begonnen hat, solange eine ausreichende Annäherung an das Muskelversagen erreicht wird (vgl. Kapitel 2.2.3) und die initiale Bewegungsgeschwindigkeit zumindest so hoch ist, dass eine ausreichend hohe Krafterzeugung zur Entstehung mechanischer Spannung erforderlich ist.

Diese Annahme konnte in einer systematischen Übersichtsarbeit und Metaanalyse von Schoenfeld, Ogborn und Krieger (2015) zum Einfluss der Einzelwiederholungsdauer auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse bestätigt werden. Die Autoren kamen dabei zu der Schlussfolgerung, dass ein breites Spektrum an Bewegungsgeschwindigkeit, ausgedrückt als Gesamtdauer der Einzelwiederholungen zwischen 0,5 und 8 Sekunden, zur Auslösung von Skelettmuskelhypertrophie geeignet ist, wobei keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeiten festgestellt werden konnten. Die betrachtete Studienlage deutet ihrer Aussage zufolge darauf hin, dass sehr langsame Wiederholungen (>10 Sekunden) weniger gut zur Steigerung der Skelettmuskelmasse geeignet sind. In einer späteren Buchveröffentlichung des Hauptautors, in der er die Ergebnisse dieser Übersichtsarbeit in aktualisierter Form erneut aufgriff, wurde der optimale Geschwindigkeitsbereich zur Auslösung von Hypertrophieprozessen auf den Bereich von 0,5 bis 6 Sekunden korrigiert und eine differenzierte Empfehlung für die konzentrische (1–3 Sekunden) sowie exzentrische Phase (>2 Sekunden) ausgesprochen (Schoenfeld, 2021, S. 116–118). Darin wurde zudem weiterhin zur Vermeidung sehr langsamer Wiederholung geraten, was durch ein aktuelles Umbrella-Review bekräftigt werden konnte (Bernárdez-Vázquez, Raya-González, Castillo & Beato, 2022).

Die Eignung eines breiten Spektrums unterschiedlicher Bewegungsgeschwindigkeiten zur Auslösung von Hypertrophieprozessen wurde durch eine weitere systematische Übersichtsarbeit untermauert, wobei auch hier weder schnelle noch langsame Wiederholungen einen überlegenen Effekt auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse bewirken.

Hinsichtlich der Steigerung der Maximalkraftleistung empfehlen die Autoren jedoch schnellere Bewegungsgeschwindigkeiten, da diese im Zusammenhang mit einem höheren neuronalen Adaptationsstimulus zu stehen scheinen (Wilk et al., 2021). Diese Empfehlung zur Verwendung höherer Bewegungsgeschwindigkeiten zur Verbesserung der Maximalkraftleistung wird von

den Ergebnissen weiterer Untersuchungen bekräftigt, insbesondere wenn deutlich submaximale Belastungsintensitäten verwendet werden (Claflin et al., 2011; Davies, Kuang, Orr, Halaki & Hackett, 2017).

Darüber hinaus wurde von Wilk et al. (2018) festgestellt, dass eine moderate Bewegungsgeschwindigkeit im Vergleich zu schnellen Bewegungen zu einer größeren Muskelspannungs- bzw. Belastungsdauer (TUT) innerhalb eines Trainingssatzes sowie zu einem höheren Belastungsvolumen insgesamt führt. Zu ähnlichen Ergebnissen hinsichtlich der Beeinflussung der TUT und des Belastungsvolumens kam eine weitere Studie (Trybulski et al., 2022), was laut entsprechenden wissenschaftlichen Untersuchung von Martins-Costa et al. (2022), Schoenfeld et al. (2019) sowie Brigatto et al. (2022) zu größeren Hypertrophieeffekten führt.

Zusammenfassend kann zum Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse festgehalten werden, dass sowohl langsame als auch schnelle Wiederholungen zur Auslösung von Hypertrophieprozessen geeignet zu sein scheinen. Aufgrund der vorteilhaften Effekte moderater und langsamer gegenüber schnellen Wiederholungen zur Erzeugung größerer Belastungsumfänge sowie zur Vermeidung einer Beeinträchtigung der Bewegungsqualität im Allgemeinen (Bennett et al., 2021) kann aus anwendungsorientierter Sicht, insbesondere für nicht leistungsorientiert Trainierende, die Verwendung von submaximalen bzw. kontrollierten Geschwindigkeiten als sinnvoll erachtet werden.

## 2.3 Geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung im Widerstandstraining

Im Gegensatz zu „traditionellen“ last- und wiederholungsbasierten Steuerungsansätzen wird beim geschwindigkeitsbasierten Ansatz der Belastungssteuerung (engl.: „velocity based training“; [VBT]) nicht der verwendete Widerstand, sondern die realisierbare Bewegungsgeschwindigkeit gegen diesen Widerstand als zentraler Steuerungsparameter verwendet. Um eine Belastungssteuerung nach dem geschwindigkeitsbasierten Ansatz in der Trainingspraxis umsetzen zu können, wird die Bewegungsgeschwindigkeit der verwendeten Last, in der Regel eine Langhantel, über lineare Positionsgeber (engl.: „linear position transducer“; [LPT]), optische bzw. kamerabasierte Messsysteme oder Inertialsensoreinheiten (engl.: „inertial measurement unit“; [IMU]; Abb. 9) zur Positions- und Geschwindigkeitserfassung ermittelt und als Live-Feedback im Widerstandstraining angezeigt (Mann & Kazadi, 2016, S. 6–13; Weakley et al., 2021).



Abb. 9: Inertialsensoreinheit zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining

(BM Sports Technology GmbH, 2022b)

Physikalisch betrachtet, basiert die geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung auf dem Aktionsprinzip nach Newton (vgl. Kapitel 2.1.1). Unter Berücksichtigung der individuellen und tagesformabhängigen Kraftleistungsfähigkeit der Trainierenden kann eine definierte Last bei volitional maximalem Krafteinsatz eine spezifische maximale Beschleunigung erfahren, die sich bei begrenztem Bewegungsumfang in einer konkreten Bewegungsgeschwindigkeit ausdrückt (vgl. Kapitel 2.2.4). Dieser Zusammenhang ist in der trainingswissenschaftlichen und sportphysiologischen Literatur als Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung bekannt und basiert auf den frühen Forschungsarbeiten von Hill (1938), der bei isotonischen Kontraktionen isolierter Muskeln von Fröschen herausfand, dass die grafische Darstellung des Verhältnisses zwischen der erzeugten Kontraktionskraft und der Verkürzungsgeschwindigkeit die Form einer Hyperbel besitzt. Die hyperbelförmige Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung bei isotonischen Kontraktionen isolierter Muskeln nach Hill (Abb. 10) kann allerdings nicht uneingeschränkt auf das Widerstandstraining mit auxotonen Kontraktionen bei dynamischen Bewegungen in einem oder mehreren Muskel-Gelenk-Systemen übertragen werden (Alcazar et al., 2019; Hill, 1938).

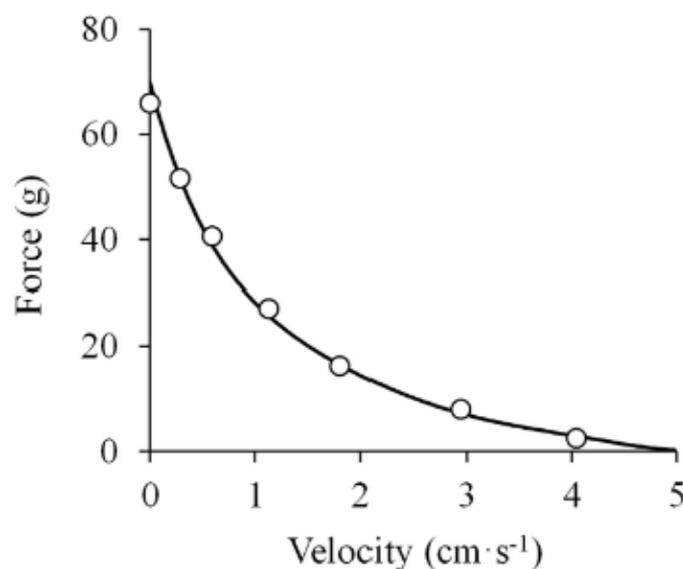


Abb. 10: Hyperbelförmige Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung bei isotonischen Kontraktionen isolierter Muskeln nach Hill (1938) (modifiziert nach Alcazar et al., 2019)

Bei in vivo-Betrachtungen von dynamischen konzentrischen Muskelkontraktionen müssen neben der Kontraktionsgeschwindigkeit der Muskelzelle zusätzlich die Kraft-Längen-Beziehung der Muskelzellen, die individuelle dynamische Maximalkraft, die positionsabhängige

Veränderung der Gelenkmomente und der neuromuskulären Ansteuerung während der Bewegung, die Muskelarbeitsweise und Kontraktionsform sowie insbesondere der individuelle Bewegungsumfang berücksichtigt werden (Clark, Lambert & Hunter, 2012; Lin, 2009; List, Gülay, Stoop & Lorenzetti, 2013; Marées, 2003, S. 183–184; Morgan et al., 1991; Piazzesi et al., 2007). Überträgt man das hyperbelförmige Modell der isotonischen Kontraktion eines isolierten Muskels auf dynamische Bewegungen mit auxotoner Muskelkontraktion gegen einen Widerstand sowie einem definierten Bewegungsumfang, so ergibt sich durch die zuvor genannten zusätzlichen Einflussgrößen ein linearer Zusammenhang zwischen der Höhe der Last in Relation zur dynamischen Maximalkraft und der realisierbaren Durchschnittsgeschwindigkeit in der konzentrischen Phase dieser Bewegung (Jaric, 2015). Obwohl bei sehr niedrigen Lasten bzw. Belastungsintensitäten eine minimale Abweichung der Linearität dieses Zusammenhangs festgestellt wurde, hat sich die Anwendung eines linearen Modells (Abb. 11) zur Beschreibung der Relation zwischen der relativen Lasthöhe und der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit über ein breites Spektrum an Belastungsintensitäten sowie bei verschiedenen Übungen, Ausführungsvarianten und Testprotokollen als vertretbar erwiesen, sofern dabei immer ein volitional maximaler Krafteinsatz erfolgt (Alcazar et al., 2019; Cuevas-Aburto, Ulloa-Díaz, Barboza-González, Chiroso-Ríos & García-Ramos, 2018; Helms et al., 2017).

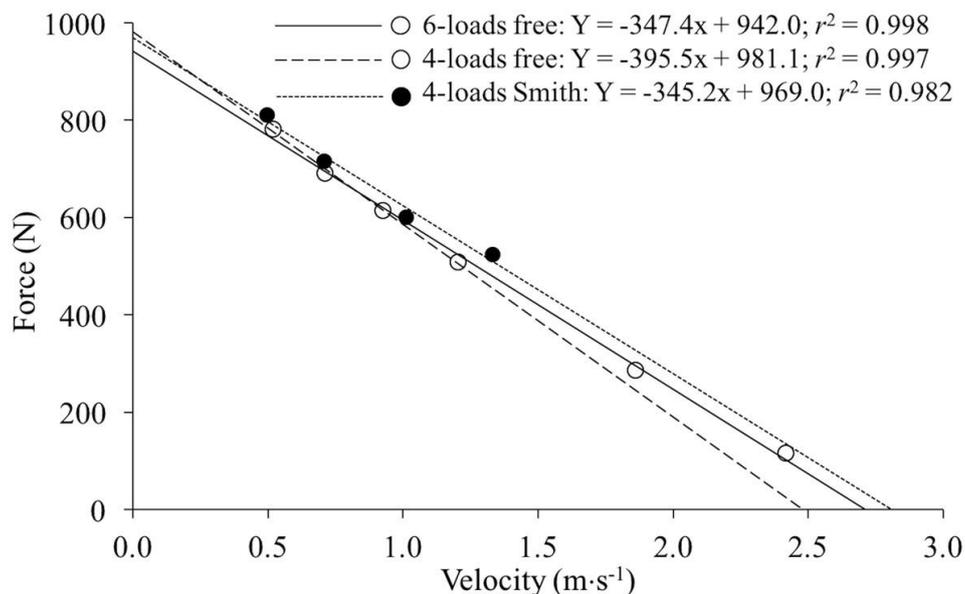


Abb. 11: Lineare Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung („force-velocity-relationship“) bei verschiedenen Test- und Ausführungsvarianten der Übung Langhantel-Bankdrücken (Cuevas-Aburto et al., 2018)

Führt man eine Bewegung gegen einen bestimmten Widerstand wiederholt mit maximalen Kräfteinsätzen aus, so verringert sich aufgrund der zunehmenden Ermüdung der beteiligten Funktionssysteme des Körpers die Fähigkeit zur neuromuskulären Krafterzeugung zunehmend (Marées, 2003, S. 657–659; vgl. Kapitel 2.2.3). Durch die sukzessive Verringerung der Kraftleistungsfähigkeit innerhalb eines Trainingssatzes reduziert sich folglich auch die erreichbare Beschleunigung der Last und damit die objektiv feststellbare konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit von Wiederholung zu Wiederholung. Die konzentrische Durchschnittsgeschwindigkeit der Bewegung bzw. der bewegten Last nimmt innerhalb des Trainingssatzes demzufolge immer weiter ab, bis die realisierbare Muskelkraft keine ausreichende Höhe mehr besitzt, um die Gravitationskraft der Last zu überwinden, wodurch keine weitere (vollständige) Wiederholung mehr ausgeführt werden kann. Die Reduktion der konzentrischen Durchschnittsgeschwindigkeit einer Bewegung kann diesem Zusammenhang folgend als objektiv messbarer Indikator der muskulären Ermüdung angesehen und zur beanspruchungsorientierten Steuerung der Belastungsdauer im Widerstandstraining verwendet werden (Izquierdo et al., 2006; Morán-Navarro et al., 2019).

Beim Velocity Based Training steuert man die Belastungsintensität demnach nicht über den Widerstand selbst, sondern über die volitional maximale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit gegen einen bestimmten Widerstand (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Weakley et al., 2021). Darüber hinaus kann durch Erfassung der Wiederholungsanzahl sowie des intraseriellen Geschwindigkeitsverlustes der Grad der neuromuskulären Ermüdung erfasst werden, um darüber die Belastungsdauer innerhalb eines Trainingssatzes zu steuern und somit das Ausmaß der muskulären Beanspruchung zu kontrollieren (González-Badillo, Yañez-García, Mora-Custodio & Rodríguez-Rosell, 2017; Hughes, Banyard, Dempsey, Peiffer & Scott, 2019; Izquierdo et al., 2006; Morán-Navarro et al., 2019; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011; Weakley et al., 2021).

Dadurch kombiniert die geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung die Vorzüge von deduktiven und induktiven Ansätzen zur Belastungssteuerung, da tagesformabhängige Veränderungen der Leistungsfähigkeit und die Annäherung an das Muskelversagen über die Bewegungsgeschwindigkeit objektiv quantifiziert und gesteuert werden können (Weakley et al., 2021).

Traditionelle bzw. last- und wiederholungsbasierte Steuerungsansätze sind demgegenüber in mehrerlei Hinsicht weniger gut dazu geeignet, die Beanspruchung im Widerstandstraining adäquat zu steuern und dadurch die Auslösung trainingsinduzierter Anpassungsprozesse zu optimieren (vgl. Kapitel 2.2). Durch die Möglichkeit zur Berücksichtigung tagesformabhängiger Schwankungen der neuromuskulären Leistungsfähigkeit und der allgemeinen körperlichen Belastbarkeit sowie zur individualisierten Steuerung der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes ermöglicht Velocity Based Training eine objektive Autoregulation der Belastungssteuerung im Widerstandstraining (Greig et al., 2020; Mann & Kazadi, 2016, S. 6–8).

Nachfolgend wird die trainingspraktische Anwendung des geschwindigkeitsbasierten Ansatzes zur individualisierten Steuerung der Belastungsintensität sowie der muskulären Ermüdung im Kontext des Widerstandstrainings ausführlich erläutert.

### 2.3.1 Geschwindigkeitsbasierte Steuerung der Belastungsintensität

Die Belastungsintensität wird im Widerstandstraining üblicherweise durch die Vorgabe einer konkreten Last in Relation zur dynamischen Maximalkraft (% 1-RM) gesteuert (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 10).

Mehrere wissenschaftliche Studien zur Untersuchung des Einflusses der Tagesform sowie der Tageszeit auf die Maximalkraft deuten allerdings darauf hin, dass die realisierbare Kraftleistung teils beträchtlichen Schwankungen unterliegt (Knaier et al., 2019; Knaier et al., 2022). Die Verwendung einer Lastvorgabe in Relation zur Kraftleistung ist aufgrund der Beeinflussung durch Tagesform und Tageszeit als suboptimal anzusehen. Darüber hinaus verändert sich die Kraftleistung aufgrund der im Widerstandstraining ausgelösten Trainingsanpassungen über mehrere Wochen teilweise drastisch. Beispielsweise beobachteten Jenkins et al. (2017) in einer Studie, dass die Maximalkraft (1-RM) durch Widerstandstraining innerhalb von sechs Wochen um 28 Prozent gesteigert werden konnte.

Demzufolge erscheint die relative Lastvorgabe auf Basis der Maximalkraft bei Betrachtung eines mehrwöchigen Trainingszyklus ebenfalls als ungenau, da die vor Beginn eines Trainingszyklus erhobenen Ausgangswerte der Maximalkraft bereits nach wenigen Wochen des Trainings nicht mehr als repräsentativ für die tatsächliche Maximalkraftleistung angesehen werden können.

Da die Kraftleistung demzufolge sowohl kurz- als auch langfristigen Schwankungen unterworfen ist, wäre es zur präzisen Steuerung der Belastungsintensität durch die Vorgabe einer Last in Relation zur Maximalkraftleistung erforderlich, vor jeder Trainingseinheit eine Testung der Maximalkraft vorzunehmen, was aus anwendungsorientierter sowie trainingswissenschaftlicher Sicht weder zielführend noch praktikabel erscheint.

Auch die Ergänzung der Lastvorgabe um induktive Steuerungsparameter, wie beispielsweise die Zielvorgabe eines bestimmten subjektiven Belastungsempfindens (z. B. RPE), kann diese Schwankungen der Kraftleistung nicht vollständig kompensieren, weshalb diverse Publikationen die Implementierung objektiver Steuerungsparameter und moderner Strategien zur Autoregulation der Belastungssteuerung empfehlen (Helms et al., 2017; Hickmott, Chilibeck, Shaw & Butcher, 2022; Larsen, Kristiansen & van den Tillaar, 2021).

Autoregulation wird im Kontext des sportlichen Trainings als Prozess definiert, bei dem die Belastungssteuerung innerhalb einer Trainingseinheit der aktuellen individuellen

Leistungsfähigkeit einer Person angepasst wird, der auch zur Periodisierung des Trainings verwendet werden kann (Greig et al., 2020; Mann, Thyfault, Ivey & Sayers, 2010). Die Höhe der volitional maximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit, die gegen einen bestimmten Lastwiderstand realisiert werden kann, gilt entsprechend der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung als Ausdruck der aktuellen individuellen Maximalkraftleistung einer Person (Loturco et al., 2017; Picerno et al., 2016). Der geschwindigkeitsbasierte Ansatz der Belastungssteuerung gilt daher als adäquate Strategie zur Autoregulation der Belastungsintensität im Widerstandstraining (Banyard, Tufano, Delgado, Thompson & Nosaka, 2019; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Larsen et al., 2021).

Da es zur praktischen Durchführung eines Widerstandstrainings auch bei der Anwendung der geschwindigkeitsbasierten Intensitätssteuerung erforderlich ist, eine konkrete Last vorzugeben, mit der im Widerstandstraining eine spezifische Beanspruchungssituation geschaffen werden soll, wird die Vorgehensweise zur Bestimmung der Trainingslast auf Basis der maximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit nachfolgend dargestellt.

Als Grundvoraussetzung für die trainingspraktische Anwendung der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung ist die Verwendung technischer Hilfsmittel anzusehen, mit deren Hilfe die Bewegungsgeschwindigkeit erfasst und direkt visualisiert werden kann. In der Anwendungspraxis existieren hierfür mittlerweile zahlreiche Hardwarelösungen (z. B. LPTs, IMUs und kamerabasierte Systeme; vgl. Kapitel 2.3) von einer Vielzahl unterschiedlicher Hersteller, die in Kombination mit den zugehörigen Softwareprogrammen (z. B. als Smartphone- und Tablet-Applikationen) eine nutzerfreundliche Visualisierung, Steuerung und Auswertung der erfassten Bewegungsgeschwindigkeiten erlauben. Im Kontext der vorliegenden Dissertation steht allerdings aufgrund ihrer Verbreitung in Trainingseinrichtungen sowie der Nutzerfreundlichkeit die Verwendung von tragbaren Sensoreinheiten (engl.: „fitness wearables“) in Form von Inertialsensoreinheiten im Vordergrund. Dabei kann die überwiegende Mehrheit der verfügbaren Inertialsensorsysteme zur Erfassung der Hantelgeschwindigkeit als valide und reliabel betrachtet werden (Clemente et al., 2021).

Die Berechnungsgrundlage aller dieser Systeme stellt, unabhängig von den verwendeten Hardwarekomponenten, immer die Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung dar. Wie bereits einleitend in diesem Kapitel erläutert, kann im Widerstandstraining zur Beschreibung der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung bei dynamischen Bewegungen mit konzentrischer Arbeitsweise

ein linearer Zusammenhang angenommen werden, der im Kontext des Velocity Based Trainings in Form von individuellen Last-Geschwindigkeits-Profilen (engl.: „load-velocity profile“; [LVP]) abgebildet wird (Weakley et al., 2021; Abb. 12).

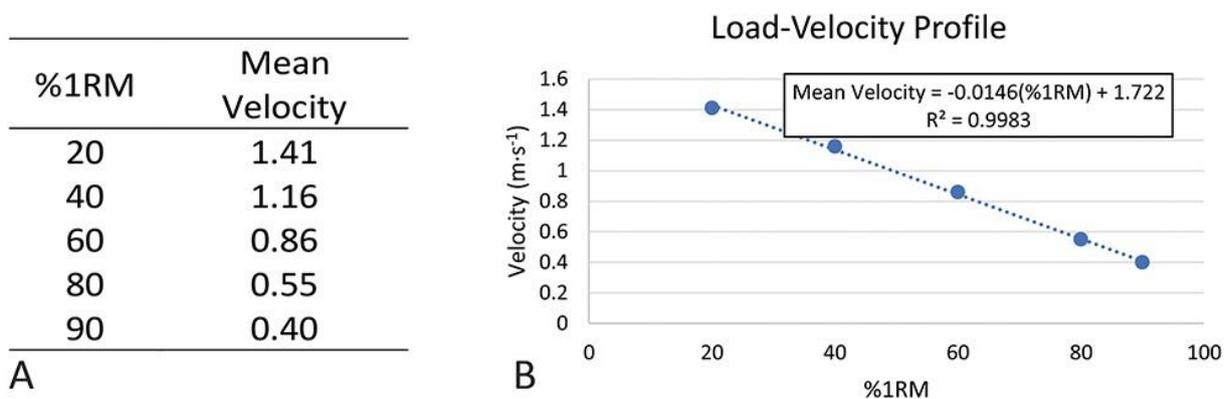


Abb. 12: Exemplarische Last-Geschwindigkeits-Beziehung („load-velocity-relationship“) einer Person bei der Übung Langhantel-Kniebeuge (modifiziert nach Weakley et al., 2021)

Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Last-Geschwindigkeits-Beziehung einerseits von individuellen Faktoren, wie beispielsweise der Maximalkraftleistung, der Anthropometrie sowie der spezifischen Vorerfahrung im Widerstandstraining einer Person, und andererseits von übungsspezifischen Faktoren, wie beispielsweise der Art der Bewegung sowie der Bewegungsreichweite (ROM) abhängig ist. Aus diesem Grund sollten für jede Person bei jeder Übung individuelle Last-Geschwindigkeits-Profile erstellt werden, um eine möglichst exakte Auswahl der spezifisch erforderlichen Trainingslast zu ermöglichen (García-Ramos, Suzovic & Pérez-Castilla, 2021; Helms et al., 2017; Izquierdo et al., 2006; Sánchez-Medina et al., 2014; Torrejón, Balsalobre-Fernández, Haff & García-Ramos, 2019).

Die Erstellung solcher Last-Geschwindigkeits-Profile basiert auf der Linearität der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung, weshalb die maximale Bewegungsgeschwindigkeit bei mindestens zwei unterschiedlichen Lasten erfasst werden muss, um daraus ein Last-Geschwindigkeits-Profil abzuleiten. Die Ableitung der LVPs kann mithilfe unterschiedlich aufwendiger Protokolle erfolgen, wobei die Testung der volitional maximalen konzentrischen Durchschnittsgeschwindigkeit gegen zwei unterschiedlich hohe Lasten (engl.: „two-point method“) laut mehrerer Untersuchungen als valide Methode gilt, sofern die verwendeten

Lasten eine ausreichend große Differenz hinsichtlich ihrer Höhe aufweisen (Pérez-Castilla, Jaric, Feriche, Padial & García-Ramos, 2018; Sašek, Mirkov, Hadžić & Šarabon, 2022). Aktuelle Untersuchungen hierzu liefern Hinweise darauf, dass die Anwendung eines Protokolls mit mehreren Lasten (engl.: „multiple-point method“) zu geringfügig präziseren LVPs führt (Aidar et al., 2022; Çetin et al., 2022).

Aus anwendungsorientierter Sicht kann die two-point method allerdings als ausreichend angesehen werden, da die verfügbaren Softwarelösungen zur Visualisierung und Interpretation der erfassten Bewegungsgeschwindigkeiten in jeder ausgeführten Trainingseinheit eine automatische Erweiterung des Last-Geschwindigkeits-Profils vornehmen. Dadurch passen sich die individualisierten Profile dynamisch an die Trainingsfortschritte an und werden mit zunehmender Anwendungsdauer immer präziser. Da die exakte Funktionsweise der dynamischen Anpassung von Last-Geschwindigkeits-Profilen im Kontext dieser Dissertation von geringer Relevanz ist, werden deren exakten Hintergründe an dieser Stelle nicht näher erläutert und lediglich darauf verwiesen, dass die „two-point method“ zur initialen Bestimmung eines Last-Geschwindigkeits-Profils somit ausreichend ist.

Die Steuerung der Belastungsintensitäten erfolgt bei Velocity Based Training innerhalb einer Trainingseinheit über die Vorgabe einer spezifischen Zielgeschwindigkeit der konzentrischen Bewegungsphase. Die Höhe der Trainingslast, die für das Training mit dieser Zielgeschwindigkeit gewählt werden sollte, kann aus dem individuellen Last-Geschwindigkeits-Profil für eine bestimmte Übung abgeleitet werden (Weakley et al., 2021).

Da die geschwindigkeitsbasierte Intensitätssteuerung auf dem inhärenten Grundsatz beruht, dass man sich, unabhängig von der Höhe der Trainingslast, bei jeder Wiederholung mit volitional maximalen Krafteinsätzen bewegt, zielen die durch diese Zielgeschwindigkeiten hervorgerufenen Anpassungsprozesse auch primär auf die Verbesserung der neuromuskulären Koordination ab (vgl. Kapitel 2.2.4). Aus diesem Grund werden diese Zielgeschwindigkeiten (engl.: „velocity zones“) zur geschwindigkeitsbasierten Intensitätssteuerung üblicherweise in verschiedene Trainingsbereiche eingeteilt, deren Bezeichnungen in Abhängigkeit zu jenen sportmotorischen Erscheinungsformen der Kraftleistung gewählt wurden, die durch diese Zielgeschwindigkeit primär adaptieren sollen (Mann & Kazadi, 2016, S. 33–39; Abb. 13).

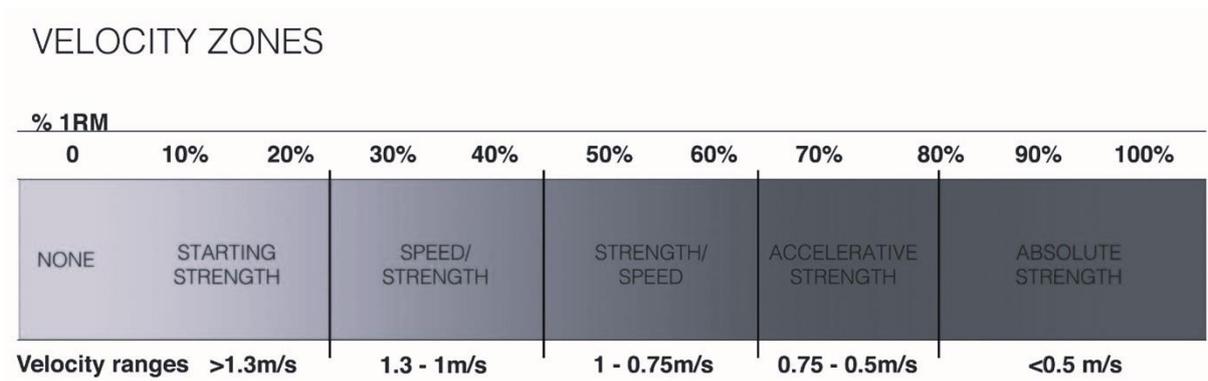


Abb. 13: Zielgeschwindigkeiten und Trainingsbereiche (engl.: „velocity zones“) zur geschwindigkeitsbasierten Steuerung der Belastungsintensität (Mann & Kazadi, 2016, S. 34)

Entsprechend der Ausführungen von Mann und Kazadi (2016, S. 33–39) sowie dem Spezifitätsprinzip der Trainingssteuerung (D. Pearson, Faigenbaum, Conley & Kraemer, 2000, S. 16; Sale & MacDougall, 1981) hat die geschwindigkeitsbasierte Intensitätssteuerung den größten Nutzen im Widerstandstraining zur Verbesserung spezifischer Dimensionen der Kraftleistung, die mit volitional maximalen Krafteinsätzen bzw. Bewegungsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Widerständen assoziiert werden (Cronin, McNair & Marshall, 2002; Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Gorostiaga & González-Badillo, 2014; Pereira & Gomes, 2003; Wilk et al., 2020).

Die Effektivität von Velocity Based Training auf maximal- und schnellkraftorientierte Leistungsparameter wurde bereits umfänglich nachgewiesen, was die Anwendungsspezifität dieses Ansatzes untermauert (Baena-Marín et al., 2022; Guerriero, Varalda & Piacentini, 2018; Held, Speer, Rappelt, Wicker & Donath, 2022; Liao et al., 2021; Riscart-López et al., 2021; Włodarczyk, Adamus, Zieliński & Kantanista, 2021).

Da die geschwindigkeitsbasierte Intensitätssteuerung die Erzeugung volitional maximaler Krafteinsätze respektive maximale Bewegungsgeschwindigkeiten voraussetzt, ist dieser Ansatz im Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse von untergeordneter Bedeutung (vgl. Kapitel 2.2.2 & 2.2.4).

Darüber hinaus wird dadurch ersichtlich, dass die geschwindigkeitsbasierte Intensitätssteuerung im Kontext des übergeordneten Themas der vorliegenden Dissertation irrelevant ist, da hierbei die Untersuchung submaximaler Bewegungsgeschwindigkeiten im Vordergrund steht.

### 2.3.2 Geschwindigkeitsbasierte Steuerung der Belastungsdauer und muskulären Ermüdung

In Kapitel 2.2.2 wurden die zahlreichen Einflüsse auf die Anzahl realisierbarer Wiederholungen im Widerstandstraining bereits ausführlich erläutert. Daraus kann als Resultat festgehalten werden, dass die Steuerung der Belastungsdauer durch die intensitätsspezifische Vorgabe einer konkreten Wiederholungsanzahl als ungenau angesehen werden muss (Fröhlich & Marschall, 1999; Iglesias et al., 2010; Shimano et al., 2006; Trybulski et al., 2022; Wilk et al., 2018; Wilk et al., 2020). Daraus kann abgeleitet werden, dass auch die Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens als Parameter der muskulären Ermüdung nur unzureichend über die Vorgabe einer Wiederholungszahl gesteuert werden kann.

Entsprechend des in Kapitel 2.2.3 dargestellten Stellenwertes der zielspezifischen Steuerung der muskulären Ermüdung zur Auslösung muskulärer Anpassungsreaktionen durch Widerstandstraining muss die Ungenauigkeit der Wiederholungsvorgabe zur Steuerung der muskulären Ermüdung als kritisch angesehen werden (Grgic et al., 2022; A. F. Vieira et al., 2021; J. G. Vieira et al., 2022).

Die exakte Steuerung des Grades der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes ist deshalb von Bedeutung, da im Widerstandstraining einerseits ein gewisses Ausmaß der neuromuskulären sowie zellulären Beanspruchung erforderlich ist, um spezifische Anpassungsprozesse auszulösen, und andererseits eine zu starke Beanspruchung negative Auswirkungen auf den Regenerationsbedarf, das Ausmaß der Trainingseffekte, die Trainingsadhärenz und die Verletzungsgefahr haben kann (Helms et al., 2018; Krzysztofik et al., 2019; Lasevicius et al., 2022; Refalo et al., 2022; Refalo et al., 2023). Auch die Implementierung subjektiver Parameter in Kombination mit intensitätsspezifischen Lastvorgaben unterliegt aufgrund diverser subjektiver Einflussgrößen einer gewissen Ungenauigkeit (Helms et al., 2018; Zourdos et al., 2021).

Aus diesem Grund wurde in den vergangenen Jahren zunehmend empfohlen, objektive Parameter und Strategien zur Autoregulation (vgl. Kapitel 2.3.1) der Belastungsdauer zu verwenden, um eine präzisere Steuerung des Grades der muskulären Ermüdung zu ermöglichen, da die muskuläre Ermüdung als Indikator der Beanspruchung, insbesondere im Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse, als zentraler

Steuerungsparameter angesehen werden kann (Helms et al., 2017; Morán-Navarro et al., 2019; Pelland et al., 2022; Refalo et al., 2023).

Im Kontext von Velocity Based Training stellt die Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung die physiologische Grundlage zur Belastungssteuerung dar (vgl. Kapitel 2.3). Innerhalb der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung gilt die Höhe des willkürlich erzeugten Krafteinsatzes als kausale Determinante der realisierbaren konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit bei muskulärer Arbeit gegen einen definierten Lastwiderstand. Wie in Kapitel 2.2.3 erläutert, äußert sich die zunehmende muskuläre Ermüdung primär dadurch, dass die Fähigkeit zur muskulären Krafterzeugung abnimmt (Cè et al., 2020; Tornero-Aguilera et al., 2022; Zajac et al., 2015).

Aus dieser wechselseitigen Beeinflussung der muskulären Ermüdung, der Fähigkeit zur muskulären Kraftproduktion und der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung lässt sich ableiten, dass die Verringerung der volitional realisierbaren konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (Abb. 14) als Resultat einer ermüdungsbedingten Verringerung zur muskulären Krafterzeugung angesehen werden kann (González-Badillo et al., 2017; Izquierdo et al., 2006; Morán-Navarro et al., 2019).

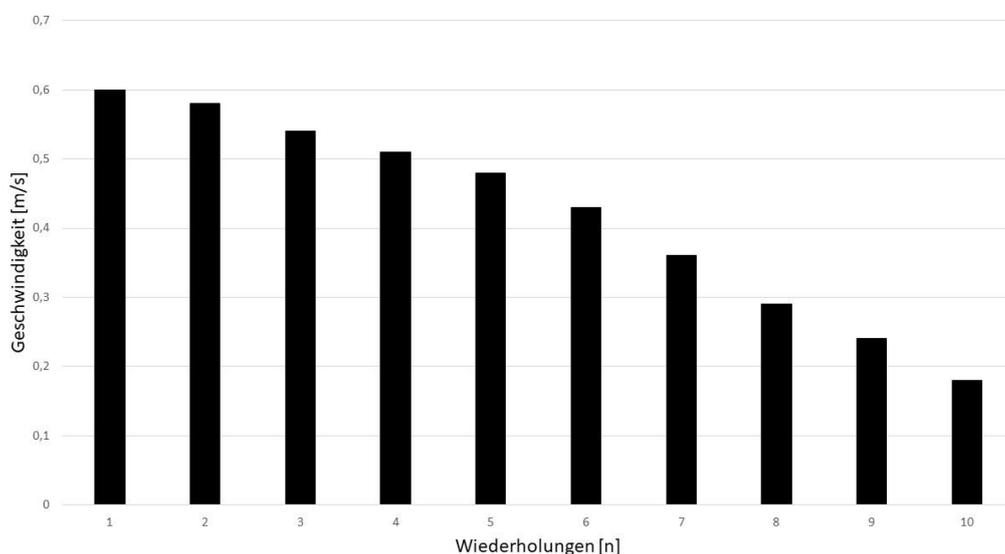


Abb. 14: Exemplarische Darstellung der ermüdungsbedingten Reduktion der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit innerhalb eines Trainingssatzes bei einer spezifischen Übung

Dieser Zusammenhang gilt jedoch unter der Prämisse, dass jede konzentrische Bewegung, unabhängig von der Höhe des wirkenden Lastwiderstandes, immer mit volitional maximalen Krafteinsätzen ausgeführt wird. Erfolgt die Bewegung mit volitional submaximalem Krafteinsatz, kann die dadurch verringerte Bewegungsgeschwindigkeit nicht mehr auf die ermüdungsbedingte Verringerung der Kraftleistung als Ursache zurückgeführt werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass auf Grundlage der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung eine Reduktion der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit nur dann als repräsentativer Indikator der muskulären Ermüdung betrachtet werden kann, wenn bei jeder Wiederholung innerhalb eines Trainingssatzes volitional maximale Krafteinsätze realisiert werden. Diese Problemstellung wurde auch bereits in den wissenschaftlichen Untersuchungen von Zhao et al. (2022; 2023) festgestellt.

Unter Annahme der gegebenen Voraussetzung, dass im Widerstandstraining bei jeder Wiederholung volitional maximale Krafteinsätze realisiert werden, kann das Ausmaß der relativen Geschwindigkeitsreduktion (engl.: „velocity loss“) im Verhältnis zur maximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit gegen einen definierten Lastwiderstand zur Steuerung der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes verwendet werden. Demzufolge determiniert das Ausmaß der angestrebten muskulären Ermüdung auch automatisch die Anzahl der innerhalb eines Trainingssatzes ausgeführten Wiederholungen. Im Kontext der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung stellt die relative Geschwindigkeitsreduktion demzufolge den zentralen Steuerungsparameter dar, der sowohl das Ausmaß der muskulären Ermüdung als auch die Belastungsdauer interdependent beeinflusst (González-Badillo et al., 2017; Morán-Navarro et al., 2019). Aufgrund der erläuterten Interdependenz zwischen dem Grad der muskulären Ermüdung und der Belastungsdauer wird nur noch der Grad der muskulären Ermüdung genannt, wobei dieser gleichzeitig auch stellvertretend für die Belastungsdauer zu verstehen ist.

Bei der trainingspraktischen Anwendung der geschwindigkeitsbasierten Steuerung der muskulären Ermüdung wird der Grad der muskulären Ermüdung durch die Vorgabe eines konkreten Geschwindigkeitsverlustes verwendet. Dabei wird die angestrebte Reduktion der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (z. B. 40 %) in Relation zur höchstmöglichen realisierbaren konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit gegen den verwendeten Lastwiderstand angegeben und stellt eine Schwelle (engl.: „velocity loss threshold“) dar, deren

Erreichen das Ende des Trainingssatzes kennzeichnet (Jukic, Castilla et al., 2023; Weakley et al., 2020; Weakley et al., 2021; Abb. 15).

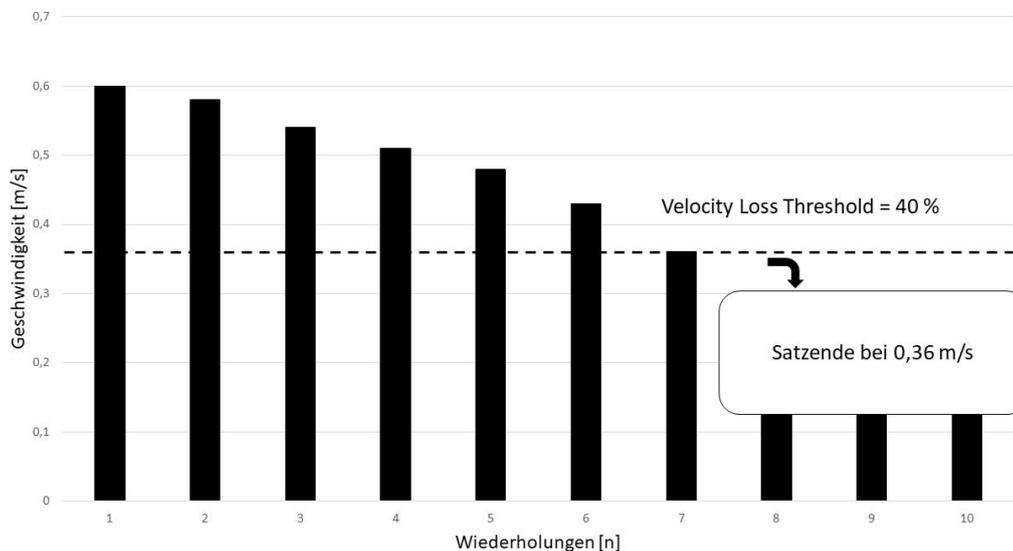


Abb. 15: Exemplarische Darstellung einer übungsspezifischen Velocity Loss Threshold (40 %) als Steuerungsparameter des Grades der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes

Über die Vorgabe einer solchen Velocity Loss Threshold wird die muskuläre Ermüdung im Sinne der gewünschten Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens gesteuert, wodurch sichergestellt werden soll, dass einerseits ein ausreichender Stimulus zur Auslösung von Anpassungsreaktionen erzeugt wurde und andererseits kein übermäßiger Regenerationsbedarf oder andere unerwünschte Effekte hervorgerufen werden (Jukic, Castilla et al., 2023; Pareja-Blanco, Alcazar, Sánchez-Valdepeñas et al., 2020; M. Pearson et al., 2020).

Die Effektivität der Anwendung von Velocity Loss Thresholds zur Autoregulation der muskulären Ermüdung und des Belastungsvolumens wurde mehrfach durch wissenschaftliche Untersuchungen bestätigt (Hickmott et al., 2022; Jukic, Castilla et al., 2023; Myrholt, Solberg, Pettersen, Seynnes & Paulsen, 2023).

Definiert man keine Velocity Loss Threshold als Abbruchgrenze innerhalb eines Trainingssatzes, so resultiert die ermüdungsbedingte Verringerung der realisierbaren Krafteinsätze in einer fortschreitenden Reduktion der willkürlich erreichbaren konzentrischen Geschwindigkeit der

Wiederholungen. Dadurch nähert sich die realisierbare Kraftleistung immer weiter der Höhe der Gravitationskraft des verwendeten Lastwiderstandes an, bis die Bewegung aufgrund der starken muskulären Ermüdung nur noch ein letztes Mal vollständig ausgeführt werden kann. Diese letzte Wiederholung drückt sich aufgrund der geringen Differenz zwischen der verringerten Kraftleistung und der Gravitationskraft des Lastwiderstandes entsprechend der Kraft-Geschwindigkeits-Relation in einer kritischen Mindestgeschwindigkeit aus, bei deren Unterschreiten keine weitere vollständige konzentrische Bewegung gegen den Widerstand möglich ist (Izquierdo et al., 2006; Rodríguez-Rosell, Yáñez-García, Sánchez-Medina, Mora-Custodio & González-Badillo, 2020).

Diese konzentrische Mindestgeschwindigkeit charakterisiert innerhalb eines maximal ermüdenden Trainingssatzes somit die letzte vollständig ausführbare Wiederholung vor Erreichen des momentanen konzentrischen Muskelversagens und wird als „Minimum Velocity Threshold“ ([MVT]; alt.:  $V_{1-RM}$ ; Abb. 16) bezeichnet (Caven et al., 2020; Fernandes et al., 2021; Weakley et al., 2021).

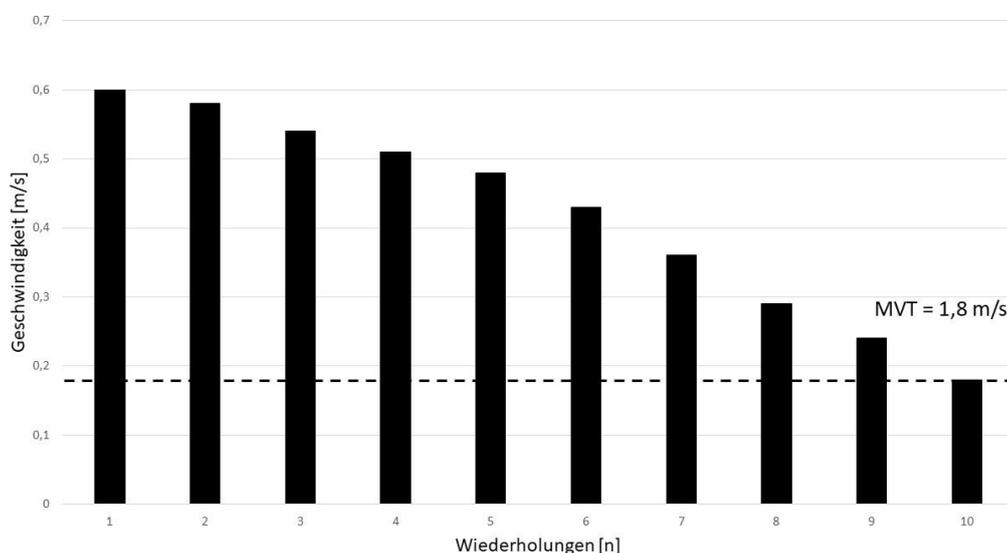


Abb. 16: Exemplarische Darstellung einer übungsspezifischen Minimum Velocity Threshold innerhalb eines maximal ermüdenden Trainingssatzes

In einer Studie von Izquierdo et al. (2006) wurde untersucht, ob sich die MVT intraindividuell bei verschiedenen Belastungsintensitäten unterscheidet. Dabei wurde beobachtet, dass die individuelle MVT einer Person bei der Ausführung einer bestimmten Übung auch bei Verwendung unterschiedlicher Belastungsintensitäten (60 – 75 % 1-RM & 100 % 1-RM) keine Unterschiede aufweist. Demzufolge ist die konzentrische Geschwindigkeit der letzten vollständig ausführbaren Wiederholung (MVT) bei der Ausführung eines maximal ermüdenden Trainingssatzes einer bestimmten Übung als unabhängig davon anzusehen, ob diese Übung mit maximaler Intensität (100% 1-RM) oder einer deduzierten submaximalen Intensität (% 1-RM) ausgeführt wird. Dies konnte durch die Untersuchungsergebnisse von Rodríguez-Rosell et al. (2020) wiederholt bestätigt werden.

Wie in einer weiteren Studie von Sánchez-Medina, González-Badillo, Pérez und Pallarés (2014) zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Belastungsintensität und der Bewegungsgeschwindigkeit festgestellt wurde, unterscheidet sich die MVT bei verschiedenen Trainingsübungen voneinander. Die Gültigkeit dieser Beobachtung wurde durch eine weitere wissenschaftliche Untersuchung von Helms et al. (2017) erneut bestätigt. Die MVT ist demnach als übungsspezifisch anzusehen.

Zourdos et al. (2016) verfolgten in ihrer Studie das Ziel, den Einfluss der Trainingserfahrung auf die MVT zu untersuchen. Dabei kamen sie zu dem Schluss, dass Personen, die sehr erfahren in der Ausführung bestimmter Trainingsübungen sind, geringere Bewegungsgeschwindigkeiten an der MVT realisieren können als weniger erfahrene Personen. Die MVT weist demzufolge eine Abhängigkeit von der Trainingserfahrung auf, was sich bei Betrachtung diverser Studienergebnisse zum Einfluss der Höhe der Kraftleistung auf die Höhe der individuellen übungsspezifischen MVT in der Übersichtsarbeit von Weakley et al. (2021) bestätigen lässt.

Zusammenfassend lässt sich zur geschwindigkeitsbasierten Steuerung der muskulären Ermüdung bzw. Belastungsdauer innerhalb eines Trainingssatzes sagen, dass die Vorgabe von Velocity Loss Thresholds zur Determinierung des Satzendes grundsätzlich als effektiv gilt (Morán-Navarro et al., 2017; Rodríguez-Rosell et al., 2020). Inwiefern es als sinnvoll angesehen werden kann, die muskuläre Ermüdung unabhängig von der verwendeten Last sowie der Tagesform durch die Vorgabe einer starren Velocity Loss Threshold (z. B. eine Reduktion der volitional maximalen Bewegungsgeschwindigkeit um 40 %) zu steuern, wird in Kapitel 3.1 diskutiert.

Unabhängig von der Sinnhaftigkeit starrer Vorgaben der relativen Geschwindigkeitsreduktion, muss im Kontext dieses Steuerungsansatzes in jedem Fall als kritisch angesehen werden, dass man sich bei jeder Wiederholung innerhalb eines Trainingssatzes, unabhängig von der Höhe des verwendeten Lastwiderstandes, immer mit volitional maximalen Krafteinsätzen bewegt, um volitional maximale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeiten zu erzeugen. Demzufolge kann der aktuelle Ansatz zur geschwindigkeitsbasierten Steuerung des Grades der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes nicht angewendet werden, wenn im Widerstandstraining bewusst submaximale Bewegungsgeschwindigkeiten realisiert werden (Zhao et al., 2022; Zhao et al., 2023).

Die Vermeidung maximaler Bewegungsgeschwindigkeiten bzw. die kontrollierte Bewegungsausführung mit submaximalen Geschwindigkeiten gilt im Widerstandstraining allerdings für bestimmte Personengruppen und Zielstellungen als potenziell vorteilhaft (vgl. Kapitel 1.1 & 2.2.4). Für diese Personengruppen und Zielstellungen ist es allerdings ebenso sinnvoll, den Grad der im Widerstandstraining erzeugten Beanspruchung intensitätsunabhängig kontrollieren zu können, um die akute sowie langfristige Trainingswirkung, insbesondere auf die Steigerung der Skelettmuskelmasse, zu optimieren (vgl. Kapitel 2.2.2 & 2.2.3).

Aus den genannten Gründen erscheint die Entwicklung eines adaptierten Ansatzes zur geschwindigkeitsbasierten Steuerung des Grades der muskulären Ermüdung im Widerstandstraining mit volitional submaximalen konzentrischen Geschwindigkeiten der Bewegungsausführung aus anwendungsorientierter sowie trainingswissenschaftlicher Sicht sowohl legitim als auch sinnvoll. Die Problemstellung sowie die Bedeutung der MVT als potenzielle Ausgangsbasis für einen adaptierten Steuerungsansatz wird im nachfolgenden Kapitel anhand anwendungsrelevanter Szenarien verdeutlicht.



---

III

PROBLEMSTELLUNG, FORSCHUNGSFRAGEN UND  
HYPOTHESENBUILDUNG

---

### 3.1 Problemstellung und übergeordnete Untersuchungsziele

Um die Problemstellung zu identifizieren, die zur Legitimation der übergeordneten Untersuchungsziele der vorliegenden Dissertation dient, werden zunächst die zentralen Aussagen der im theoretischen Hintergrund thematisierten Inhalte kompakt zusammengefasst.

Die Erreichung der persönlichen optisch-ästhetischen Ideale, beispielsweise durch den Aufbau von Skelettmuskelmasse, sowie die Verbesserung der Gesundheit gelten als meistgenannte Gründe für den Besuch von Fitness- und Gesundheitsstudios (Statista, 2016; vgl. Kapitel 1.1).

Die Steigerung der Skelettmuskelmasse entsteht auf zellulärer Ebene durch die Hypertrophie der Muskelzellen (Haun et al., 2019; vgl. Kapitel 2.1.1). Hypertrophieeffekte können dann auftreten, wenn infolge eines entsprechenden Belastungsstimulus langfristig eine positive Netto-Muskelprotein-Bilanz existiert. Dies kann beispielsweise durch ein Widerstandstraining ausgelöst werden, das einerseits einen möglichst starken Anstieg der Muskelproteinsynthese bewirkt und gleichzeitig das Ausmaß der Proteindegradation innerhalb der Muskelzellen minimiert (Kumar et al., 2009; Phillips et al., 1997; Phillips, 2014; vgl. Kapitel 2.1.2).

Die mechanische Spannung gilt im Widerstandstraining als zentraler Mediator zur Steigerung der Muskelproteinsynthese bzw. zur Auslösung von Hypertrophieprozessen (Lim et al., 2022; Schiaffino et al., 2021; Wackerhage et al., 2019; vgl. Kapitel 2.1.3 & 2.1.4).

Die Höhe der Belastungsintensität im Sinne der Höhe des verwendeten Lastwiderstandes, scheint im Widerstandstraining keinen entscheidenden Einfluss auf die Auslösung von Hypertrophieeffekten zu haben, sofern die Intensität höher als 30 % des dynamischen Kraftmaximums (1-RM) ist, vergleichbare Belastungsumfänge betrachtet werden und ein ausreichendes Ausmaß an muskulärer Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes erreicht wird (Carvalho et al., 2022; Grgic, 2020; Lopez et al., 2021; Weakley et al., 2023). Die Steuerung der Belastungsdauer durch die Vorgabe intensitätsabhängiger Wiederholungszahlen erscheint dabei aufgrund zahlreicher Einflussfaktoren inadäquat, um darüber das Ausmaß der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes mit ausreichender Genauigkeit steuern zu können (Fröhlich & Marschall, 1999; Iglesias et al., 2010; Knaier et al., 2022; Richens & Cleather, 2014; Trybulski et al., 2022; vgl. Kapitel 2.2.2).

Die muskuläre Ermüdung ist im Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse allerdings als zentraler Steuerungsparameter anzusehen, da der Grad der muskulären

Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes als zentraler Steuerungsparameter zur Auslösung von Hypertrophieprozessen gilt. Dabei ist einerseits ein gewisses Ausmaß an muskulärer Ermüdung erforderlich, um die Steigerung der Muskelproteinsynthese zu optimieren, und andererseits sollte das Erreichen der maximalen Ermüdung bzw. des konzentrischen Muskelversagens vermieden werden, um negative Einflüsse auf die Proteindegradation, den Regenerationsbedarf, die Trainingsadhärenz und die Verletzungsgefahr zu verhindern (Grgic et al., 2022; Refalo et al., 2022; A. F. Vieira et al., 2021; J. G. Vieira et al., 2022). Für die Auslösung optimaler Hypertrophieeffekte scheint im Widerstandstraining mit geringen Lastwiderständen ein höheres Ausmaß der muskulären Ermüdung erforderlich zu sein als bei Verwendung hoher Belastungsintensitäten, was die Relevanz einer Möglichkeit zur differenzierten Steuerung der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes verdeutlicht (Lasevicius et al., 2022; Refalo et al., 2023; vgl. Kapitel 2.2.3).

Die Auslösung von Hypertrophieprozessen kann als unabhängig von der volitionalen Bewegungsgeschwindigkeit angesehen werden. Auch in diesem Kontext besitzt die Erzeugung eines ausreichenden Grades der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes einen entscheidenden Einfluss auf das Ausmaß der trainingsinduzierten Hypertrophieeffekte. Im Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse kann ein breites Spektrum von Bewegungsgeschwindigkeiten (0,5 – 6 Sekunden Einzelwiederholungsdauer) als effektiv angesehen werden (Bernárdez-Vázquez et al., 2022; Schoenfeld, 2021, S. 116–118). Aufgrund der vorteilhaften Effekte moderater und langsamer gegenüber schnellen Wiederholungen zur Erzeugung größerer Belastungsumfänge sowie zur Vermeidung einer Beeinträchtigung der Bewegungsqualität im Allgemeinen (Bennett et al., 2021; Trybulski et al., 2022; Wilk et al., 2018) kann die Verwendung von submaximalen bzw. kontrollierten Geschwindigkeiten als sinnvoll erachtet werden (vgl. Kapitel 2.2.4).

Die geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung (Velocity Based Training) verwendet die volitional maximale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit gegen einen bestimmten Lastwiderstand als Parameter zur Autoregulation der Belastungsintensität (Banyard et al., 2019; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Larsen et al., 2021; vgl. Kapitel 2.3.1). Da die Auslösung von Hypertrophieprozessen, wie in Kapitel 2.2 erläutert wurde, weitestgehend unabhängig von der Belastungsintensität zu sein scheint und auch nicht von der Realisierung maximaler Krafteinsätze abhängig ist, besitzt die geschwindigkeitsbasierte Intensitätssteuerung im Kontext des Themas dieser Arbeit nur eine untergeordnete Relevanz.

Die Verwendung der volitional maximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit sowie deren ermüdungsbedingte Reduktion über subsequente Wiederholungen besitzt allerdings das Potenzial, den Grad der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes objektiv abbilden zu können (Morán-Navarro et al., 2019). Bei der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung werden nach der aktuell etablierten Vorgehensweise sogenannte Velocity Loss Thresholds vorgegeben, die die Berechnung einer Abbruchgeschwindigkeit zur Steuerung der Belastungsdauer bzw. des angestrebten Grades der muskulären Ermüdung anhand der relativen Geschwindigkeitsreduktion ermöglichen, sofern man sich bei jeder Wiederholung mit maximalem Krafteinsatz bzw. volitional maximaler konzentrischer Geschwindigkeit bewegt (Jukic, Castilla et al., 2023; Weakley et al., 2020; Weakley et al., 2021; vgl. Kapitel 2.3.2).

Die diesem Ansatz inhärente Grundvoraussetzung, sich mit volitional maximalen konzentrischen Geschwindigkeiten zu bewegen, stellt die übergeordnete Problemstellung bei der Steuerung der muskulären Ermüdung auf Basis der relativen Geschwindigkeitsreduktion dar, da Velocity Loss Thresholds nicht angewendet werden können, wenn man sich im Widerstandstraining bewusst mit submaximaler Geschwindigkeit bewegt (Zhao et al., 2022; Zhao et al., 2023). Die Tragweite dieser Problematik wird nachfolgend anhand mehrerer fiktiver Anwendungsszenarien im Widerstandstraining exemplarisch veranschaulicht.

### 3.1.1 Szenario 1

Der aktuelle geschwindigkeitsbasierte Ansatz zur Steuerung des Grades der muskulären Ermüdung basiert darauf, dass man das Belastungsende ( $v_{end}$ ) innerhalb eines Trainingssatzes über den konzentrischen Geschwindigkeitsverlust in Relation zur volitional maximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit gegen den für diesen Trainingssatz gewählten Widerstand angibt (engl.: „velocity loss threshold“; [VLT]; vgl. Kapitel 2.3.2). Diese Vorgehensweise setzt voraus, dass man sich idealerweise bei jeder Wiederholung oder zumindest bei einer der ersten Wiederholungen des Trainingssatzes mit volitional maximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit gegen den gewählten Widerstand bewegt, um einen Ausgangswert zur Berechnung der Abbruchgeschwindigkeit ( $v_{max} - VLT = v_{end}$ ) zu messen. Ohne volitional maximale Bewegungsgeschwindigkeit fehlt diesem Steuerungsansatz der Ausgangswert ( $v_{max}$ ) zur Berechnung der Abbruchgeschwindigkeit, da dieser bei volitional submaximaler (kontrollierter) Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{sub}$ ) niemals gemessen wird. Aus diesem Grund lässt sich der Ansatz zur Steuerung der muskulären Ermüdung auf Basis des relativen Geschwindigkeitsverlustes nicht auf das Widerstandstraining mit submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten übertragen.

Ein theoretisches Berechnungsbeispiel (1) für die Anwendung der geschwindigkeitsbasierten Steuerung der muskulären Ermüdung nach dem Ansatz des relativen Geschwindigkeitsverlustes (z. B. VLT = 40 %) bei unterschiedlichen volitionalen Bewegungsgeschwindigkeiten ( $v_{max}$  &  $v_{sub}$ ) veranschaulicht dies:

#### Berechnungsbeispiel 1:

$v_{max}$	→	80 kg @ $v_{max}$ : 0,62 m/s	-	VLT: 40 %	=	$v_{end}$ : 0,372 m/s
$v_{sub}$	→	80 kg @ $v_{max}$ : unbekannt	-	VLT: 40 %	=	$v_{end}$ : nicht steuerbar

Dieses Beispiel zur Berechnung der Abbruchgeschwindigkeit (1) eines Trainingssatzes zeigt, dass der aktuelle geschwindigkeitsbasierte Ansatz zur Steuerung des Grades der muskulären Ermüdung nur anwendbar ist, wenn  $v_{max}$  als Ausgangswert zur Berechnung des relativen Geschwindigkeitsverlustes bekannt ist, da sich die evidenzbasierten Empfehlungen für den angestrebten Geschwindigkeitsverlust (VLT) ausschließlich auf die Anwendung bei volitional maximaler Bewegungsgeschwindigkeit beziehen. In einem Trainingssatz, in dem man sich bei

keiner Wiederholung volitional maximal schnell bewegt ( $v_{\max}$  = unbekannt), kann die VLT nicht zur Steuerung der muskulären Ermüdung verwendet werden ( $v_{\text{end}}$  = nicht steuerbar).

Eine weitere beispielhafte Berechnung der Abbruchgeschwindigkeit (2) zeigt, welchen Effekt es auf die Abbruchgeschwindigkeit bzw. den Grad der muskulären Ermüdung hätte, wenn man die evidenzbasierten Empfehlungen für VLT zur Steuerung der muskulären Ermüdung bei volitional maximalen Bewegungsgeschwindigkeiten ( $v_{\max}$ ) unreflektiert auf die Steuerung volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeiten ( $v_{\text{sub}}$ ) übertragen würde.

**Berechnungsbeispiel 2:**

$$v_{\max} \rightarrow 80 \text{ kg @ } v_{\max}: 0,62 \text{ m/s} - \text{VLT: } 40 \% = v_{\text{end}}: 0,372 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{sub}} \rightarrow 80 \text{ kg @ } v_{\text{submax}}: 0,35 \text{ m/s} - \text{VLT: } 40 \% = v_{\text{end}}: 0,21 \text{ m/s}$$

Die Anwendung der geschwindigkeitsbasierten Steuerung der muskulären Ermüdung nach dem aktuell etablierten Ansatz des relativen Geschwindigkeitsverlustes bei Belastungen mit volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeiten könnte zu einer sehr starken muskulären Ermüdung bis hin zum ungewollten Erreichen des momentanen konzentrischen Muskelversagens führen.

### 3.1.2 Szenario 2

Unterschiedlich hohe Lasten können mit unterschiedlich hohen maximalen Geschwindigkeiten ( $v_{\max}$ ) bewegt werden, da die maximal realisierbare Kraftleistung eines Individuums die maximale Beschleunigung einer gewählten Last bedingt (vgl. Kapitel 2.1.1 & 2.3). Dadurch ergeben sich bei einer starren Vorgabe des relativen Geschwindigkeitsverlustes (VLT) zur Steuerung des muskulären Ermüdungsgrades innerhalb eines Trainingssatzes bei unterschiedlich hohen Lasten auch unterschiedlich hohe Abbruchgeschwindigkeiten ( $v_{\text{end}}$ ) bzw. unterschiedlich starke Annäherungen an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens. Am nachfolgenden Berechnungsbeispiel (3) zeigt sich, dass bei geringer Trainingslast (z. B.  $m_{\text{low}} = 60 \text{ kg}$ ) eine weniger starke muskulärer Ermüdung bzw. Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens stattfindet als bei höherer Trainingslast (z. B.  $m_{\text{high}} = 100 \text{ kg}$ ), sofern die gleiche Vorgabe des relativen Geschwindigkeitsverlustes (z.B.  $\text{VLT} = 40 \%$ ) zur Steuerung verwendet wird:

#### Berechnungsbeispiel 3:

$$\begin{array}{lclclclcl}
 m_{\text{high}} & \rightarrow & 100 \text{ kg} & @ & v_{\max}: 0,50 \text{ m/s} & - & \text{VLT}: 40 \% & = & v_{\text{end}}: 0,30 \text{ m/s} \\
 m_{\text{low}} & \rightarrow & 60 \text{ kg} & @ & v_{\max}: 0,70 \text{ m/s} & - & \text{VLT}: 40 \% & = & v_{\text{end}}: 0,42 \text{ m/s}
 \end{array}$$

Dieses Beispiel (3) zur Steuerung der muskulären Ermüdung bei unterschiedlich hohen Lasten mithilfe einer starren Angabe des relativen Geschwindigkeitsverlustes zeigt, dass die Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens bei geringeren Lasten niedriger ist als bei hohen Lasten. Der aktuelle Stand der trainingswissenschaftlichen Forschung empfiehlt jedoch zur Optimierung der Hypertrophieeffekte im Widerstandstraining mit niedrigen Lasten eine deutlich stärkere Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens als bei höheren Lasten (Lasevicius et al., 2022; Refalo et al., 2023; vgl. Kapitel 2.2.3).

Demnach steht die physiologische Beanspruchungssituation, welche durch die Vorgabe einer starren VLT bei unterschiedlich hohen Lasten erzeugt wird, im Widerspruch zur evidenzbasierten Empfehlung für das Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse.

### 3.1.3 Szenario 3

Die maximale Kraftleistungsfähigkeit variiert aufgrund verschiedener Ursachen sowohl kurzfristig (z. B. an unterschiedlichen Tagen und zu unterschiedlichen Uhrzeiten; Knaier et al., 2019; Knaier et al., 2022) als auch langfristig (z. B. durch trainingsinduzierte Verbesserung der Kraftleistung innerhalb eines Trainingszyklus; Jenkins et al., 2017; vgl. Kapitel 2.2.2 & 2.3.1). Da die volitional maximale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit von der Höhe des realisierbaren Krafteinsatzes abhängig ist, bedeutet dies, dass die gleiche verwendete submaximale Last an unterschiedlichen Tagen mit unterschiedlich hohen maximalen Geschwindigkeiten bewegt werden kann (vgl. Kapitel 2.3.1). Aufgrund der zuvor genannten kurz- und langfristigen Unterschiede der maximalen Kraftleistung ergeben sich bei einer gleichbleibenden bzw. starren Vorgabe des relativen Geschwindigkeitsverlustes (VLT) zu unterschiedlichen Zeitpunkten möglicherweise auch unterschiedlich starke Annäherungen an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens bzw. unterschiedliche Abbruchgeschwindigkeiten ( $v_{end}$ ). Am theoretischen Rechenbeispiel zeigt sich, dass bei hoher Kraftleistung ( $F_{high}$ ) eine weniger starke Annäherung an die MVT stattfindet als bei geringerer Kraftleistung ( $F_{low}$ ), sofern die gleiche Vorgabe des relativen Geschwindigkeitsverlustes (z. B.  $V_{loss} = 40\%$ ) zur Steuerung verwendet wird.

Das nächste theoretische Beispiel zur Berechnung (4) nach dem Ansatz des relativen Geschwindigkeitsverlustes (VLT = 40 %) veranschaulicht den Einfluss von tagesformabhängigen Unterschieden der Kraftleistungsfähigkeit auf die Abbruchgeschwindigkeit.

#### Berechnungsbeispiel 4:

$$\begin{array}{l}
 F_{high} \rightarrow 80\text{kg @ } v_{max}: 0,62 \text{ m/s} \quad \times \quad v_{loss}: 40\% \quad = \quad v_{end}: 0,372 \text{ m/s} \\
 F_{low} \rightarrow 80\text{kg @ } v_{max}: 0,56 \text{ m/s} \quad \times \quad v_{loss}: 40\% \quad = \quad v_{end}: 0,336 \text{ m/s}
 \end{array}$$

Dieses Beispiel (4) zur Steuerung der muskulären Ermüdung mittels einer starren Vorgabe des relativen Geschwindigkeitsverlustes zeigt, dass die Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens bei guter Tagesform bzw. hoher Kraftleistungsfähigkeit geringer ist als bei schlechterer Tagesform bzw. geringerer Kraftleistungsfähigkeit. Aus anwendungsorientierter sowie trainingswissenschaftlicher Sicht erscheint es wenig sinnvoll ein Individuum, das aufgrund der tagesaktuellen Verfassung ohnehin schon weniger leistungsfähig ist als üblich, einer stärkeren muskulären Ermüdung auszusetzen als bei guter Tagesform.

### 3.1.4 Theoretischer Lösungsansatz

Studien haben gezeigt, dass die Geschwindigkeit der letzten realisierbaren Wiederholung vor dem Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens (Minimum Velocity Threshold; [MVT]) unabhängig von der tatsächlichen Höhe des verwendeten Widerstandes ist. Die MVT beschreibt demnach die niedrigste konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit, mit der sich ein beliebiger Widerstand bei einer spezifischen Bewegung überhaupt noch überwinden lässt. Das bedeutet, dass die MVT als lastunabhängige, übungsspezifische Kenngröße der maximalen muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes angesehen werden kann (Helms et al., 2018; Izquierdo et al., 2006; Rodríguez-Rosell et al., 2020; Sánchez-Medina et al., 2014; Zourdos et al., 2016; vgl. Kapitel 2.3.2).

Aufgrund der alleinigen Beeinflussung durch die Art der Bewegung bzw. Übung besitzt die MVT bei einer spezifischen Trainingsübung das Potenzial, als zentraler Parameter zur last- und geschwindigkeitsunabhängigen Steuerung des muskulären Ermüdungsgrades verwendet werden zu können. Zur alternativen Steuerung der muskulären Ermüdung im Widerstandstraining könnte deshalb in der Trainingspraxis eine Abbruchgeschwindigkeit vorgegeben werden, die durch Multiplikation der MVT mit einem bestimmten Faktor (z. B. 150 %) berechnet und als Vielfaches der MVT (z. B.  $v = \text{MVT} \times 150\%$ ) ausgedrückt werden kann.

Dies gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die initiale Bewegungsgeschwindigkeit keinen Einfluss auf die MVT besitzt und ein rechnerischer Zusammenhang der Geschwindigkeiten der letzten Wiederholungen vor dem Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens und der MVT besteht. Sofern diese Voraussetzungen erfüllt sind, wäre die Berechnung der Abbruchgeschwindigkeit auf Basis der MVT unabhängig von der gewählten Last, der volitionalen Bewegungsgeschwindigkeit und der potenziellen Unterschiede der Kraftleistung dazu geeignet, um die muskuläre Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes standardisiert zu steuern.

Da dieser adaptierte Ansatz keine Verringerung der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (Velocity Loss Threshold), sondern eine relative Abbruchgeschwindigkeit (berechnet als Vielfaches der MVT) zur Steuerung des Grades der intraseriellen muskulären Ermüdung vorsieht, kann diese Abbruchgrenze als „**Relative Stopping Velocity Threshold**“ (RSVT), ausgedrückt als Vielfaches der individuellen übungsspezifischen MVT in Prozent (z. B.  $\text{RSVT} = 150\%$ ), bezeichnet werden.

Überträgt man diesen adaptierten Ansatz zur Berechnung der Abbruchgeschwindigkeit durch die Vorgabe einer RSVT ( $v_{RSVT} = MVT \times RSVT$ ) auf die zuvor dargestellten Berechnungsbeispiele und nimmt man für die MVT einer spezifischen Trainingsübung einen fiktiven Wert von 0,2 m/s an, so könnte dies wie nachfolgend darstellt aussehen.

**Anwendung der RSVT auf Berechnungsbeispiel 2:**

$$v_{\max}: 0,62 \text{ m/s @ } 80 \text{ kg} \quad \rightarrow 0,2 \text{ m/s (MVT)} \times 150 \% \text{ (RSVT)} = v_{RSVT}: 0,3 \text{ m/s } (\approx \text{VLT: } 52 \%)$$

$$v_{\text{submax}}: 0,35 \text{ m/s @ } 80 \text{ kg} \quad \rightarrow 0,2 \text{ m/s (MVT)} \times 150 \% \text{ (RSVT)} = v_{RSVT}: 0,3 \text{ m/s } (\approx \text{VLT: } 14 \%)$$

**Anwendung der RSVT auf Berechnungsbeispiel 3:**

$$v_{\max}: 0,50 \text{ m/s @ } m_{\text{high}}: 100 \text{ kg} \quad \rightarrow 0,2 \text{ m/s (MVT)} \times 150 \% \text{ (RSVT)} = v_{RSVT}: 0,3 \text{ m/s } (\approx \text{VLT: } 40 \%)$$

$$v_{\max}: 0,70 \text{ m/s @ } m_{\text{low}}: 60 \text{ kg} \quad \rightarrow 0,2 \text{ m/s (MVT)} \times 150 \% \text{ (RSVT)} = v_{RSVT}: 0,3 \text{ m/s } (\approx \text{VLT: } 57 \%)$$

**Anwendung der RSVT auf Berechnungsbeispiel 4:**

$$v_{\max}: 0,62 \text{ m/s @ } F_{\text{high}}: 80 \text{ kg} \quad \rightarrow 0,2 \text{ m/s (MVT)} \times 150 \% \text{ (RSVT)} = v_{RSVT}: 0,3 \text{ m/s } (\approx \text{VLT: } 52 \%)$$

$$v_{\max}: 0,56 \text{ m/s @ } F_{\text{low}}: 80 \text{ kg} \quad \rightarrow 0,2 \text{ m/s (MVT)} \times 150 \% \text{ (RSVT)} = v_{RSVT}: 0,3 \text{ m/s } (\approx \text{VLT: } 46 \%)$$

Wie die exemplarische Anwendung der Berechnung der Abbruchgeschwindigkeit auf Basis von MVT und RSVT zeigt, wäre die  $v_{RSVT}$  unabhängig von der Notwendigkeit zur Realisierung volitional maximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeiten zu Beginn des Trainingssatzes, da die Steuerung der muskulären Ermüdung bei diesem adaptierten Ansatz auf Basis der MVT als Ausgangswert der Berechnung erfolgt. Dies ermöglicht gegenüber dem aktuellen Ansatz (VLT), gemäß der in Kapitel 2.3.2 dargestellten Problematik, eine Steuerung der muskulären Ermüdung, die als unabhängig von der volitional maximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit gilt.

Wendet man die RSVT auf das Widerstandstraining mit unterschiedlich hohen Lasten an, so ist zu erkennen, dass bei geringer Last nun eine stärkere intraserielle Reduktion der Bewegungsgeschwindigkeit als bei hoher Last hervorgerufen wird, ohne das absolute Ausmaß der muskulären Ermüdung zu verändern. Dies ermöglicht gegenüber dem aktuellen Ansatz (VLT), wie in Kapitel 2.2.3 dargestellt, eine Optimierung der ausgelösten Hypertrophieprozesse bei geringen Lasten.

Darüber hinaus wird das Ausmaß des intraseriellen Geschwindigkeitsverlustes, der als Indikator des Grades der muskulären Ermüdung angesehen werden kann, durch Anwendung der RSVT entsprechend der tagesaktuellen Höhe der realisierbaren Kraftleistung angepasst, sodass keine übermäßige Annäherung an das momentane konzentrische Muskelversagen erfolgt. Dies ermöglicht gegenüber dem aktuellen Ansatz (VLT), gemäß den bereits erläuterten Zusammenhängen, eine Steuerung der muskulären Ermüdung, die als unabhängig von der tagesaktuellen Kraftleistung gilt.

Zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung wäre es lediglich erforderlich, einmalig einen maximal ausbelastenden Trainingssatz für eine bestimmte Übung mit einem beliebigen Widerstand bzw. einer beliebigen Last  $\geq 30\%$  1-RM auszuführen, um die Geschwindigkeit der letzten realisierbaren Wiederholung vor dem Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens (MVT) zu messen.

### 3.1.5 Zielsetzung

Die übergeordnete Zielsetzung dieser Dissertation ist es, zu überprüfen, ob sich die Vorgabe einer Relative Stopping Velocity Threshold ([RSVT], berechnet als Vielfaches der MVT in Prozent) dazu eignet, den Grad der intraseriellen muskulären Ermüdung unabhängig von der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit zu Beginn eines Trainingssatzes zu steuern.

Um die Anwendbarkeit dieses skizzierten Steuerungsansatzes durch Vorgabe einer RSVT bestätigen zu können, muss geprüft werden, ob sich die übungsspezifische MVT bei unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten ( $v_{\max}$  vs.  $v_{\text{sub}}$ ) sowie bei unterschiedlichen Lasten (1-RM vs. 75 % 1-RM) unterscheidet. Dazu muss die MVT zwischen submaximaler und maximaler volitionaler Bewegungsgeschwindigkeit bei submaximalen Widerständen verglichen werden. Darüber hinaus muss die MVT bei Belastungen mit maximalem Widerstand mit den MVT-Werten bei Belastungen mit submaximalen Widerständen bei verschiedenen Geschwindigkeiten ( $v_{\max}$  &  $v_{\text{sub}}$ ) verglichen werden.

Wenn angenommen wird, dass die periphere Ermüdung die realisierbaren Geschwindigkeiten unabhängig von der ursprünglichen intentionalen Bewegungsgeschwindigkeit im Verlauf des Satzes angleicht, sollten sich die konzentrischen Geschwindigkeiten der letzten Wiederholungen vor dem Punkt des momentanen Muskelversagens (engl.: „repetitions in reserve“; [RIR]; z. B. RIR 3-1) nicht zwischen volitional maximaler Geschwindigkeit ( $v_{\max}$ ) und volitional submaximaler Geschwindigkeit ( $v_{\text{sub}}$ ) unterscheiden.

Um den Grad der muskulären Ermüdung steuern zu können, muss überprüft werden, ob ein übungsspezifischer Zusammenhang zwischen den konzentrischen Geschwindigkeiten der letzten realisierbaren Wiederholungen vor dem momentanen konzentrischen Muskelversagen in Relation zur MVT (ausgedrückt als RSVT) und der Anzahl noch ausführbarer Wiederholungen bis zur maximalen Ausbelastung (z. B. RIR 3-1) besteht.

Ist die MVT unabhängig von der verwendeten Last sowie von der volitionalen Bewegungsgeschwindigkeit und besteht ein Zusammenhang zwischen RIR und der relativen konzentrischen Geschwindigkeit der RIR (ausgedrückt als  $\text{RSVT} = v_{\text{RIR}} \div \text{MVT}$ ), so könnte der muskuläre Ermüdungsgrad last- und geschwindigkeitsunabhängig gesteuert werden, indem

man eine entsprechende RSVT zur Berechnung der Abbruchgeschwindigkeit ( $v_{RSVT} = MVT \times RSVT$ ) der Belastung innerhalb eines Trainingsatzes definiert. Die RSVT gilt dabei auch als tagesformunabhängig, sofern die psychische Bereitschaft zur maximalen Anstrengung zumindest am Satzende vorhanden ist.

Da anzunehmen ist, dass die Spezifität des Trainings sowie der Trainingszustand durch unterschiedliche Qualitäten der Bewegungstechnik sowie unterschiedliche Erfahrungswerte bei der Realisierung maximaler Ausbelastungen einen Einfluss auf die MVT besitzen, muss der Zusammenhang zwischen RIR und RSVT bei unterschiedlichen Abstufungen des Trainingszustandes (trainiert vs. detrainiert) und der Trainingsspezifität (fitness-/gesundheitsorientiert vs. leistungsorientiert) untersucht werden. Darüber hinaus muss die Genauigkeit des verwendeten Instruments zur Messung der Bewegungsgeschwindigkeiten überprüft werden, um die Aussagen zum Steuerungsansatz auf Basis der RSVT abzusichern.

## 3.2 Forschungsfragen

Aus den zuvor dargestellten Problemstellungen und den daraus abgeleiteten theoretischen Lösungsansätzen können die nachfolgenden Forschungsfragen in Form von Fragenkomplexen gebildet werden.

Die ersten vier Fragenkomplexe dienen der Überprüfung, ob die grundsätzlichen Voraussetzungen zur Anwendung eines Steuerungsansatzes auf Basis der MVT erfüllt sind, weshalb die Untersuchung und Beantwortung dieser Forschungsfragen in Kapitel 4.2 als Voruntersuchungen dargestellt wird. Die Fragenkomplexe fünf bis sieben bilden die zentralen Forschungsfragen zur Überprüfung der Anwendbarkeit der RSVT als Parameter zur geschwindigkeitsbasierten Steuerung des Grades der intraserialen Ermüdung ab, weshalb die Untersuchung dieser Forschungsfragen als Gegenstand der Hauptuntersuchung gilt.

### 3.2.1 Fragenkomplexe der Voruntersuchungen

#### Fragenkomplex 1:

Existiert eine annehmbare Übereinstimmung zwischen den gemessenen Bewegungsgeschwindigkeiten des Vmaxpro-Sensors und des Qualisys Motion Capture Systems bei der Übung Kreuzheben mit der Langhantel...

- 1a) bei volitional maximalen Bewegungsgeschwindigkeiten?
- 1b) bei volitional submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten?

#### Fragenkomplex 2:

Besitzt die volitionale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit einen Einfluss auf den Verlauf des Hantelpfades bei der Übung Kreuzheben mit der Langhantel?

- 2) Unterscheiden sich die Differenzen der absoluten Strecke des beobachteten Hantelpfades und der isolierten vertikalen Strecke des Hantelpfades bei einem Widerstandstraining mit submaximalen Lasten zwischen unterschiedlichen volitionalen Bewegungsgeschwindigkeiten (maximale und submaximale Bewegungsgeschwindigkeit) bei der Übung Kreuzheben mit der Langhantel?

**Fragenkomplex 3:**

Besteht in der fitnessorientierten Probandenstichprobe ein geschlechtsspezifischer Unterschied zwischen den relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten der letzten Wiederholungen vor dem Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens (RSVT bei RIR3-1) bei einem ausbelastenden Widerstandstraining mit submaximaler Last und volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit?

**Fragenkomplex 4:**

Besteht ein Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten bei der jeweils letzten ausführbaren Wiederholung vor dem Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens (MVT) bei einem ausbelastenden Widerstandstraining mit maximaler Last ( $MVT_{1-RM}$ ), submaximaler Last bei volitional maximaler Bewegungsgeschwindigkeit ( $MVT_{75\%v_{max}}$ ) und submaximaler Last bei volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit ( $MVT_{75\%v_{sub}}$ )?

- 4a) Unterscheidet sich die MVT innerhalb der untersuchten Probandenstichproben zwischen den Testsätzen mit maximaler Last ( $MVT_{1-RM}$ ), submaximaler Last bei volitional maximaler Bewegungsgeschwindigkeit ( $MVT_{75\%v_{max}}$ ) und submaximaler Last bei volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit ( $MVT_{75\%v_{sub}}$ )?
- 4b) Unterscheidet sich die MVT zwischen unterschiedlichen Trainingszuständen (detrainiert vs. trainiert) innerhalb der fitness-/gesundheitsorientiert trainierenden Probandenstichprobe?
- 4c) Unterscheidet sich die MVT zwischen zwei Probandenstichproben mit unterschiedlicher Ausrichtung des Widerstandstrainings (fitness-/gesundheitsorientiert vs. leistungsorientiert) im vergleichbaren Trainingszustand?

### 3.2.2 Fragenkomplexe der Hauptuntersuchung

#### Fragenkomplex 5:

Besteht ein Unterschied zwischen den relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten der letzten drei realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT (RSVT bei RIR3-1) bei einem ausbelastenden Widerstandstraining mit submaximalen Lasten und volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit innerhalb der betrachteten Probandenstichproben?

5a) Unterscheidet sich die RSVT innerhalb einer fitness-/gesundheitsorientiert trainierenden Probandenstichprobe im detrainierten Trainingszustand zwischen RIR3, RIR2 und RIR1?

5b) Unterscheidet sich die RSVT innerhalb einer fitness-/gesundheitsorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Trainingszustand zwischen RIR3, RIR2 und RIR1?

5c) Unterscheidet sich die RSVT innerhalb einer leistungsorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Trainingszustand zwischen RIR3, RIR2 und RIR1?

#### Fragenkomplex 6:

Besteht ein Unterschied zwischen den relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten der letzten drei realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT (RSVT bei RIR3-1) bei einem ausbelastenden Widerstandstraining mit submaximalen Lasten und volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit zwischen den betrachteten Probandenstichproben?

6a) Unterscheidet sich die RSVT von RIR3, RIR2 und RIR1 zwischen den verschiedenen Trainingszuständen (detrainiert vs. trainiert) einer fitness-/gesundheitsorientiert trainierenden Probandenstichprobe?

6b) Unterscheidet sich die RSVT von RIR3, RIR2 und RIR1 zwischen zwei Probandenstichproben im trainierten Zustand mit verschiedenen Ausrichtungen des Widerstandstrainings (fitness-/gesundheitsorientiert vs. leistungsorientiert)?

**Fragenkomplex 7:**

Besteht ein Zusammenhang der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit der letzten vier realisierbaren Wiederholungen vor dem Punkt des momentanen Muskelversagens bei einem ausbelastenden Widerstandstraining mit submaximalen Lasten (RSVT bei RIR3-0) und der Anzahl der noch realisierbaren Wiederholungen (RIR3-0)...

7a) bei einer fitness-/gesundheitsorientiert trainierenden Probandenstichprobe im detrainierten Trainingszustand?

7b) bei einer fitness-/gesundheitsorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Trainingszustand?

7c) bei einer leistungsorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Trainingszustand?

### 3.3 Allgemeine Forschungshypothesen

Aus den dargestellten Fragenkomplexen können die nachfolgenden allgemeinen Forschungshypothesen abgeleitet werden, die zur besseren Übersicht in Hypothesen der Voruntersuchungen und Hypothesen der Hauptuntersuchung aufgeteilt werden.

#### 3.3.1 Allgemeine Forschungshypothesen der Voruntersuchungen

##### Allgemeine Forschungshypothese zu Fragenkomplex 1:

- 1) Die mithilfe des Vmaxpro-Sensors gemessenen Geschwindigkeitswerte von konzentrischen Bewegungen mit unterschiedlichen volitionalen Bewegungsgeschwindigkeiten unterscheiden sich nicht von den Messwerten des Qualisys Motion Capture Systems ( $v_{\text{Qualisys}} = v_{\text{Vmaxpro}}$ ).

##### Allgemeine Forschungshypothese zu Fragenkomplex 2:

- 2) Die mittleren Differenzen der absoluten Strecke des beobachteten Hantelpfades und der isolierten vertikalen Strecke des Hantelpfades bei einem Widerstandstraining mit submaximalen Lasten unterscheiden sich zwischen unterschiedlichen volitionalen Bewegungsgeschwindigkeiten (maximale und submaximale Bewegungsgeschwindigkeit) beim Kreuzheben mit der Langhantel ( $\text{Streckendifferenz}_{\text{vsub}} \neq \text{Streckendifferenz}_{\text{vmax}}$ ).

##### Allgemeine Forschungshypothese zu Fragenkomplex 3:

- 3) Die relative konzentrische Geschwindigkeit (RSVT) der drei letzten ausführbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT (RIR3-1) unterscheiden sich nicht zwischen männlichen und weiblichen Probanden bei verschiedenen volitionalen Bewegungsgeschwindigkeiten ( $\text{RSVT}_{\text{männlich}} = \text{RSVT}_{\text{weiblich}}$ ).

**Allgemeine Forschungshypothesen zu Fragenkomplex 4:**

- 4a) Die konzentrische Geschwindigkeit der letzten vollständig ausführbaren Wiederholung vor dem Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens (MVT) unterscheidet sich nicht zwischen Belastungen mit verschiedenen Lasten und verschiedenen volitionalen Bewegungsgeschwindigkeiten innerhalb von Probandenstichproben mit gleichem Trainingszustand und gleicher Ausrichtung des Widerstandstrainings ( $MVT_{1-RM} = MVT_{75\%vmax} = MVT_{75\%vsub}$ ).
- 4b) Die konzentrische Geschwindigkeit der letzten vollständig ausführbaren Wiederholung vor dem Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens (MVT) bei Belastungen mit verschiedenen Lasten und verschiedenen volitionalen Bewegungsgeschwindigkeiten unterscheidet sich zwischen Probandenstichproben mit verschiedenen Trainingszuständen und Ausrichtungen des Widerstandstrainings ( $MVT_{FKT detrainiert} = MVT_{FKT trainiert}$ ;  $MVT_{FKT trainiert} = MVT_{LKT trainiert}$ ).

### 3.3.2 Allgemeine Forschungshypothesen der Hauptuntersuchung

#### Allgemeine Forschungshypothese zu Fragenkomplex 5:

- 5) Die relative konzentrische Geschwindigkeit (RSVT) der Wiederholungen eines Testsatzes mit submaximaler Belastungsintensität und volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit unterscheidet sich zwischen RIR3, RIR2 und RIR1 innerhalb von Probandenstichproben mit gleichem Trainingszustand und gleicher Ausrichtung des Widerstandstrainings ( $RSVT_{RIR3} \neq RSVT_{RIR2} \neq RSVT_{RIR1}$ ).

#### Allgemeine Forschungshypothesen zu Fragenkomplex 6:

- 6) Die relativen konzentrischen Geschwindigkeiten (RSVT) der letzten drei realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT (RIR3-1) innerhalb eines Testsatzes mit submaximaler Last und volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit unterscheiden sich zwischen Probandenstichproben mit verschiedenen Trainingszuständen und verschiedenen Ausrichtungen des Widerstandstrainings ( $RSVT_{FKT\text{detrainiert}} \neq RSVT_{FKT\text{trainiert}}$ ;  $RSVT_{FKT\text{trainiert}} \neq RSVT_{LK\text{trainiert}}$ ).

#### Allgemeine Forschungshypothese zu Fragenkomplex 7:

- 7) Es gibt einen starken Zusammenhang zwischen der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit der letzten vier realisierbaren Wiederholungen vor dem Punkt des momentanen Muskelversagens bei einem ausbelastenden Widerstandstraining mit submaximalen Lasten (RSVT bei RIR3-0) und der Anzahl der noch realisierbaren Wiederholungen (RIR3-0) innerhalb der Probandenstichproben mit gleichem Trainingszustand und gleicher Ausrichtungen des Widerstandstrainings.

---

IV

UNTERSUCHUNGSMETHODIK

---

## 4.1 Untersuchungsmethodik der Hauptuntersuchung

Zur Beantwortung der in Kapitel 3.2.2 dargestellten Forschungsfragen wurde eine explanative, prospektive Untersuchung im quasiexperimentellen Design durchgeführt.

Es handelte sich dabei um ein Zweigruppensdesign mit nicht-probabilistischer Stichprobenziehung (Döring & Bortz, 2015, S. 305–308), bei dem in beiden Gruppen jeweils beide Abstufungen der unabhängigen Variable (volitional maximale vs. submaximale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit zu Beginn des Testsatzes) in randomisierter Reihenfolge appliziert wurden, um deren Einfluss auf die abhängige Variable (konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der Wiederholungen am Ende eines ausbelastenden Testsatzes) bei den Langhantelübungen Bankdrücken und Kreuzheben zu untersuchen.

Dabei wurden für alle Probanden und Untersuchungszeitpunkte an einem ersten Termin die individuelle dynamische Maximalkraftleistung (1-RM) für beide Testübungen ermittelt und an einem zweiten Termin die eigentliche Testung durchgeführt. An diesem zweiten Testtermin wurden pro Übung jeweils ein Testsatz mit volitional maximaler und ein Testsatz mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit bei einer standardisierten Belastungsintensität von 75 % 1-RM ausgeführt, während die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der einzelnen Wiederholungen mittels einer Inertialsensoreinheit erfasst wurde.

Sowohl die Reihenfolge der Übungsausführung als auch die Reihenfolge der verwendeten volitionalen Bewegungsgeschwindigkeiten wurde balanciert randomisiert. Detaillierte Informationen zur Probandenstichprobe, zum Untersuchungsablauf und der statistischen Datenanalyse werden in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt.

Die beiden Gruppen unterschieden sich in der grundsätzlichen Ausrichtung und Gestaltung des regelmäßig betriebenen Krafttrainings im Vorfeld der Untersuchung, wobei in einer Gruppe Personen mit allgemein fitness- und gesundheitsorientierter Ausrichtung (FKT) und in der anderen Gruppe Personen mit leistungsorientierter Ausrichtung (LKT) des Krafttrainings rekrutiert wurden, um den Einfluss der Trainingsausrichtung auf die beobachteten Geschwindigkeitsverläufe feststellen zu können.

Darüber hinaus wurde die fitnessorientierte Probandengruppe (FKT) in einer ersten Erhebungswelle nach einer mindestens dreimonatigen Unterbrechung des Krafttrainings mit höheren Intensitäten (FKT<sub>detrainiert</sub>) und in einer zweiten Erhebungswelle nach mindestens

sechsmonatiger Wiederaufnahme des regelmäßigen Krafttrainings (FKT<sub>trainiert</sub>) getestet, um den Einfluss des Trainingszustandes auf die beobachteten Geschwindigkeitsverläufe zu untersuchen.

Die leistungsorientierte Gruppe wurde ausschließlich im trainierten Trainingszustand (LKT<sub>trainiert</sub>) getestet, da es nicht möglich war, eine ausreichende Anzahl an leistungsorientierten Kraftsportlern zu rekrutieren, die die genannten Übungen über mehrere Monate nicht mit höheren Intensitäten ausgeführt haben.

Die Testung der jeweiligen Gruppen erfolgte in drei getrennten Erhebungswellen zu unterschiedlichen Zeitpunkten, deren Abfolge nachfolgend in Abb. 17 veranschaulicht werden.

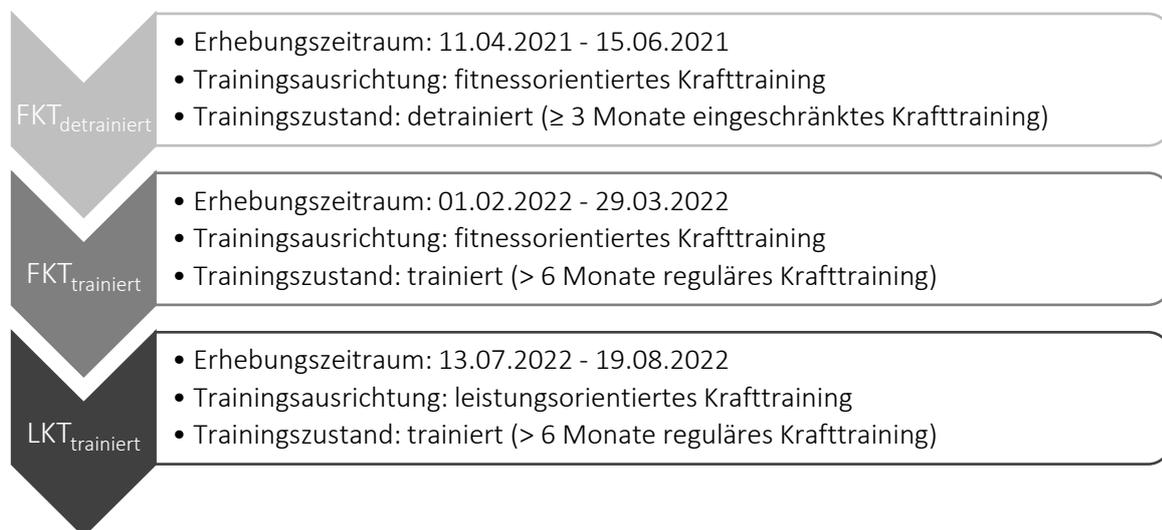


Abb. 17: Zeitliche Abfolge der Teiluntersuchungen

Dieses Untersuchungsdesign (Abb. 18) ermöglichte einerseits einen Längsschnittvergleich des Verlaufs der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten innerhalb der fitnessorientierten Probandengruppe, um den Einfluss des Trainingszustandes (FKT<sub>detrainiert</sub> vs. FKT<sub>trainiert</sub>) zu untersuchen, sowie andererseits einen Querschnittsvergleich zwischen der fitness- und der leistungsorientierten Probandengruppe (FKT<sub>trainiert</sub> vs. LKT<sub>trainiert</sub>) zur Untersuchung des Einflusses der Trainingsausrichtung.

	t0 (detrainiert)	t1 (trainiert)
FKT	X	X
LKT	O	X

Abb. 18: Untersuchungsdesign der Hauptuntersuchung

Die durchgeführte Untersuchung erfolgte im Rahmen eines Forschungsprojektes der Deutschen Hochschule für Prävention und Gesundheitsmanagement ([DHfPG]; Projektnummer: 02/21), weshalb das geplante Forschungsvorhaben vor Untersuchungsbeginn hinsichtlich der Deklaration von Helsinki sowie ethischer Aspekte durch den Forschungsausschuss der DHfPG geprüft wurde. In seiner Sitzung vom 17.06.2021 äußerte besagter Forschungsausschuss keine Einwände oder Bedenken gegen die Durchführung des Forschungsvorhabens. Es wurden sämtliche Maßnahmen ergriffen, um die Konformität der Datenerhebung, -speicherung und -verarbeitung mit der Datenschutzverordnung zu wahren. Alle Probanden mussten vor Untersuchungsbeginn eine Einwilligungserklärung zur Teilnahme sowie eine Datenschutzerklärung unterzeichnen und erhielten eine Teilnehmerinformation, in der über Ablauf, Risiken und Nutzen der Studie aufgeklärt wurde (vgl. Anhang 5-7).

### 4.1.1 Probandenstichprobe

Für die erste Teiluntersuchung (vgl. Abb. 17; FKT<sub>detrainiert</sub>) wurden gesunde, erwachsene Personen rekrutiert, die üblicherweise ein fitnessorientiertes Krafttraining durchführen (Primär- und Sekundärprävention). Diese Personen mussten vor der pandemiebedingten bundesweiten Schließung der Fitness- und Gesundheitsanlagen im November des Jahres 2020 bereits über mindestens zwölf Monate Krafttrainingserfahrung verfügen, wodurch diese in Anlehnung an Baechle (2008, S. 384) hinsichtlich ihrer technisch-koordinativen Fähigkeiten als fortgeschrittene Kraftsportler angesehen werden konnten. Als Krafttrainingserfahrung wurde innerhalb der vorliegenden Untersuchung ein mindestens einmal wöchentlich ausgeführtes Krafttraining definiert. Darüber hinaus sollten die rekrutierten Personen mindestens sechs Monate Erfahrung im Freihanteltraining, insbesondere mit der technischen Ausführung der Übungen Kreuzheben und Bankdrücken mit der Langhantel, aufweisen.

Als entscheidendes Einschlusskriterium galt darüber hinaus, dass die Personen während der pandemiebedingten Schließung der Trainingsstätten zwischen November 2020 und April 2021 kein regelmäßiges Krafttraining mit höheren Belastungsintensitäten als 70 % 1-RM bei den Übungen Bankdrücken und Kreuzheben mit der Langhantel betrieben haben durften, um gemäß des Untersuchungsdesigns (vgl. Abb. 18) als detrainiert zu gelten. Die Ausführung ähnlicher Übungen mit geringeren Intensitäten (< 70 % 1-RM) oder alternativen Widerständen (z. B. Widerstandsbänder, Kurzhanteln, Gewichtswesten etc.) war in dieser Zeit gestattet und wurde nicht als Ausschlusskriterium angesehen.

Die Versuchspersonen sollten typische fortgeschrittene Krafttrainierende in kommerziellen Fitness- und Gesundheitseinrichtungen repräsentieren. Nicht-repräsentative Minderheiten (z. B. professionelle oder leistungsorientierte Sportler, Rehabilitanden, Senioren, Kinder und Jugendliche) wurden als Versuchspersonen für diese Teilerhebung ausgeschlossen. Weitere Ausschlusskriterien für eine Teilnahme an der Studie waren zudem manifeste Erkrankungen des Herz-Kreislauf-, Atmungs- oder Bewegungssystems (Tertiärprävention, Rehabilitation) sowie die mangelnde Fähigkeit zur technisch-koordinativ angemessenen Ausführung der zuvor genannten Trainingsübungen.

Vor der Durchführung der Testungen (vgl. Kapitel 4.1.2) erfolgte eine ausführliche Anamnese (vgl. Anhang 1), um eventuelle gesundheitliche Risiken ausschließen und die Einhaltung der Ein- und Ausschlusskriterien gewährleisten zu können. Die Qualität der technisch-koordinativen

Bewegungsausführung wurde im Kontext der spezifischen Erwärmung am ersten Testtermin überprüft.

Die Rekrutierung erfolgte durch direkte Ansprache von Mitgliedern in saarländischen Fitness- und Gesundheitseinrichtungen sowie durch Ausschreibungen zur Teilnahme über die zugehörigen Einrichtungsprofile in diversen sozialen Medienplattformen.

Schlussendlich wurde für die erste Teilerhebung (FKT<sub>detrainiert</sub>) eine Stichprobengröße von 26 Personen (Alter =  $31,44 \pm 4,46$  Jahre; Größe =  $1,75 \pm 0,09$  m; Gewicht =  $76,26 \pm 16,40$  kg), bestehend aus jeweils 13 männlichen und 13 weiblichen Probanden, rekrutiert, welche die zuvor beschriebenen Kriterien erfüllten und die Testung vollständig durchliefen.

Für die zweite Teiluntersuchung (vgl. Abb. 17; FKT<sub>trainiert</sub>) wurde die Probandenstichprobe der ersten Teiluntersuchung erneut getestet, nachdem die bundesweite pandemiebedingte Schließung der Fitness- und Gesundheitsanlagen aufgehoben wurde und die Personen seit mindestens sechs Monaten wieder regelmäßig Krafttraining mit höheren Intensitäten betreiben konnten. Darüber hinaus sollten die Personen seit Wiederaufnahme des Krafttrainings regelmäßig die Übungen Bankdrücken und Kreuzheben mit der Langhantel ausgeführt haben, um gemäß des Untersuchungsdesigns (vgl. Abb. 18) als trainiert zu gelten. Vor der Durchführung der Testungen (vgl. Kapitel 4.1.2) erfolgte erneut eine ausführliche Anamnese (vgl. Anhang 3), um eventuelle zwischenzeitlich entstandene gesundheitliche Risiken ausschließen und die Einhaltung der Ein- und Ausschlusskriterien gewährleisten zu können.

Zwischen der ersten und zweiten Teiluntersuchung gab es in der fitnessorientierten Untersuchungsgruppe insgesamt sieben Dropouts (zwei männliche und fünf weibliche Personen). Zwei Teilnehmer konnten aufgrund von Schulterverletzungen nicht an der zweiten Teilerhebung teilnehmen. Bei den fünf weiblichen Personen wurde das Ausscheiden aus der Untersuchung in einem Fall durch nicht trainingsassoziierte Rückenbeschwerden, in einem Fall durch fehlendes Langhanteltraining zwischen der ersten und zweiten Teilerhebung, in einem Fall durch einen berufsbedingten Wohnortwechsel, in einem Fall durch Schwangerschaft und einem weiteren Fall durch gesundheitliche Einschränkungen infolge eines Verkehrsunfalls begründet.

Dementsprechend verblieben nach Abschluss der zweiten Teiluntersuchung insgesamt 19 vollständige Datensätze von elf männlichen (Alter =  $32,45 \pm 5,15$  Jahre; Größe =  $1,81 \pm 0,04$  m; Gewicht =  $81,09 \pm 8,02$  kg) und acht weiblichen Personen (Alter =  $31,50 \pm 3,59$  Jahre; Größe =

1,67 ± 0,07 m; Gewicht = 63,13 ± 8,63 kg), die die erste und zweite Teiluntersuchung vollständig durchlaufen haben, um den Längsschnittvergleich (vgl. Abb. 18) der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten innerhalb der fitnessorientierten Probandengruppe (FKT<sub>detrainiert</sub> vs. FKT<sub>trainiert</sub>) statistisch zu analysieren. Eine detaillierte Darstellung der deskriptiven Parameter der untersuchten Stichprobe wird in Kapitel 5 im Rahmen der Ergebnisse zur Untersuchung der jeweils zugehörigen Fragenkomplexe vorgenommen.

Für die dritte Teiluntersuchung (vgl. Abb. 17; LKT<sub>trainiert</sub>) wurden gesunde, erwachsene Personen rekrutiert, die üblicherweise ein leistungsorientiertes Krafttraining durchführen. Als leistungsorientiertes Krafttraining wurde im Kontext der vorliegenden Untersuchung ein Krafttraining verstanden, das zum Zeitpunkt der Testung seit mindestens drei Jahren mit der Zielsetzung betrieben wird, die individuelle Maximalkraftleistung oder die Muskelmasse zu maximieren. Für den Einschluss in die Untersuchung war es von untergeordneter Bedeutung, ob das Krafttraining mit der Absicht betrieben wurde, einen entsprechenden Wettkampf zu betreiben oder nicht, da die Absicht des Leistungsvergleichs nicht mit der Absicht der Leistungsmaximierung respektive der leistungsorientierten Trainingsausrichtung gleichgesetzt werden kann. Hinsichtlich der methodischen Trainingsgestaltung wurde als ergänzendes Einschlusskriterium formuliert, dass die Probanden dieser Gruppe zur Teilnahme an der Untersuchung regelmäßig bzw. zyklisch wiederkehrend mit Belastungsintensitäten von 85 % 1-RM oder höher trainieren müssen.

Die Versuchspersonen sollten typische leistungsorientierte Kraftsportler in Fitness- und Gesundheitseinrichtungen repräsentieren. Nicht-repräsentative Minderheiten (z. B. professionelle Sportler, Rehabilitanden, Senioren, Kinder und Jugendliche) wurden als Versuchspersonen für diese Teilerhebung ausgeschlossen. Weitere Ausschlusskriterien für eine Teilnahme an der Studie waren zudem manifeste Erkrankungen des Herz-Kreislauf-, Atmungs- oder Bewegungssystems. Vor der Durchführung der Testungen (vgl. Kapitel 4.1.2) erfolgte eine ausführliche Anamnese (vgl. Anhang 4), um eventuelle gesundheitliche Risiken ausschließen und die Einhaltung der Ein- und Ausschlusskriterien gewährleisten zu können.

Die Rekrutierung erfolgte durch gezielte Ansprache von leistungsorientiert trainierenden Mitgliedern in saarländischen Fitness- und Gesundheitseinrichtungen sowie in einschlägigen Sportvereinen mit Kraftsportsparten.

Schlussendlich wurde für die dritte Teiluntersuchung ( $LKT_{\text{trainiert}}$ ) eine Stichprobengröße von zehn männlichen Personen (Alter =  $31,80 \pm 8,31$  Jahre; Größe =  $1,81 \pm 0,04$  m; Gewicht =  $92,24 \pm 9,36$  kg) rekrutiert, welche die zuvor beschriebenen Kriterien erfüllten und die Testung vollständig durchliefen. Eine detaillierte Darstellung der deskriptiven Parameter der untersuchten Stichprobe wird in Kapitel 5 im Rahmen der Ergebnisse zur Untersuchung der jeweils zugehörigen Fragenkomplexe vorgenommen.

Dementsprechend verblieben nach Abschluss der dritten Teiluntersuchung insgesamt 21 vollständige Datensätze von elf männlichen Personen im trainierten Zustand aus der fitnessorientierten Probandengruppe ( $FKT_{\text{trainiert}}$ ) und zehn männlichen Personen im trainierten Zustand aus der leistungsorientierten Probandengruppe ( $LKT_{\text{trainiert}}$ ), um den Querschnittvergleich (vgl. Abb. 18) der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten zwischen der fitnessorientierten und der leistungsorientierten Probandengruppe ( $FKT_{\text{trainiert}}$  vs.  $LKT_{\text{trainiert}}$ ) statistisch zu analysieren.

### 4.1.2 Untersuchungsablauf

Die erste Teiluntersuchung fand mit einer fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe unmittelbar nach einer mehrmonatigen Unterbrechung des regelmäßigen Krafttrainings mit höheren Belastungsintensitäten bei den Übungen Kreuzheben und Bankdrücken mit der Langhantel statt.

In der zweiten Teiluntersuchung wurde dieselbe Probandenstichprobe erneut getestet, nachdem die Personen seit mindestens sechs Monaten wieder ihrem regulären Krafttraining nachgehen konnten, um die Untersuchung des Einflusses des Trainingszustandes auf die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der letzten realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen des momentanen konzentrischen Muskelversagens zu ermöglichen.

In einer dritten Teiluntersuchung wurden leistungsorientiert trainierende Personen getestet, die aufgrund ihrer spezifischen Ausrichtung des Trainings darin geübt waren, sich bei den Übungen Kreuzheben und Bankdrücken mit der Langhantel, insbesondere mit höheren Belastungsintensitäten, bis zur vollständigen muskulären Erschöpfung zu beanspruchen, um als Vergleichsgruppe zur Untersuchung des Einflusses der Trainingsausrichtung auf die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der letzten realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen des momentanen konzentrischen Muskelversagens zu dienen.

In allen drei Teilerhebungen erfolgte an einem ersten Termin (vgl. Abb. 19) zunächst die Erfassung der Anamnesedaten zur Kontrolle der Ein- und Ausschlusskriterien, die Instruktion der Probanden sowie eine Aufklärung hinsichtlich der geltenden Bestimmungen zur Studienteilnahme und des Datenschutzes. Im direkten Anschluss erfolgte an diesem ersten Termin die Testung der individuellen konzentrischen Maximalkraft (1-RM-Test; vgl. Kapitel 4.1.2.2) bei den Übungen Kreuzheben und Bankdrücken mit der Langhantel (vgl. Kapitel 4.1.2.1), während mit einer Inertialsensoreinheit die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit automatisiert erfasst, unmittelbar über eine drahtlose Datenverbindung auf einen Tablet-PC übertragen und dort gespeichert wurde, um die Datenerhebung möglichst unabhängig vom Testleiter zu gestalten (vgl. 4.1.2.3).

An einem zweiten Termin (vgl. Abb. 19), der in einem zeitlichen Abstand von mindestens drei und höchstens zehn Tagen zum ersten Termin erfolgen musste, wurden beide Testübungen jeweils für zwei maximal ausbelastende Testsätze mit 75 % 1-RM ausgeführt (X-RM-Test; vgl.

Kapitel 4.1.2.2). Bei diesem X-RM-Test wurde jeweils ein Testsatz mit volitional maximaler ( $v_{\max} \approx 2/0/X/0$  s) und ein Testsatz mit volitional submaximaler ( $v_{\text{sub}} \approx 2/0/2/0$  s) konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit ausgeführt.

Die Probanden erhielten die Instruktion, die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit vom Beginn der Testsätze bis zum Erreichen des momentanen konzentrischen Muskelversagens möglichst aufrechtzuerhalten. Dies bedeutete, dass bei  $v_{\max}$  jede Wiederholung mit maximal möglicher konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit ausgeführt werden sollte, bis sich die konzentrischen Bewegungsphasen ermüdungsbedingt so stark verringert hatten, dass keine weitere Wiederholung mehr vollständig ausgeführt werden konnte. Bei  $v_{\text{sub}}$  bedeutete dies, dass die vorgegebene submaximale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit so lange beibehalten werden sollte, bis die Zielgeschwindigkeit ermüdungsbedingt nicht mehr länger aufrechterhalten werden konnte und sich die Bewegungsgeschwindigkeit nachfolgend so stark verringerte, dass keine weitere Wiederholung mehr möglich war. Wie am ersten Termin wurden die tatsächlich realisierten konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten auch an diesem zweiten Termin mit einer Inertialsensoreinheit automatisiert erfasst, unmittelbar über eine drahtlose Datenverbindung auf einen Tablet-PC übertragen und dort gespeichert, um die Datenerhebung möglichst unabhängig vom Testleiter zu gestalten.

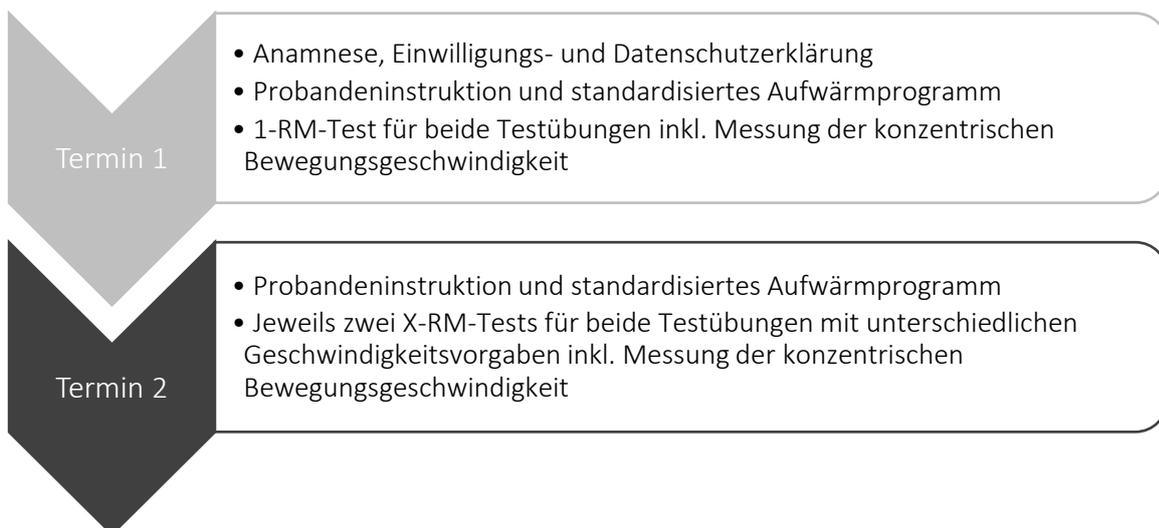


Abb. 19: Schematische Übersicht des Untersuchungsablaufs

Vor Testbeginn wurde bei allen Teilerhebungen jeweils an beiden Terminen ein standardisiertes Programm zur allgemeinen Erwärmung durchgeführt, das aus jeweils zwei Sätzen zu je zwanzig Wiederholungen Kniebeugen ohne Zusatzlast und zehn Wiederholungen Liegestütze ohne Zusatzlast sowie ausgewählten Übungen zur Mobilisation der bei den Testübungen beteiligten Muskel-Gelenksysteme bestand. Vor jeder Testübungen wurde zudem ein standardisiertes Protokoll zur spezifischen Erwärmung befolgt (vgl. Kapitel 4.1.2.2).

Zur Kontrolle möglicher Reihenfolgeeffekte wurde sowohl die Reihenfolge der Testübungen als auch die Reihenfolge der Geschwindigkeitsvorgabe ( $v_{\max}$  vs.  $v_{\text{sub}}$ ) in allen Teilerhebungen balanciert randomisiert und innerhalb der jeweiligen Teilerhebungen für beide Testtermine beibehalten. Darüber hinaus wurden alle Testungen unter vergleichbaren räumlichen und materiellen Bedingungen durchgeführt.

Als Testorte, welche die erforderlichen Kriterien erfüllten, wurden der Trainingsraum der DHfPG und BSA-Akademie, der Trainingsraum des Kraftsportvereins AC Heros Wemmetweiler sowie der private Trainingsraum des Testleiters genutzt.

Auf Testgewöhnungstermine wurde, aufgrund der per Einschlusskriterium kontrollierten Vorerfahrung im Krafttraining mit den Testübungen sowie der dadurch als gering zu betrachtenden Relevanz technisch-koordinativer Störeinflüsse, verzichtet.

Nach Ende der Datenerhebung jeder Teiluntersuchung erfolgte die Übertragung der erfassten Daten vom Tablet-PC mittels einer applikationsinternen Exportfunktion in ein für Tabellenkalkulationsprogramme geeignetes Format sowie die Datensicherung auf eigens dafür vorgesehenen Wechseldatenträgern.

#### 4.1.2.1 Testübungen

Die in der Untersuchung zu testenden Krafttrainingsübungen bestanden aus jeweils einer Komplexbewegung zur Kräftigung der oberen und unteren Extremitäten. Aufgrund der Popularität und Relevanz im fitness- sowie im leistungsorientierten Krafttraining wurden im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit das Kreuzheben mit der Langhantel und das Bankdrücken mit der Langhantel als Testübungen verwendet. Ein weiteres Entscheidungskriterium für diese Übungsauswahl bestand darin, dass sich beide Übungen sehr gut hinsichtlich der technischen Bewegungskörperausführung sowie des verwendeten Bewegungsumfangs (engl.: „range of motion“; [ROM]) standardisieren lassen. So galt bei beiden Testübungen die größtmögliche physiologische ROM im Rahmen der individuellen Beweglichkeit als Ausführungsnorm während aller Testungen. Der Standardisierung der ROM kam in der dargestellten Untersuchung eine besondere Bedeutung zu, da die zurückgelegte Strecke der Langhantel einerseits zur Erfassung der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (abhängige Variable; vgl. Kapitel 4.1.2.3) sowie andererseits zur Definition des konzentrischen Muskelversagens bzw. der ermüdungsbedingten Unfähigkeit zur vollständigen Bewegungskörperausführung als Testabbruchkriterium von entscheidender Relevanz war. Für das Kreuzheben bedeutete dies, dass die Langhantel mit gestreckten Armen vom Boden in den aufrechten Stand mit vollständig gestreckten Kniegelenken angehoben werden musste. Für das Bankdrücken bedeutete dies, dass die Langhantel vom Brustkorb bis zur vollständigen Streckung der Ellenbogengelenke nach oben gedrückt werden musste.

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt, wurden die Testtermine aller Teiluntersuchungen unter Einhaltung vergleichbarer Bedingungen hinsichtlich der räumlichen (z. B. ebener, stoßdämpfender Fallschutzboden als Untergrund) und materiellen Voraussetzungen (z. B. Beschaffenheit und Maße der Langhantel, der Gewichtsscheiben und der Trainingsbank) durchgeführt.

So wurde bei allen Testungen eine standardisierte Langhantel mit einem Gewicht von 20 kg und Griffweitenmarkierungen sowie Hantelmaßen (Länge und Griffdurchmesser der Hantelstange) nach Standard der IPF (International Powerlifting Federation [IPF], 2023, S. 5–7) verwendet.

Um in der Ausgangsposition des Kreuzhebens eine einheitliche Distanz der Langhantel zum Boden zu gewährleisten und Störeinflüsse auf die Inertialsensoreinheit in Form von Stößen und Vibrationen zu verringern, wurden als Hantelscheiben ausschließlich gummierte Gewichtsscheiben (engl. „bumper plates“) verwendet, die in den Gewichtsabstufungen von fünf bis 25 kg einen identischen Durchmesser aufwiesen. Bei der Ergänzung der Lasten durch kleinere Scheiben (1,25 kg und 2,5 kg) wurde auf eine Standardisierung verzichtet, da diese bei den verwendeten Lasten (Testgewicht  $\geq 30$  kg) keinen Einfluss auf den Bodenabstand hatten. Darüber hinaus wurde bei allen Testterminen eine gepolsterte Trainingsbank mit einer über die gesamte Länge gleichbleibenden Breite verwendet.

Die Bewegungsbeschreibung der verwendeten Ausführungsvarianten des Kreuzhebens und Bankdrückens mit der Langhantel sowie die verpflichtend vorgeschriebenen und optional verwendbaren Hilfsmittel bei der Testdurchführung werden nachfolgend dargestellt.

### **Kreuzheben mit der Langhantel**

Bei der in dieser Untersuchung verwendeten Ausführungsvariante des Kreuzhebens mit der Langhantel handelte es sich um das konventionelle Kreuzheben.

In der Ausgangsposition dieser Variante wird die Hantelstange mit gestreckten Armen ungefähr in schulterbreitem Abstand gegriffen, während die Füße und Kniegelenke in einem geringeren Abstand als die Griffweite positioniert werden. In der Ausgangsposition befinden sich die Hüft- und Kniegelenke in gebeugter Position, während der Oberkörper mit neutraler Position der Wirbelsäule so weit nach vorne geneigt ist, dass sich die Schultergelenke vertikal über bzw. geringfügig vor der Hantelstange befinden. Durch aktive Streckung der Sprung- und Kniegelenke wird die Hantelstange mit isometrischer Fixierung des Schultergürtels sowie der Wirbelsäule in Neutralposition vom Boden bis ungefähr auf Kniehöhe angehoben. Nach dieser ersten Phase der Bewegung, die aufgrund der nahezu unveränderten Oberkörperverneigung auch als Parallelverschiebung bezeichnet wird, erfolgt das weitere Anheben der Langhantel zunehmend durch eine aktive Streckung der Hüftgelenke, während die Arme über die gesamte Bewegung gestreckt bleiben. Der Übergang zwischen beiden Bewegungsphasen erfolgt fließend und unterscheidet sich im Ablauf von Individuum zu Individuum geringfügig. Die Langhantel wird durch zunehmende Streckung der Sprung-, Knie- und Hüftgelenke in den

vollständig aufrechten Stand angehoben, sodass die Person in der Endposition der Bewegung gestreckte Knie- und Hüftgelenke aufweist und die Schultergelenke hinter der Hantelstange positioniert sind (Pürzel, 2022, S. 97–113). Die nachfolgend dargestellten Abbildungen zeigen den Bewegungsablauf des konventionellen Kreuzhebens mit der Langhantel aus der frontalen (vgl. Abb. 20) sowie aus der lateralen (vgl. Abb. 21) Betrachtungsperspektive.



Abb. 20: Kreuzheben mit der Langhantel – frontale Ansicht

(Abbildung mit freundlicher Genehmigung der ©BSA-Akademie/DHfPG)



Abb. 21: Kreuzheben mit der Langhantel – laterale Ansicht

(Abbildung mit freundlicher Genehmigung der ©BSA-Akademie/DHfPG)

Die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit wurde, wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, in Abhängigkeit zum jeweiligen Testsatz des X-RM-Tests randomisiert vorgegeben. Da die Bewegungsgeschwindigkeit bei 1-RM-Tests aufgrund der maximalen Lastwiderstände ohnehin nicht willkürlich steuerbar ist, wurde hier lediglich die Empfehlung ausgesprochen, sich möglichst explosiv gegen den Lastwiderstand zu bewegen.

Zur Rückkehr in die Ausgangsposition sollte die exzentrische Bewegungsphase bei allen Wiederholungen der X-RM-Tests bis zum Kontakt der Langhantel mit dem Boden möglichst

kontrolliert erfolgen, ohne dass die Langhantel vollständig abgelegt wurde. Durch diese Vorgabe sollte verhindert werden, dass der Aufprall der Hantelscheiben auf dem Fallschutzboden bei unkontrolliertem oder zu schnellem Absenken der Langhantel durch das nachfolgende Wegfedern vom Boden zur Erleichterung der nachfolgenden konzentrischen Bewegungsphase führt, da dies eine potenzielle Verzerrung der gemessenen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit begünstigt hätte.

Da die individuelle Leistungsfähigkeit der Hand- und Unterarmmuskulatur einen potenziell leistungslimitierenden Effekt auf das Testergebnis dieser Untersuchung hat, wurden mögliche Störeinflüsse der Griffkraft durch die verpflichtende Verwendung von Zughilfen aus Stoff in allen Testsätzen beider Termine eliminiert. Die Zughilfen wurden standardisiert im beidhändigen Obergriff an der Hantelstange befestigt und deren Verwendung im Bedarfsfall vor Beginn der spezifischen Erwärmung demonstriert. Hinsichtlich des Schuhwerks existierte keine standardisierte Vorgabe. Es wurde lediglich die Empfehlung ausgesprochen, aus Gründen der besseren Kraftübertragung und Stabilität der Sprunggelenke, auf Schuhe mit stark gedämpfter Sohle sowie auf Schuhe mit großer Sprengung (z. B. Laufschuhe) zu verzichten und stattdessen entweder keine Schuhe oder Schuhe mit flacher und möglichst dünner bzw. harter Sohle zu tragen. Zur Verwendung von unterstützenden Gewichthebergürteln wurde ebenfalls keine standardisierte Vorgabe ausgesprochen. Hier beschränkte sich die allgemeine Empfehlung darauf, im Individualfall einen Gewichthebergürtel im Rahmen der Testung zu verwenden, sofern ein solcher auch im regulären Krafttraining verwendet würde.

### **Bankdrücken mit der Langhantel**

Neben dem zuvor dargestellten Kreuzheben wurde das Bankdrücken mit der Langhantel in dieser Untersuchung als Testübung verwendet.

Beim Bankdrücken befindet sich die Person in Rückenlage auf einer Trainingsbank, wobei sich der Kopf vertikal unter der in der Hantelablage gelagerten Langhantel befindet. Das Herausheben der Langhantel aus der Hantelablage konnte während der Testtermine nach individueller Präferenz entweder mit oder ohne Unterstützung durch den Testleiter erfolgen. Diese Position der Langhantel nach dem Herausheben ist beim Bankdrücken identisch mit der Endposition am Ende der konzentrischen Bewegungsphase.

Im Gegensatz zum konventionellen Kreuzheben, bei dem die Bewegung direkt in der Ausgangsposition mit der Langhantel am Boden beginnt, startet man beim Bankdrücken aus dieser Endposition zunächst mit einer exzentrischen Bewegung, um in die Ausgangsposition zu gelangen, in der die Langhantel den Brustkorb auf Höhe der distalen Hälfte des Sternums berührt. Diese exzentrische Bewegung sollte bei allen Wiederholungen der X-RM-Tests sowie beim 1-RM-Test bis zum Kontakt der Langhantel mit dem Brustkorb möglichst kontrolliert erfolgen, ohne dabei die Langhantel vollständig abzulegen. Die Kadenz der exzentrischen Phase wurde zur Gewährleistung einer kontrollierten Absenkbewegung der Langhantel mit einer Dauer von ungefähr zwei Sekunden vorgegeben. In einer Untersuchung wurde nachgewiesen, dass dadurch, im Gegensatz zu langsameren exzentrischen Phasen beim Bankdrücken (z. B. sechs Sekunden), keine negative Beeinflussung der Krafterzeugung sowie der Bewegungsgeschwindigkeit in der nachfolgenden konzentrischen Phase stattfindet (Wilk, Golas, Krzysztofik, Nawrocka & Zajac, 2019). Durch diese Vorgabe sollte verhindert werden, dass ein unkontrolliertes oder zu schnelles Absenken der Langhantel auf den Brustkorb und ein anschließendes reaktives Wegfedern vom Brustkorb zur Erleichterung der nachfolgenden konzentrischen Bewegungsphase führt, da dies, ähnlich wie der Bodenkontakt beim Kreuzheben, eine potenzielle Verzerrung der gemessenen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit begünstigt hätte. Auf eine Bewegungspause am unteren Umkehrpunkt der Bewegung wurde trotz potenzieller Vorteile für die Datenerhebung (Pallarés, Sánchez-Medina, Pérez, La Cruz-Sánchez & Mora-Rodriguez, 2014) verzichtet, da dies außerhalb der wettkampfspezifischen Ausführung des Bankdrückens im Kontext der Sportart Kraftdreikampf vergleichsweise selten Anwendung findet und sich demzufolge negativ auf den Praxistransfer der Untersuchungsergebnisse ausgewirkt hätte. Nachdem die Langhantel bis zum flüchtigen Kontakt mit dem Brustkorb abgesenkt worden ist, wird die Langhantel durch eine aktive Extension der Ellenbogengelenke sowie eine aktive Horizontalabduktion und Anteversion im Schultergelenk nach oben gedrückt, bis sich die Hantel wieder in der Endposition der Bewegung vertikal über der Stemmachse der Schultergelenke befindet. Das Bankdrücken mit der Langhantel weist einen charakteristischen Hantelpfad auf, der aufgrund der Bewegung von der Ausgangs- zur Endposition üblicherweise schräg und leicht bogenförmig verläuft (Pürzel, 2022, S. 79–95). Die nachfolgend dargestellten Abbildungen zeigen den Bewegungsablauf des Bankdrückens mit der Langhantel aus der frontalen (vgl. Abb. 22) sowie aus der lateralen (vgl. Abb. 23) Betrachtungsperspektive.



Abb. 22: Bankdrücken mit der Langhantel – frontale Ansicht

(Abbildung mit freundlicher Genehmigung der ©BSA-Akademie/DHfPG)



Abb. 23: Bankdrücken mit der Langhantel – laterale Ansicht

(Abbildung mit freundlicher Genehmigung der ©BSA-Akademie/DHfPG)

Bei dieser Testübung lag die Person in Rückenlage auf einer gepolsterten Trainingsbank mit durchgehend gleichbleibender Breite und behielt über den gesamten Bewegungsablauf beide Füße fest auf dem Boden. Das Gesäß sollte während der gesamten Testdauer den Kontakt zur Trainingsbank beibehalten, um eine übermäßige Krümmung (Lordosierung) des Oberkörpers sowie die Erzeugung eines zusätzlichen Impulses durch die unteren Extremitäten bei der Übungsausführung zu vermeiden, da dies zur Verzerrung der gemessenen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten führen könnte.

Zur Verwendung von Bandagen zur Stabilisierung der Handgelenke wurde keine standardisierte Vorgabe ausgesprochen. Hier beschränkte sich die allgemeine Empfehlung darauf, im Individualfall Handgelenksbandagen während der Testdurchführung zu verwenden, sofern diese im regulären Krafttraining üblicherweise ebenfalls verwendet würde.

#### 4.1.2.2 Testprotokolle

In allen Teiluntersuchungen wurde, wie bereits im einleitenden Teil von Kapitel 4.1.2 ausführlich beschrieben, an einem ersten Testtermin ein 1-RM-Test zur Bestimmung der dynamischen Maximalkraft sowie an einem zweiten Testtermin zwei X-RM-Tests mit submaximaler Last durchgeführt. Beide Testtermine wurden so festgelegt, dass diese einen zeitlichen Abstand von mindestens drei und maximal zehn Tagen aufwiesen. Die Probanden wurden im Vorfeld der jeweiligen Untersuchung rechtzeitig darauf hingewiesen, dass sie auf Krafttraining sowie sonstige körperlich stark beanspruchende Tätigkeiten an den Tagen unmittelbar vor den Testterminen nach Möglichkeit verzichten sollten, um in möglichst vollständig regeneriertem Zustand und im Vollbesitz ihrer körperlichen Leistungsfähigkeit an der Untersuchung teilnehmen zu können.

Die Durchführung der genannten Tests folgte dabei standardisierten Protokollen, um eine Messung der abhängigen Variable bei allen untersuchten Personen unter vergleichbaren Bedingungen zu gewährleisten. Die verwendeten Testprotokolle des 1-RM-Tests sowie des X-RM-Tests werden nachfolgend stichpunktartig dargestellt.

##### 1-RM-Test (Termin 1)

Als 1-RM wurde in dieser Untersuchung die maximale Last definiert, die bei einer technisch korrekten und über die vollständige, individuell mögliche Bewegungsamplitude für eine einzelne Wiederholung der jeweiligen Testübung bewältigt werden kann. Die Reihenfolge der Testübungen wurde innerhalb der getesteten Probandenstichprobe balanciert randomisiert.

Der Ablauf des 1-RM-Tests wurde in der Untersuchung folgendermaßen standardisiert:

- Allgemeine Erwärmung:

Zur allgemeinen Erwärmung wurde ein standardisiertes, ungefähr fünfminütiges Aufwärmprogramm ausgeführt, bestehend aus nicht erschöpfenden Kräftigungs- und Mobilisationsübungen mit dem eigenen Körpergewicht.

- Spezifische Erwärmung (erste Testübung):

Nach der allgemeinen Erwärmung wurde die Gewichtslast für den ersten Testsatz (geschätztes 1-RM) vom Versuchsleiter in Rücksprache mit dem Probanden durch subjektive Selbsteinschätzung für beide Testübungen festgelegt. Anschließend folgten drei Sätze der ersten Testübung zur spezifischen Erwärmung:

- Erster Satz: Ausführung von acht Wiederholungen mit 50 % der im ersten Testsatz aufgelegten Gewichtslast (geschätztes 1-RM)
- Zweiter Satz: Ausführung von fünf Wiederholungen mit 70 % der im ersten Testsatz aufgelegten Gewichtslast (geschätztes 1-RM)
- Dritter Satz: Ausführung von einer Wiederholung mit 90 % der im ersten Testsatz aufgelegten Gewichtslast (geschätztes 1-RM)

- 1-RM-Test (erste Testübung):

Nach der spezifischen Erwärmung für die erste Testübung wurde ein 1-RM-Test zur Ermittlung der dynamischen Maximalkraft bei der ersten Testübung durchgeführt, der folgenden Vorgaben folgte:

- Zur Limitierung des Einflusses akkumulierter Ermüdung wurde die Durchführung auf maximal vier Testsätze limitiert.
- Es wurde maximal eine Wiederholung pro Testsatz ausgeführt.
- Wurde in einem ausgeführten Testsatz keine neuromuskuläre Ausbelastung erzielt, so folgte der nächste Testsatz nach einer fünfminütigen Belastungspause.
- Die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit aller Testsätze wurde automatisiert durch eine Inertialsensoreinheit erfasst, auf einen Tablet-PC übertragen und in einem anonymisierten Profil gespeichert.
- Als Ausbelastungskriterien galten primär das Erreichen des konzentrischen Muskelversagens sowie sekundär eine technisch unkorrekte oder unvollständige Bewegungsausführung.

Das beschriebene Vorgehen zur spezifischen Erwärmung sowie zur Durchführung des 1-RM-Tests wurde anschließend in gleicher Weise für die zweite Testübung wiederholt.

### X-RM-Testung (Termin 2)

Die X-RM-Testung wich in dieser Untersuchung von der „klassischen“ X-RM-Testung ab, bei der die maximal mögliche Gewichtslast für eine vorher definierte Wiederholungszahl ermittelt wird. Als X-RM wurde im Kontext der dargestellten Untersuchung die maximal realisierbare Wiederholungszahl definiert, die in einem maximal ausbelastenden Testsatz mit einer vorgegebenen Belastungsintensität von 75 % 1-RM und der vorgegebenen volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{\max} \approx 2/0/X/0$  bzw.  $v_{\text{sub}} \approx 2/0/2/0s$ ) erzielt werden konnte.

Die Reihenfolge der Testübungen sowie der vorgegebenen volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten wurde innerhalb der getesteten Probandenstichprobe balanciert randomisiert.

Der Ablauf der X-RM-Tests wurde in der Untersuchung folgendermaßen standardisiert:

- Allgemeine Erwärmung:

Zur allgemeinen Erwärmung wurde ein standardisiertes, ungefähr fünfminütiges Aufwärmprogramm ausgeführt, bestehend aus nicht erschöpfenden Kräftigungs- und Mobilisationsübungen mit dem eigenen Körpergewicht.

- Spezifische Erwärmung (erste Testübung):

Nach der allgemeinen Erwärmung wurde die individuell zu bewältigende Gewichtslast, die einer Belastungsintensität von 75 % 1-RM entsprach, für beide Testsätze vom Versuchsleiter berechnet. Anschließend folgten zwei Sätze der ersten Testübung zur spezifischen Erwärmung:

- Erster Satz: Ausführung von acht Wiederholungen mit 50 % der für die Testsätze vorgesehenen Gewichtslast (75 % 1-RM)
- Zweiter Satz: Ausführung von einer Wiederholung mit 80 % der für die Testsätze vorgesehenen Gewichtslast (75 % 1-RM)

- X-RM-Tests:

Nach der spezifischen Erwärmung für die erste Testübung wurden zwei X-RM-Tests mit unterschiedlichen volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten mit einer Belastungsintensität von 75 % 1-RM bei der ersten Testübung durchgeführt, wobei folgende Vorgaben galten:

- Die Reihenfolge der Geschwindigkeitsvorgabe ( $v_{\max}$  &  $v_{\text{sub}}$ ) in beiden Testsätzen wurde innerhalb der Stichprobe balanciert randomisiert.
- Es wurden maximal viele Wiederholungen pro Testsatz mit der jeweils vorgegebenen volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit ausgeführt, bis das momentane konzentrische Muskelversagen erreicht wurde.
- Zur Vermeidung ermüdungsbedingter Einflüsse auf die Anzahl realisierbarer Wiederholungen musste zwischen beiden Testsätzen eine mindestens fünfminütige Belastungspause eingehalten werden.
- Die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit aller vollständig ausgeführten Wiederholungen wurde automatisiert durch eine Inertialsensoreinheit erfasst, auf einen Tablet-PC übertragen und in einem anonymisierten Profil gespeichert.
- Als Ausbelastungskriterien galten primär das Erreichen des konzentrischen Muskelversagens sowie sekundär eine technisch unkorrekte oder unvollständige Bewegungsausführung.

Das beschriebene Vorgehen zur spezifischen Erwärmung sowie zur Durchführung der X-RM-Tests wurde anschließend in gleicher Weise für die zweite Testübung wiederholt.

#### 4.1.2.3 Variablen und Messtechnik

In der vorliegenden Untersuchung (vgl. Kapitel 4.1) wurde der Einfluss einer unabhängigen Variable (primär: volitionale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit) auf eine abhängige Variable (relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit) untersucht. Darüber hinaus konnte der Einfluss von Trainingszustand und -ausrichtung über die Gruppenzugehörigkeit ( $FKT_{\text{detrainiert}}$ ,  $FKT_{\text{trainiert}}$  &  $LKT_{\text{trainiert}}$ ) untersucht werden (vgl. Kapitel 4.1.2).

Die primäre **unabhängige Variable (UV)** wurde näher definiert als die im nicht ermüdeten Zustand zu Beginn eines Testsatzes initial realisierte Bewegungsgeschwindigkeit in der konzentrischen Bewegungsphase einer Testübung, die individuell durch die Höhe des willkürlich erzeugten Krafteinsatzes gesteuert wurde. Dabei wurden zwei Abstufungen der beschriebenen UV verwendet, die in dieser Untersuchung als volitional maximale ( $v_{\text{max}} \approx 2/0/X/0$  s) und als volitional submaximale ( $v_{\text{sub}} \approx 2/0/2/0$  s) konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit bezeichnet wurden. Die UV ist als ordinalskaliert anzusehen, da die konzentrische Geschwindigkeitsvorgabe bei  $v_{\text{max}}$  nicht einheitlich definiert werden kann, sondern lediglich eine individuell höhere Geschwindigkeit als  $v_{\text{sub}}$  darstellt (Döring & Bortz, 2015, S. 232–233). Wie bereits in Kapitel 4.1.2.1 erläutert, wurde die Kadenz der exzentrischen Phase standardisiert vorgegeben, um negative Einflüsse auf die Genauigkeit der Messergebnisse zu vermeiden. Die Vorgabe einer zweisekündigen Exzentrik ermöglicht dies ohne die Bewegungsgeschwindigkeit in der nachfolgenden konzentrischen Phase zu beeinträchtigen, was bei längeren exzentrischen Bewegungsphasen beobachtet wurde (Wilk et al., 2019). Da zudem der Einfluss des Trainingszustandes sowie die Ausrichtung des Trainings auf die abhängige Variable untersucht werden sollte, wurde die Zugehörigkeit zur jeweiligen Untersuchungsgruppe bei der statistischen Datenanalyse ebenfalls als unabhängige Variable behandelt (vgl. Kapitel 4.1.3). Alle Untersuchungsgruppen ( $FKT_{\text{detrainiert}}$ ,  $FKT_{\text{trainiert}}$  &  $LKT_{\text{trainiert}}$ ) wurden während der Testung jeweils beiden Abstufungen der primären UV (volitionale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit) während der Ausführung beider Testübungen (vgl. Kapitel 4.1.2.1) in balanciert randomisierter Reihenfolge ausgesetzt (vgl. Kapitel 4.1.2.2). Darüber hinaus stellte die Nähe zur MVT, ausgedrückt als die Anzahl der noch vollständig ausführbaren Wiederholungen bis zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens ( $RIR3$ ,  $RIR2$  &  $RIR1$ ), im Kontext der formulierten Unterschieds- und Zusammenhangshypothesen (vgl. Kapitel 3.3.2) ebenfalls eine unabhängige Variable dar.

Als **abhängige Variable (AV)** wurde in dieser Untersuchung die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (Relative Stopping Velocity Threshold; [RSVT]) festgelegt, welche die Höhe der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit ( $v$ ) einer Wiederholung in Relation zur MVT widerspiegelt und mit der Formel  $RSVT = v \div MVT$  berechnet wird. Die RSVT drückt damit die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit als Vielfaches der MVT aus und wird in Prozent angegeben (z. B.  $RSVT = 0,24 \text{ m/s} \div 0,12 \text{ m/s} = 200 \%$ ).

Die zur Berechnung der RSVT verwendete konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit wurde näher definiert als die durchschnittliche Bewegungsgeschwindigkeit in der konzentrischen Bewegungsphase einer einzelnen Wiederholung (engl.: „mean velocity“; [MV]) während der Ausführung der verwendeten Testübungen (vgl. Kapitel 4.1.2.1). Die MV sowie die MVT sind als Geschwindigkeit ([ $v$ ]; gemessen in Meter pro Sekunde; [m/s]) operationalisiert und gelten daher als metrische Größen, weshalb die daraus berechnete RSVT ebenfalls als metrisch (kardinal- bzw. verhältnisskaliert) anzusehen ist (Döring & Bortz, 2015, S. 232–233).

Im Kontext der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung wird neben der MV auch häufig die höchste konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (engl.: „peak velocity“; [PV]) oder die durchschnittliche propulsive Bewegungsgeschwindigkeit während der konzentrischen Phase (engl.: „mean propulsive velocity“; [MPV]) als Steuerungs- und Monitoringparameter verwendet (Weakley et al., 2021, S. 3). Da PV und MPV primär zur Steuerung explosiver Bewegungen sowie beim Monitoring der schnellkraftassoziierten Bewegungsqualität verwendet werden können und nicht den Beschleunigungs- respektive Geschwindigkeitsverlauf der Bewegung über die gesamte ROM abbilden, eignet sich als zentrale Kenngröße zur Steuerung der Belastungsintensität sowie zur Erfassung der intraseriellen Beanspruchung die MV weitaus besser als PV oder MPV (García-Ramos, Pestaña-Melero, Pérez-Castilla, Rojas & Gregory Haff, 2018; Weakley et al., 2020, S. 4). Aufgrund dieser besonderen Eignung der MV zur Belastungssteuerung und Testung im Krafttraining sowie ihrer weiten Verbreitung in der Trainingspraxis außerhalb von Schnellkraftsportarten wurde diese in der vorliegenden Untersuchung zur Berechnung der abhängigen Variable (RSVT) verwendet. Die MV wurde mithilfe einer Inertialsensoreinheit bei jeder vollständig ausgeführten Wiederholung in beiden Testsätzen (beide Abstufungen der UV) gemessen, um den Einfluss der UV auf die reale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit bei zunehmender Ermüdung bis zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens feststellen zu können. Die Erfassung und Speicherung der MV war in allen untersuchten Probandengruppen (FKT<sub>trainiert</sub>,

FKT<sub>trainiert</sub> & LKT<sub>trainiert</sub>) gleich und erfolgte unabhängig vom Testleiter vollständig automatisiert sowie nach standardisierten Testprotokollen (vgl. Kapitel 4.1.2.2). Die anschließende Berechnung der abhängigen Variable (RSVT) aus MV und MVT erfolgte über die Tabellenkalkulationssoftware Microsoft® 365 Excel®.

Da laut aktueller Studienlage empfohlen wird, sich zur Optimierung der Hypertrophieeffekte innerhalb eines Trainingsatzes dem Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens bis auf mindestens vier Wiederholungen anzunähern (vgl. Kapitel 2.2.3; Helms et al., 2018; Krzysztolik et al., 2019), wird als abhängige Variable die RSVT der letzten vier vollständig ausführbaren Wiederholungen (RIR3, RIR2, RIR1 und RIR0/MVT) eines ausbelastenden Testsatzes betrachtet.

Da die konzentrische Geschwindigkeit der letzten vollständig ausführbaren Wiederholung vor dem Erreichen des momentanen konzentrischen Muskelversagens (RIR0) die Minimal Velocity Threshold ( $MVT = v_{RIR0}$ ) darstellt, wäre die RSVT bei RIR0 immer 100% ( $RSVT_{RIR0} = v_{RIR0} \div MVT = 100\%$ ). Aus diesem Grund wird in den Hauptuntersuchungen primär die RSVT von RIR3, RIR2 und RIR1 analysiert. Die RIR0 bzw. MVT wird aufgrund ihrer Bedeutung zur Berechnung der RSVT in einer eigenen Voruntersuchung betrachtet (vgl. Kapitel 4.2.3).

Die **Datenerfassung** (Messung der abhängigen Variable „mean velocity“; [MV]) erfolgte bei jeder vollständig ausgeführten Wiederholung während des 1-RM- und der X-RM-Tests beider Testübungen mithilfe einer Inertialsensoreinheit. Solche tragbaren Sensorsysteme zur Erfassung sportmotorischer Parameter im Allgemeinen sowie zur Belastungssteuerung des Krafttrainings im Speziellen, waren bereits Gegenstand diverser wissenschaftlicher Untersuchungen, deren Ergebnissen zufolge IMUs als praktische sowie kosteneffiziente Hilfsmittel zur Trainings- respektive Leistungssteuerung angesehen werden können (Balsalobre-Fernández, Kuzdub, Poveda-Ortiz & Del Campo-Vecino, 2016; Camomilla et al., 2018; van der Kruk & Reijne, 2018). In der vorliegenden Untersuchung wurde der Vmaxpro Sensor (Abb. 24), eine speziell für die Anwendung zur Belastungssteuerung im Kontext des Krafttrainings entwickelte IMU, der Marke Vmaxpro (neue Markenbezeichnung: „Enode Pro“; Linnecke, 2022) der BM Sports Technology GmbH (2022a) zur Datenerfassung verwendet.



Abb. 24: Enode Sensor (Nachfolgemodell des „Vmaxpro Sensor“; BM Sports Technology GmbH, 2022b)

Der Vmaxpro Sensor besitzt eine magnetische, nach innen gewölbte Unterseite, mit der er sich passgenau am Griff der Langhantelstange befestigen lässt. Während der Testdurchführung wurde der Sensor mithilfe eines mitgelieferten gepolsterten Klettbandes gesichert, indem das Gerät in eine dafür vorgesehene Schlaufe des Bandes hineingeschoben und dieses Band anschließend um den Griff der Hantelstange gewickelt wurde (Abb. 25), um einerseits ein Verrutschen oder Abfallen des Sensors zu verhindern und um andererseits die Störanfälligkeit der Datenerfassung durch Vibrationen und Stöße der Langhantel zu verringern. Da der Einfluss der Positionierung des Sensors auf die Messgenauigkeit laut einer Untersuchung von Fritschi, Seiler und Gross (2021) vernachlässigbar gering ist, wurde der Sensor aus Gründen der Praktikabilität beim Bankdrücken in der Mitte der Langhantel und beim Kreuzheben außerhalb der Griffweitenmarkierung der Langhantel positioniert, um eine Behinderung der Bewegungsausführung durch den Sensor zu vermeiden.



Abb. 25: Befestigung der Inertialsensoreinheit an der Langhantel mithilfe eines gepolsterten Klettbandes (BM Sports Technology GmbH, 2022b)

Die erfassten Daten wurden unmittelbar nach Vollendung einer Wiederholung automatisiert vom Vmaxpro Sensor via Bluetooth auf einen Tablet-PC der Marke Apple übertragen. Dort wurden sie in der dem Sensor zugehörigen Applikationssoftware („Vmaxpro App“ mit der Lizenz „Vmaxpro Trainer“) angezeigt, grafisch visualisiert und gespeichert. Die genutzte Lizenz der Vmaxpro App besaß eine applikationsinterne Funktion zum Datenexport in ein für Tabellenkalkulationsprogramme kompatibles Format, wodurch die Datenübertragung, -speicherung und -aufbereitung unabhängig vom Testleiter erfolgen konnte.

Der Vmaxpro Sensor gilt als valides und reliables Messinstrument zur Erfassung von Bewegungsgeschwindigkeiten. Dies wurde in einer Untersuchung der Übungen Kniebeuge und Hip Thrust mit der Langhantel bei wiederholter Bewegungsausführung in mehreren Trainingssätzen mit Belastungsintensitäten von 75 % 1-RM untersucht und bestätigt (Held, Rappelt, Deutsch & Donath, 2021). Die Validität und Reliabilität des Vmaxpro Sensors wurde durch weitere wissenschaftliche Untersuchungen für die Anwendung zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Krafttraining mit verschiedenen Langhantelübungen bestätigt (Feuerbacher et al., 2023; Fritschi et al., 2021; Menrad & Edelman-Nusser, 2021). In einer weiteren Arbeit von Jukic, King, Sousa, Prnjak und McGuigan (2023) empfehlen die Autoren den Vmaxpro Sensor aufgrund der geringen Größe der festgestellten Messfehler für das Monitoring der neuromuskulären Leistungsfähigkeit sowie zur Belastungssteuerung innerhalb von Krafttrainingseinheiten, insbesondere anhand der MV. Demzufolge kann die Verwendung des Vmaxpro Sensors zur Datenerfassung innerhalb der hier dargestellten Untersuchung als sinnvoll und legitim angesehen werden.

### 4.1.3 Statistische Datenanalyse

Wie im einleitenden Text zu Kapitel 4.1 bereits erwähnt wurde, handelt es sich bei der vorliegenden Untersuchung um eine explanative, prospektive Studie im quasiexperimentellen Design. Als explanative Studien werden Untersuchungen bezeichnet, deren Zweck in der Überprüfung der Gültigkeit von evidenz- bzw. theoriebasiert abgeleiteten Hypothesen besteht. Dabei werden die postulierten Effekte auf die abhängige Variable durch quantitative Methoden getestet und statistisch analysiert (Döring & Bortz, 2015, S. 192). Das Design der vorliegenden Untersuchung gilt als quasi-experimentell, da die zur Prüfung der Hypothesen beobachteten Untersuchungsgruppen nicht zufällig zusammengestellt, sondern ohne Randomisierung gebildet wurden und der Effekt auf die abhängige Variable durch systematische Variation der unabhängigen Variablen innerhalb dieser Untersuchungsgruppen gemessen wurde (Döring & Bortz, 2015, S. 193–194). Zur Weiterverarbeitung und Aufbereitung der gemessenen Daten wurde die Tabellenkalkulationssoftware Microsoft® 365 Excel® genutzt. Um die Gültigkeit der Hypothesen inferenzstatistisch zu prüfen, wurden auf Basis der aufbereiteten Daten entsprechende Berechnungen mithilfe der Software IBM® SPSS® Statistics 27 durchgeführt.

Die Beschreibung der Probandenstichprobe anhand geeigneter Maßzahlen erfolgt durch die deskriptive Statistik, welche das Ziel verfolgt, Beobachtungen von sowie Zusammenhänge zwischen untersuchungsrelevanten Merkmalen anhand statistischer Kenngrößen transparent abzubilden (Fröhlich, Mayerl, Pieter & Kemmler, 2020, S. 39–42). Zur deskriptiven Darstellung der Daten werden als statistische Kenngrößen üblicherweise sowohl Maße der zentralen Tendenz (alt.: Lageparameter), wie beispielsweise der Modalwert, der Median oder das arithmetische Mittel, als auch Dispersionsmaße (alt.: Streuungsmaße), wie beispielsweise die Spannweite, Minimum und Maximum, die Varianz, die Standardabweichung oder der Variationskoeffizient angegeben (Mittag, 2017b, S. 61–78). Aufgrund der überwiegend metrischen Skalierung der relevanten Parameter, werden nachfolgend die Maße arithmetisches Mittel, Median, Minimum und Maximum, Varianz und Standardabweichung zur deskriptiven Darstellung der Probandenstichproben dieser Untersuchung verwendet.

Zur Hypothesenprüfung werden schließende bzw. inferenzstatistische Testverfahren angewendet. Diese Testverfahren prüfen in der quantitativen Forschung die statistische Signifikanz der empirischen Forschungsergebnisse (Döring & Bortz, 2015, S. 659). Solche

Signifikanztests verfahren dabei nach einer indirekten Testlogik, bei der zur Verifikation von Unterschieden oder Zusammenhängen zwischen Merkmalen von Stichproben (Alternativhypothese;  $[H_1]$ ) versucht wird, das Gegenteil, dementsprechend das Nichtvorhandensein von Unterschieden und Zusammenhängen (Nullhypothese;  $[H_0]$ ), zu falsifizieren. Hierzu wird ein Wert für die Wahrscheinlichkeit einer irrtümlichen Falsifikation der  $H_0$  ( $\alpha$ -Fehler) festgelegt, der auch als Signifikanzniveau bezeichnet wird. Liegt die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  für die Falsifikation der  $H_0$  unter diesem festgelegten Signifikanzniveau, kann im Umkehrschluss eine hohe Wahrscheinlichkeit für die Gültigkeit von  $H_1$  angenommen werden, was man in der Statistik als signifikantes Ergebnis bezeichnet (Fröhlich et al., 2020, S. 52–53). Das Signifikanzniveau wurde in der vorliegenden Untersuchung auf  $\alpha = 0,05$  ( $p < 0,05$ ) festgelegt. Um auch unvorhergesehene Einflüsse auf die beobachteten Variablen entgegen der erwarteten Richtung der Beeinflussung berücksichtigen zu können, wurden alle Signifikanztests unter Berücksichtigung des festgelegten Signifikanzniveaus ( $p < 0,05$ ) beidseitig durchgeführt (Fröhlich et al., 2020, S. 57–59).

### **Prüfung von Unterschiedshypothesen**

Zur Prüfung der Signifikanz von Mittelwertsunterschieden zwischen zwei abhängigen oder zwei unabhängigen Stichproben wird häufig der t-Test verwendet. Dieses Verfahren ist allerdings auf jene Anwendungsfälle beschränkt, bei denen nur zwei Gruppen respektive zwei Messzeitpunkte der gleichen Gruppe miteinander verglichen werden. Demgegenüber existiert ein statistisches Verfahren zur Signifikanzprüfung, das nicht nur eine Differenz zwischen zwei Mittelwerten, sondern die Varianz mehrerer Mittelwerte untersucht und diese aufzuklären versucht, weshalb dieses Verfahren als Varianzanalyse (engl.: „analysis of variance“; [ANOVA]) bezeichnet wird. Bei der ANOVA darf die UV auch nominalskaliert sein, während die AV jedoch metrisch skaliert sein muss, wodurch die UV im übergeordneten Sinn lediglich in der Gruppenzugehörigkeit besteht. Dadurch weist die ANOVA ein breites Anwendungsspektrum zur statistischen Datenanalyse im Kontext der quantitativen Forschung auf (Mittag, 2017a, S. 269–271; Schäfer, 2016, S. 217). Wird innerhalb einer Untersuchung der Effekt von nur einer UV (Faktor) mit zwei oder mehreren Ausprägungen auf die AV überprüft, so verwendet man eine sogenannte einfaktorielle Varianzanalyse. Weist das Untersuchungsdesign jedoch zwei oder mehr unabhängige Variablen mit jeweils zwei oder mehr Ausprägungen auf, muss eine

zwei- oder mehrfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt werden (Mittag, 2017a, S. 273–280; Schäfer, 2016, S. 219–226).

Wenn innerhalb einer Untersuchung, wie in der hier dargestellten Forschungsarbeit (vgl. Kapitel 4.1) mehr als zwei Messzeitpunkte betrachtet und verglichen werden, muss eine sogenannte ANOVA mit Messwiederholung (engl.: „repeated measures analysis of variance“; [RMANOVA]) als statistisches Verfahren herangezogen werden. Wiederholte Mittelwertvergleiche der gleichen Stichprobe könnten theoretisch auch mit mehreren einzelnen Signifikanztests berechnet werden. Allerdings würden durch eine solche Vorgehensweise gravierende inferenzstatistische Probleme in Form einer  $\alpha$ -Fehler-Kumulation entstehen. Um einer  $\alpha$ -Fehler-Kumulation bei der Berechnung von wiederholten Mittelwertvergleichen entgegenzuwirken, erfolgt bei der ANOVA mit Messwiederholung eine sogenannte  $\alpha$ -Fehler-Adjustierung mithilfe der Bonferroni-Korrektur, weshalb die RMANOVA zur statistischen Analyse bei Untersuchungsdesigns mit Messwiederholung aussagekräftigere Ergebnisse liefert als beispielsweise die wiederholte Berechnung von t-Tests (Döring & Bortz, 2015, S. 723). Um die Innersubjekteffekte der einzelnen Messzeitpunkte einer RMANOVA paarweise miteinander vergleichen zu können, werden sogenannte post hoc-Tests, wie der in dieser Untersuchung verwendeten Scheffé-Test, berechnet.

Da Messwiederholungen nicht nur im Sinne von Prä-Post-Messungen auftreten, sondern auch dadurch entstehen können, dass alle Untersuchungsgruppen die verschiedenen Experimentalbedingungen (Abstufungen der UV) nacheinander oder mehrfach durchlaufen, wurden in der vorliegenden Forschungsarbeit Varianzanalysen mit Messwiederholung zur inferenzstatistischen Überprüfung von Unterschiedshypothesen berechnet. Zur Analyse der Innersubjekteffekte innerhalb der gleichen Probandenstichproben (Unterschiede innerhalb  $FKT_{\text{detrainiert}}$ ,  $FKT_{\text{trainiert}}$  und  $LKT_{\text{trainiert}}$  sowie Unterschiede zwischen  $FKT_{\text{detrainiert}}$  und  $FKT_{\text{trainiert}}$ ) wurden einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung verwendet. Zur zusätzlichen Analyse von Zwischensubjekteffekten zwischen unterschiedlichen Probandenstichproben (Gruppenunterschiede zwischen  $FKT_{\text{trainiert}}$  und  $LKT_{\text{trainiert}}$ ) wurden einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung unter Berücksichtigung von Zwischensubjektfaktoren durchgeführt, welche auch als Mixed ANOVA bezeichnet werden (Döring & Bortz, 2015, S. 209). Neben dem Signifikanzniveau ( $p$ ) wird bei Varianzanalysen die Effektgröße Eta-Quadrat ( $\eta^2$ ) berechnet, die darstellt, wie groß der Anteil der durch die UV aufgeklärten Varianz an der Gesamtvarianz ist. Die nachfolgende Tabelle stellt dar, welche Konventionen zur Interpretation

des  $\eta^2$  bei Varianzanalysen gelten. Dementsprechend gilt bereits ein  $\eta^2$  ab dem Wert 0,14 bzw. eine Varianzaufklärung durch die UV von 14 % als großer Effekt (Schäfer, 2016, S. 234–235).

Tab. 1: Richtwerte zur Interpretation der Effektgröße bei Varianzanalysen (modifiziert nach Cohen, 1988; zitiert nach Schäfer, 2016, S. 235)

kleiner Effekt	ab $\eta^2 = 0,01$
mittlerer Effekt	ab $\eta^2 = 0,06$
großer Effekt	ab $\eta^2 = 0,14$

Um zu gewährleisten, dass die Datenanalyse mithilfe eines bestimmten parametrischen Testverfahrens (z. B. RMANOVA) aussagekräftige Ergebnisse liefert, muss zuvor die Erfüllung gewisser statistischer Voraussetzungen geprüft werden (Döring & Bortz, 2015, S. 617). Als erste Voraussetzung für die Berechnung von Varianzanalysen gilt, dass die Werte der abhängigen Variable in allen betrachteten Untersuchungsgruppen bzw. Faktorstufen auf Normalverteilung geprüft werden müssen. Die zweite Voraussetzung zur Berechnung von Varianzanalysen besteht in der Prüfung der Varianzhomogenität, wodurch sichergestellt werden soll, dass die Varianzen der abhängigen Variable in den betrachteten Gruppen nicht zu stark voneinander abweichen (Fröhlich et al., 2020, S. 59; Schäfer, 2016, S. 235). Bei der RMANOVA wird die Varianzhomogenität allerdings im Sinne der Varianzgleichheit der Differenzen aller Faktorstufen bzw. der Differenzen der AV zwischen mehreren Messzeitpunkten vorausgesetzt, was in diesem Kontext als Sphärizität bezeichnet wird. Bei Verletzung der Sphärizität ( $p \geq 0,05$  beim Mauchly-Test) kann zur Steigerung der Aussagekraft der Signifikanztestung eine sogenannte Epsilon-Korrektur angewendet werden, was in dieser Forschungsarbeit durch das Verfahren von Greenhouse-Geisser erfolgt (Armstrong, 2017; Döring & Bortz, 2015, S. 884). Darüber hinaus sollten sich keine Ausreißer im Sinne von Extremwerten (> 2,5-facher Interquartilsabstand) in den betrachteten Gruppen bzw. Faktorstufen befinden. Milde Ausreißer (1,5 – bis 2,5-facher Interquartilsabstand) wurden aufgrund der geringen Stichprobengrößen nicht von der Untersuchung ausgeschlossen, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass diese Daten bei Betrachtung größerer Stichproben in die übliche Streuung der Grundgesamtheit fallen können.

Auch wenn die Varianzanalyse laut Schäfer (2016, S. 235) relativ robust gegenüber Verletzungen dieser statistischen Voraussetzungen ist, sollten diese unbedingt geprüft und bei sehr starken Abweichungen auf nichtparametrische Testverfahren ausgewichen werden. Zur Prüfung der Normalverteilung der abhängigen Variablen wurde neben der im Zweifelsfall zusätzlich durchgeführten grafischen Bewertung anhand von Histogrammen mit Normalverteilungskurve primär der Shapiro-Wilk-Test verwendet, da dieser eine hohe Teststärke aufweist und sich besser für kleinere Stichproben eignet (Ghasemi & Zahediasl, 2012). Die Sphärizität wurde in SPSS mithilfe des Mauchly-Tests überprüft. Um bei Berechnung einer Mixed ANOVA auch Zwischensubjekteffekte analysieren zu können, muss neben der Sphärizität auch Varianzhomogenität zwischen den Gruppen als Voraussetzung erfüllt sein, was in SPSS mithilfe des Levene-Tests überprüft wurde. Beim Levene-Test wird die Bewertung basierend auf dem Median verwendet, da die Ergebnisse dieser Variante robuster gegen die Wirkung von Ausreißern und Extremwerten ist (Janssen & Laatz, 2017, S. 243–244).

### **Prüfung von Zusammenhangshypothesen**

Zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Merkmalen werden sogenannte Interdependenz- bzw. Korrelationsanalysen durchgeführt (Döring & Bortz, 2015, S. 677). Bei metrisch skalierten Variablen wird üblicherweise die Pearson-Produkt-Moment-Korrelation eingesetzt, um die Stärke des linearen Zusammenhangs zwischen den betrachteten Variablen zu bestimmen. Bei der Pearson-Produkt-Moment-Korrelation wird zur Quantifizierung der Stärke des Zusammenhangs der Korrelationskoeffizient ( $r$ ) berechnet, der einen Wert zwischen  $-1$  und  $+1$  annehmen kann (Fröhlich et al., 2020, S. 65–68). Dabei bedeutet ein Korrelationskoeffizient von  $r = 0$ , dass kein Zusammenhang zwischen den Variablen existiert und eine Korrelation von  $r = +1$  oder  $-1$  einen perfekten (positiven oder negativen) Zusammenhang zwischen den Variablen darstellt. Zur Interpretation der Stärke des Zusammenhangs können bei der Pearson-Produkt-Moment-Korrelation die in Tab. 2 dargestellten Richtwerte verwendet werden (Fröhlich et al., 2020, S. 59–60).

Tab. 2: Richtwerte zur Interpretation der Stärke des Zusammenhangs bei Assoziationsmaßen (modifiziert nach Fröhlich et al., 2020, S. 60)

Sehr schwacher Zusammenhang	$<  0,1 $
Schwacher Zusammenhang	$\geq  0,1 $ bis $<  0,3 $
Mittelstarker Zusammenhang	$\geq  0,3 $ bis $<  0,5 $
Starker Zusammenhang	$\geq  0,5 $ bis $<  0,7 $
Sehr starker Zusammenhang	$\geq  0,7 $ bis $<  0,9 $
Annähernd perfekter Zusammenhang	$\geq  0,9 $

Die durch korrelative Analysen gefundenen Zusammenhänge können jedoch keine Aussage über kausale Beziehungen zwischen den betrachteten Merkmalen treffen (Döring & Bortz, 2015, S. 677). Um kausale Zusammenhänge zwischen zwei Merkmalen im Sinne einer Kausalhypothese überprüfen zu können, eignet sich die bivariate Regressionsanalyse zur inferenzstatistischen Datenanalyse. Das Ziel dieser Regressionsanalyse ist es, die Veränderung der abhängigen Variable, die im Kontext der Regressionsanalyse auch als Kriterium oder Regressand bezeichnet wird, kausal auf eine Veränderung der unabhängigen Variable (alt.: Regressor oder Prädiktor) zurückzuführen. Als Voraussetzung hierfür gilt mindestens die metrische Skalierung der abhängigen sowie im Idealfall auch der unabhängigen Variable. Dabei muss jedoch angenommen werden, dass die Veränderung der AV nicht ausschließlich auf die Veränderung der UV zurückgeführt werden kann, sondern immer auch Dritt- bzw. Störvariablen wirken. Daher werden Regressionsanalysen häufig dazu verwendet, um inferenzstatistisch zu überprüfen, welcher Anteil der Varianz der abhängigen Variable bzw. des Kriteriums durch die Veränderung der unabhängigen Variable bzw. des Prädiktors erklärt werden kann, weshalb dieses Verfahren auch zur Erstellung von Prognosemodellen geeignet ist (Fröhlich et al., 2020, S. 68; Mittag, 2017c, S. 249–252). Bei metrischen bzw. kardinalskalierten Variablen wird häufig zunächst ein linearer Zusammenhang angenommen. Insbesondere in den Human- und Sozialwissenschaften stehen die betrachteten Variablen allerdings nicht selten in einem nicht linearen (z. B. parabolisch, exponentiell etc.) Zusammenhang, wodurch lineare Regressionsmodelle nicht immer geeignet sind, um einen kausalen Zusammenhang adäquat zu beschreiben (Döring & Bortz, 2015, S. 677). Für den Fall, dass ein linearer Zusammenhang im Vorfeld der Untersuchung nicht mit ausreichender Gewissheit angenommen werden kann,

bietet die verwendete Software IBM® SPSS® Statistics 27 in diesem Fall die Möglichkeit, bei Regressionsanalysen über die Prozedur „Kurvenanpassung“ neben der linearen Regression auch zahlreiche Arten nicht linearer Zusammenhänge zu analysieren, um das Regressionsmodell mit der höchsten Erklärungskraft zu ermitteln (IBM Corporation, 2021). Obwohl im Vorfeld der statistischen Analyse ein linearer Zusammenhang zwischen der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit und der Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens nicht zweifelsfrei angenommen werden konnte, wurde, wie von Döring und Bortz (2015, S. 685) empfohlen, trotzdem zunächst mit einer linearen Regressionsanalyse begonnen, welche anschließend um die Berechnung diverser Kurvenanpassungen erweitert wurde. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um überprüfen zu können, ob ein linearer oder nicht linearer Zusammenhang existiert, anhand dessen die Eignung des in dieser Arbeit entwickelten Modells zur Steuerung der muskulären Beanspruchung auf Basis der RSVT bestimmt werden kann.

Regressionsanalysen liefern neben Informationen zur Richtung und Stärke des Einflusses der UV auf die AV auch Informationen zur Erklärungskraft des untersuchten Regressionsmodells, anhand derer der kausale Zusammenhang zwischen den Variablen bewertet werden kann. Die Erklärungskraft des Regressionsmodells wird anhand des Bestimmtheitsmaßes (alt.: Determinationskoeffizient;  $R^2$ ) ausgedrückt und gibt an, welcher Anteil der Varianz der AV durch alle UV erklärt werden kann. Die Werte von  $R^2$  können sich dabei über einen Bereich von 0,0 (0 %) bis 1,0 (100 % der erklärten Varianz) erstrecken (Fröhlich et al., 2020, S. 71–72).

Damit Regressionsanalysen aussagekräftige Ergebnisse liefern können, müssen die betrachteten Variablen spezifische Voraussetzungen erfüllen. Neben der Identifikation und Behandlung etwaiger Ausreißer oder fehlender Werte im Datensatz sollten idealerweise alle Variablen, mindestens aber die abhängige Variable metrisch skaliert sein, was in der vorliegenden Untersuchung gewährleistet war. Darüber hinaus gilt die Normalverteilung der Residuen als Voraussetzung, was, wie bereits im Kontext der Varianzanalyse beschrieben, mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests überprüft wurde (Döring & Bortz, 2015, S. 677). Sofern ein linearer Zusammenhang zwischen AV und UV vermutet werden kann und die Residuen normalverteilt sind, muss die Homoskedastizität der Residuen zumindest grafisch überprüft werden. Die Homoskedastizität der Residuen besagt, dass die Residuen aller Ausprägungen der UV die gleiche Streuung aufweisen (Mittag, 2017c, S. 252). Die Verletzung dieser Voraussetzungen stellt einen Hinweis auf einen nicht linearen Zusammenhang dar.

## 4.2 Untersuchungsmethodik und Ergebnisse der Voruntersuchungen

Dieses Kapitel widmet sich der Darstellung der Untersuchungsmethodik sowie der Ergebnisse der Voruntersuchungen. Diese Voruntersuchungen zielten darauf ab, die in Kapitel 3.3.1 dargestellten allgemeinen Forschungshypothesen zu überprüfen, um festzustellen, ob die grundsätzlichen Voraussetzungen zur Verwendung des Vmaxpro Sensors als Instrument für die Messung der mittleren konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit sowie zur Anwendung eines Steuerungsansatzes auf Basis von MVT und RSVT erfüllt sind.

Die erste Voruntersuchung befasste sich mit der Untersuchung der Messgenauigkeit des Vmaxpro Sensors bei der Übung Kreuzheben mit der Langhantel mit unterschiedlichen volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten.

Ziel der zweiten Voruntersuchung war es, den Einfluss der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit auf den Hantelpfad beim Kreuzheben mit der Langhantel zu überprüfen.

Die dritte Voruntersuchung verfolgte den Zweck, den Einfluss des Geschlechts auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) sowie die Minimum Velocity Threshold (MVT) bei Ausführung der Übung Bankdrücken mit der Langhantel mit volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit zu untersuchen.

Letztlich wurde in der vierten Voruntersuchung überprüft, welchen Einfluss die volitionale Bewegungsgeschwindigkeit, die Belastungsintensität, der Trainingszustand sowie die Ausrichtung des Widerstandstrainings auf die Minimum Velocity Threshold (MVT) besitzen.

## 4.2.1 Voruntersuchung 1 – Messgenauigkeit des Vmaxpro Sensors beim Kreuzheben mit der Langhantel

### 4.2.1.1 Hintergrund und Problemstellung

Die Untersuchung der Messgenauigkeit, Validität und Reliabilität von Inertialsensoreinheiten (IMU) zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Krafttraining mit Langhantelübungen war bereits Gegenstand zahlreicher Studien (vgl. u. a. Balsalobre-Fernández et al., 2016; Balsalobre-Fernández et al., 2017; Martínez-Cava et al., 2020; Orange et al., 2019). In einer systematischen Übersichtsarbeit von Clemente, Akyildiz, Pino-Ortega und Rico-González (2021) wurden insgesamt 21 Studien betrachtet, von denen zehn Studien die Kniebeuge und neun Studien das Bankdrücken untersucht haben. Allerdings betrachtete nur eine Studie eine Variante des Kreuzhebens, die mit einer sogenannten Hexagonal Bar ausgeführt wurde. Daraus konnte die Problemstellung abgeleitet werden, dass die Messgenauigkeit von IMUs zur Geschwindigkeitserfassung bei der Übung Kreuzheben mit der Langhantel bisher nicht hinreichend nachgewiesen werden konnte. Da bei der Ausführung der Übung Kreuzheben mit der Langhantel über die größtmögliche individuelle ROM (vgl. Kapitel 4.1.2.1) selbst bei der Vorgabe, die exzentrische Bewegung langsam und kontrolliert auszuführen, mit Erschütterungen des an der Langhantel angebrachten Sensors während des Bodenkontakts zu rechnen ist, hatte diese Voruntersuchung den Zweck, die Messgenauigkeit des verwendeten Vmaxpro Sensors (vgl. Kapitel 4.1.2.3) anhand des Grades der Übereinstimmung (engl.: „degree of agreement“; alt.: „level of agreement“; [LOA]; Bland & Altman, 2007) mit den Messwerten eines markerbasierten optoelektronischen Messsystems zu untersuchen.

### 4.2.1.2 Untersuchungsmethodik

Markerbasierte optoelektronische Messsysteme zur dreidimensionalen Bewegungserfassung (engl.: „optoelectronic motion capture system“; [OMS]) weisen im Vergleich zu anderen Messsystemen eine sehr hohe Messgenauigkeit auf, weshalb markerbasierte 3D-OMS als Goldstandard zur biomechanischen Bewegungsanalyse angesehen werden (Schroeder et al., 2022; van der Kruk & Reijne, 2018; Vox et al., 2021). Solche Systeme wurden bereits in anderen Untersuchungen als Goldstandard zur Überprüfung der Messgenauigkeit von Geschwindigkeitsmesssystemen genutzt. Beispielsweise wurden in einer Untersuchung von

Tomasevicz, Hasenkamp, Ridenour und Bach (2020) die Messwerte eines Qualisys MoCap Systems als Referenz zur Untersuchung der Validität und Reliabilität einer tragbaren Sensoreinheit für die geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung verwendet.

Aus diesem Grund wurde in dieser Voruntersuchung das Qualisys MoCap System (sechs Qualisys MoCap Kameras vom Typ Oqus 500+, zwei Qualisys MoCap Kameras vom Typ Oqus 510+, Qualisys Software Paket mit Qualisys Track Manager [QTM]) der RPTU Kaiserslautern-Landau als Referenzsystem verwendet, um anhand seiner Messdaten die Eignung des Vmaxpro Sensors zur Erfassung der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit bei der Übung Kreuzheben mit der Langhantel zu untersuchen. Da dieses System ortsgebunden installiert ist, wurden alle Testungen im Biomechaniklabor (Labor I; Abb. 26) am Standort Kaiserslautern durchgeführt.



Abb. 26: Qualisys Motion Capture System im Biomechaniklabor (Labor I) der RPTU Kaiserslautern-Landau (Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau [RPTU], 2023)

Für diese Voruntersuchung wurden 21 gesunde, erwachsene Personen (männlich  $n = 16$ ; weiblich  $n = 5$ ; Tab. 3) rekrutiert, die zum Zeitpunkt der Untersuchung im Haupt- oder Nebenfach in einem Studiengang mit sport- oder gesundheitswissenschaftlichem Bezug an der RPTU Kaiserslautern-Landau eingeschrieben waren. Die Teilnahme setzte voraus, dass zum Zeitpunkt der Untersuchung keine manifesten Erkrankungen des Herz-Kreislauf-, Atmungs- oder muskuloskelettalen Systems vorlagen und somit keine Einschränkungen zur Teilnahme an der Studie bestanden. Diesbezüglich wurde der Gesundheitsstatus aller Personen der

rekrutierten Stichprobe vor Untersuchungsbeginn mithilfe eines standardisierten Anamnesebogens erfasst (vgl. Anhang 2). Aufgrund der generellen sportlichen Vorerfahrung der Versuchspersonen und der Familiarisierung mit der Testübung im Vorfeld der Untersuchung wurde den Studierenden, unabhängig von ihrer tatsächlichen Vorerfahrung im Krafttraining mit Langhantelübungen, eine ausreichende sportmotorische Bewegungskompetenz zugesprochen, um die Testübungen technisch adäquat ausführen zu können, was während der Testdurchführung durch den Testleiter kontrolliert wurde. Die Bewegungsausführung mit inadäquater Bewegungstechnik hätte zum Ausschluss der Daten bei der nachfolgenden statistischen Analyse geführt, was jedoch nicht erforderlich war. Alle Probanden mussten vor Untersuchungsbeginn eine Einwilligungserklärung zur Teilnahme sowie eine Datenschutzerklärung unterzeichnen und erhielten eine Teilnehmerinformation, in der über Ablauf, Risiken und Nutzen der Studie aufgeklärt wurde. Eine Woche vor dem ersten Testtermin fand eine Familiarisierung mit der Bewegungstechnik der Testübung im Rahmen eines praktischen Studienseminars an der RPTU Kaiserslautern-Landau statt, um eine sichere Bewegungsausführung bei der Übung Kreuzheben mit der Langhantel zu gewährleisten.

Am ersten Termin (17.11.2021) wurde das Mehrwiederholungsmaximum für zehn Wiederholungen (10-RM-Test) bei der Krafttrainingsübung Kreuzheben mit der Langhantel ermittelt, um eine interindividuell vergleichbare Intensitätssteuerung an Termin 2 zu gewährleisten. Als 10-RM wurde hier das individuell maximale Gewicht verstanden, das eine Testperson bei der technisch korrekten und vollständigen Ausführung von zehn Wiederholungen der Übung Kreuzheben mit der Langhantel bewältigen konnte.

Auf Basis der am ersten Termin getesteten 10-RM-Lasten wurden an einem zweiten Termin (24.11.2021) zwei Testsätze der Übung Kreuzheben mit der Langhantel mit jeweils acht Wiederholungen ausgeführt. Um einer ermüdungsbedingten Beeinflussung der Bewegungsqualität innerhalb sowie zwischen den Testsätzen vorzubeugen und da die Erfassung ermüdungsbedingter Effekte auf die Bewegungsgeschwindigkeit für die dargestellte Voruntersuchung nicht von Relevanz war, wurde die Vorgabe der Belastungsdauer pro Testsatz auf acht Wiederholungen festgelegt. Dabei lautete die Vorgabe während der Testsätze, dass ein Testsatz mit maximaler ( $v_{\max} \approx 2/0/X/0s$ ) und der zweite Testsatz mit submaximaler volitionaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{\text{sub}} \approx 2/0/2/0s$ ) ausgeführt werden sollte. Die Reihenfolge der Testsätze mit unterschiedlichen Vorgaben der volitionalen

konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten wurde randomisiert, wobei die Pause zwischen beiden Testsätzen mindestens fünf Minuten betragen musste.

Während beider Testsätze dieses zweiten Termins wurde die tatsächlich realisierte konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit aller Wiederholungen beider Testsätze gleichzeitig sowohl mit dem Vmaxpro Sensor als auch über das Qualisys MoCap System erfasst. Die Marker des Qualisys MoCap Systems wurden dabei an drei Positionen, jeweils an beiden Enden der Scheibenaufnahmen sowie in der Mitte der Grifffläche der Langhantel, angebracht. Da der Einfluss der Positionierung des Sensors auf die Messgenauigkeit laut einer Untersuchung von Fritschi, Seiler und Gross (2021) vernachlässigbar gering ist, wurde der Sensor aus Gründen der Praktikabilität außerhalb der Griffweitenmarkierung der Langhantel positioniert, um eine Behinderung der Bewegungsausführung durch den Sensor zu vermeiden. Hinsichtlich der Auswahl und Eigenschaften der verwendeten Langhantelstange und Gewichtsscheiben wurden die gleichen Kriterien berücksichtigt wie bei der Hauptuntersuchung (vgl. Kapitel 4.1.2.1).

Zur Datenanalyse wurden die Werte der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten der Wiederholungen zwei bis sechs von beiden Messsystemen (Qualisys und Vmaxpro) betrachtet. Die Werte der ersten Wiederholung wurden nicht betrachtet, da aufgrund der fehlenden vorangehenden exzentrischen Phase beim Anheben des ruhenden Gewichts aus der Startposition eine potenzielle Verzerrung der Messwerte durch übermäßige horizontale Bewegungen der Hantel vermutet werden kann. Die Messwerte der Wiederholungen sieben und acht wurden von der Analyse ausgeschlossen, um einer potenziellen ermüdungsbedingten Verzerrung der Messwerte durch starke Erschütterungen des Sensors beim Bodenkontakt der Hantel vorzubeugen.

Da Korrelations- und Regressionsanalysen zur Untersuchung der Vergleichbarkeit zweier Messmethoden laut Giavarina (2015) ungeeignet sind, wurde zur statistischen Analyse der Daten ein Bland-Altman-Plot erstellt (Bland & Altman, 2007; Mansournia, Waters, Nazemipour, Bland & Altman, 2021). Bei diesem Verfahren nach Bland und Altman (2007) kann die Übereinstimmung von zwei quantitativen Messmethoden bei mehrfacher Beobachtung der gleichen Probandenstichprobe quantifiziert werden, indem die durchschnittlichen Differenzen der Messwertpaare der untersuchten Messmethoden unter Berücksichtigung von vorher definierten Grenzwerten der Übereinstimmung (engl.: „limits of agreement“; [LoA]) betrachtet

werden. Um dieses Verfahren anwenden zu können, muss eine Normalverteilung der Differenzen zwischen den Messwertpaaren beider Messmethoden vorliegen.

Der Bland-Altman-Plot stellt eine einfache Methode dar, um eine Abweichung der durchschnittlichen Differenzen der Messwerte beider Messsysteme zu evaluieren und den Bereich zu bestimmen, in den 95 Prozent der Differenzen der zweiten Methode im Vergleich zur ersten Methode fallen (Bereich zwischen den LoA; sog. Toleranzbereich). Hierbei wird davon ausgegangen, dass 95 Prozent der Datenpunkte zwischen dem Wert der durchschnittlichen Differenz der Messwertpaare plus die 1,96-fache Standardabweichung der Differenzen und dem Wert der durchschnittlichen Differenz der Messwertpaare minus die 1,96-fache Standardabweichung der Differenzen liegen. Dieser Toleranzbereich zwischen den LoA wird im Bland-Altman-Plot, zusätzlich zur durchschnittlichen Differenz der Messmethoden, durch eingezeichnete Linien visualisiert. Zur Untersuchung der Übereinstimmung beider Messmethoden erfolgt eine visuelle Auswertung des Bland-Altman-Plots sowie die Betrachtung der durchschnittlichen Differenz der Messwertpaare und der zugehörigen Standardabweichung. Ist die durchschnittliche Differenz der Messwertpaare ungleich null, so besteht eine Abweichung der Messung der zweiten Messmethode in Relation zur ersten Messmethode. Darüber hinaus kann visuell im Bland-Altman-Plot analysiert werden, ob und wie viele Datenpunkte außerhalb der LoA bzw. des Toleranzbereichs liegen, wie groß die Schwankungsbreite der Differenzen der einzelnen Messwertpaare ist und ob die Varianz der Differenzen konstant ist (Giavarina, 2015; Mansournia et al., 2021). Anhand dieser Auswertung kann der Grad der Übereinstimmung zwischen den Messwerten des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors beurteilt und eine Aussage zur Messgenauigkeit des Vmaxpro Sensors getroffen werden. Um überprüfen zu können, ob die volitionale Bewegungsgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Messgenauigkeit des Vmaxpro Sensors besitzt, wurde das erläuterte Analyseverfahren nach Bland und Altman für beide Vorgaben der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit getrennt angewendet.

### 4.2.1.3 Ergebnisse und Schlussfolgerung

In Tab. 3 sind die deskriptiven Statistiken zu den biometrischen und sportmotorischen Parametern der Probandenstichprobe dieser Voruntersuchung abgebildet.

Tab. 3: Deskriptive Statistik zur Probandenstichprobe der ersten Voruntersuchung

n = 21 (w n = 5; m n = 16)	Größe [m]	Gewicht [kg]	Alter [Jahre]	Krafttrainingserfahrung [Jahre]	10-RM Kreuzheben [kg]
Mittelwert	1,80	78,43	23,00	4,98	90,48
Median	1,80	80,00	23,00	5,00	90,00
Std.-Abweichung	,08	11,41	1,73	3,02	22,02
Varianz	,01	130,16	3,00	9,11	484,76

### Vergleich der Messsysteme bei volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{sub}$ )

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 4) zeigt die deskriptive Statistik der Messwerte (MV in Metern pro Sekunde [m/s]) der betrachteten Wiederholungen (Wiederholungen zwei bis sechs) des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors bei der Ausführung der Übung Kreuzheben mit der Langhantel mit volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{sub}$ ). Darüber hinaus wird die Differenz der Messwertpaare dargestellt, da diese im Kontext des Verfahrens zum Vergleich zweier Messmethoden nach Bland und Altman von Bedeutung sind.

Tab. 4: Deskriptive Statistik zur MV des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors bei  $v_{sub}$

	MV Qualisys vsub [m/s]	MV Vmaxpro vsub [m/s]	MV Differenz vsub [m/s]
N	105	105	105
Mittelwert	,40	,52	-,12
Median	,40	,54	-,10
Std.-Abweichung	,11	,10	,11
Varianz	,01	,01	,011

Das Verfahren zum Vergleich zweier Messmethoden nach Bland und Altman setzt voraus, dass die Differenzen der Messwertpaare normalverteilt sind. Die statistische Testung der Normalverteilung anhand des Shapiro-Wilk-Tests (Tab. 5) bestätigt die Annahme normalverteilter Differenzen zwischen den Messwertpaaren des Qualisys MoCap Systems und

des Vmaxpro Sensors bei volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{sub}$ ), wodurch die Voraussetzungen zur Erstellung eines Bland-Altman-Plots erfüllt sind.

Tab. 5: Tests auf Normalverteilung der Differenzen der Messwerte bei  $v_{sub}$

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Differenz $v_{sub}$	,079	105	,105	,981	105	,129

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Zum Vergleich der Messwertpaare des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors bei  $v_{sub}$  wurde ein Bland-Altman-Plot erstellt (Abb. 27).

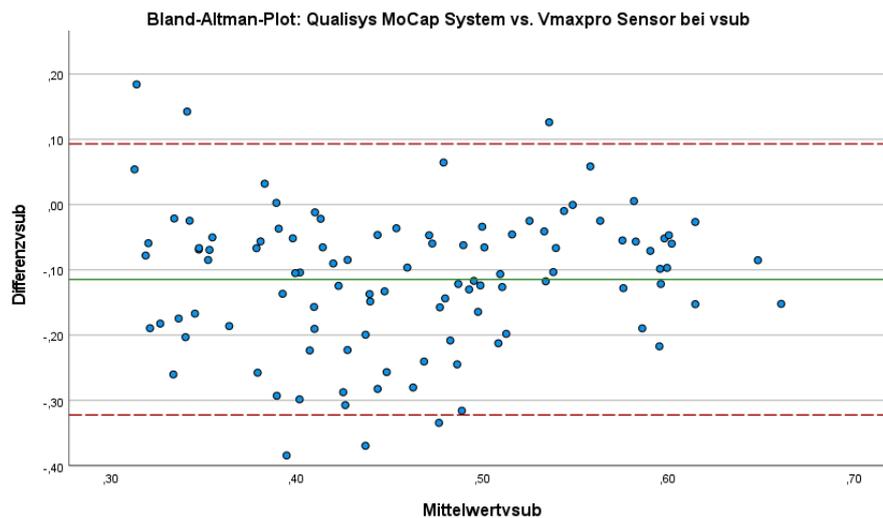


Abb. 27: Bland-Altman-Plot zum Vergleich des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors bei  $v_{sub}$

Die durchgehende Linie im Bland-Altman-Plot stellt den Mittelwert der Differenzen zwischen den Messwertpaaren dar, während die gestrichelten Linien die Limits of Agreement (LoA) kennzeichnen. Wie Tab. 4 und Abb. 27 entnommen werden kann, ist der Mittelwert der Differenzen negativ, was darauf schließen lässt, dass der Vmaxpro Sensor die Höhe der mittleren konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (MV) bei der Ausführung der Übung Kreuzheben mit der Langhantel mit volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit um durchschnittlich 0,115 m/s überschätzt. Die visuelle Analyse der Übereinstimmung beider Messverfahren anhand der LoA (Abb. 27) zeigt mehrere Datenpunkte außerhalb des

definierten Toleranzbereichs sowie eine große Schwankungsbreite der Differenzen zwischen beiden Messverfahren.

Aufgrund der systematischen Überschätzung der MV durch den Vmaxpro Sensor sowie der mehrfachen Überschreitung der LoA im Bland-Altman-Plot kann keine ausreichende Übereinstimmung der Messwerte beider Messsysteme angenommen werden. Da markerbasierte optoelektronische Messsysteme zur dreidimensionalen Bewegungserfassung, wie das hier als Referenzsystem verwendete Qualisys MoCap System, als Goldstandard zur Bewegungserfassung gelten, führen die beschriebenen Beobachtungen zur Schlussfolgerung, dass der Vmaxpro Sensor bei der Erfassung der MV bei der Ausführung der Übung Kreuzheben mit der Langhantel mit volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{sub}$ ) keine ausreichende Messgenauigkeit aufweist.

### Vergleich der Messsysteme bei volitional maximaler Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{max}$ )

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 6) zeigt die deskriptive Statistik der Messwerte (MV in Metern pro Sekunde [m/s]) der betrachteten Wiederholungen (Wiederholungen zwei bis sechs) des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors bei der Ausführung der Übung Kreuzheben mit der Langhantel mit volitional maximaler Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{max}$ ). Darüber hinaus wird die Differenz der Messwertpaare dargestellt, da diese im Kontext des Verfahrens zum Vergleich zweier Messmethoden nach Bland und Altman von Bedeutung sind.

Tab. 6: Deskriptive Statistik zur MV des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors bei  $v_{max}$

	MV Qualisys $v_{max}$ [m/s]	MV Vmaxpro $v_{max}$ [m/s]	MV Differenz $v_{max}$ [m/s]
N	105	105	105
Mittelwert	,51	,67	-,17
Median	,52	,69	-,17
Std.-Abweichung	,14	,12	,14
Varianz	,02	,01	,02

Die statistische Testung der Normalverteilung anhand des Shapiro-Wilk-Tests (Tab. 7) bestätigt die Annahme normalverteilter Differenzen zwischen den Messwertpaaren des Qualisys MoCap

Systems und des Vmaxpro Sensors bei volitional maximaler Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{max}$ ), wodurch die Voraussetzungen zur Erstellung eines Bland-Altman-Plots erfüllt sind.

Tab. 7: Tests auf Normalverteilung der Differenzen der Messwerte bei  $v_{max}$

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Differenz vmax	,058	105	,200*	,982	105	,152

\*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Zum Vergleich der Messwertpaare des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors bei  $v_{max}$  wurde ein Bland-Altman-Plot erstellt (Abb. 28).

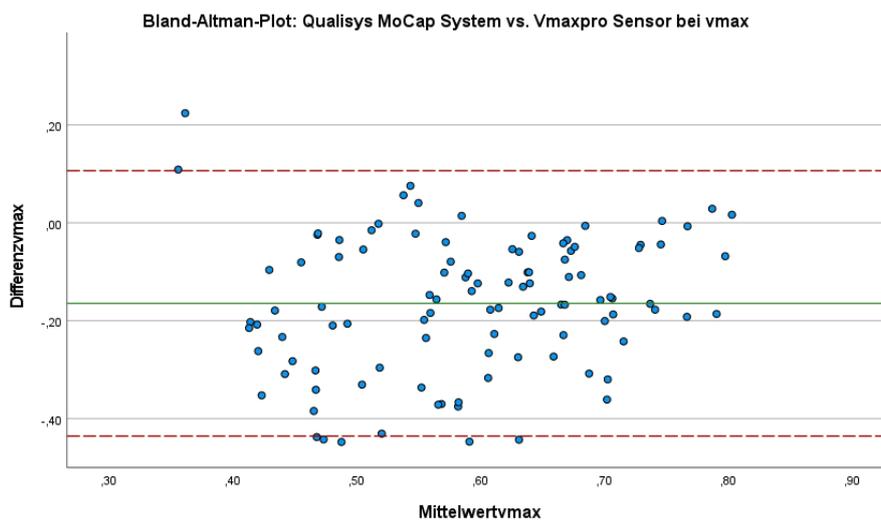


Abb. 28: Bland-Altman-Plot zum Vergleich des Qualisys MoCap Systems und des Vmaxpro Sensors bei  $v_{max}$

Die durchgehende Linie im Bland-Altman-Plot stellt den Mittelwert der Differenzen zwischen den Messwertpaaren dar, während die gestrichelten Linien die Limits of Agreement (LoA) kennzeichnen. Wie Tab. 6 und Abb. 28 entnommen werden kann, ist der Mittelwert der Differenzen negativ, was darauf schließen lässt, dass der Vmaxpro Sensor die Höhe der mittleren konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (MV) bei der Ausführung der Übung Kreuzheben mit der Langhantel mit volitional maximaler Bewegungsgeschwindigkeit um durchschnittlich 0,165 m/s überschätzt. Die visuelle Analyse der Übereinstimmung beider Messverfahren anhand der LoA (Abb. 28) zeigt mehrere Datenpunkte außerhalb des

definierten Toleranzbereichs sowie eine große Schwankungsbreite der Differenzen zwischen beiden Messverfahren.

Aufgrund der systematischen Überschätzung der MV durch den Vmaxpro Sensor sowie der mehrfachen Überschreitung der LoA im Bland-Altman-Plot kann keine ausreichende Übereinstimmung der Messwerte beider Messsysteme angenommen werden. Da markerbasierte optoelektronische Messsysteme zur dreidimensionalen Bewegungserfassung, wie das hier als Referenzsystem verwendete Qualisys MoCap System, als Goldstandard zur Bewegungserfassung gelten, führen die beschriebenen Beobachtungen zur Schlussfolgerung, dass der Vmaxpro Sensor bei der Erfassung der MV bei der Ausführung der Übung Kreuzheben mit der Langhantel mit volitional maximaler Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{\max}$ ) keine ausreichende Messgenauigkeit aufweist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Vmaxpro Sensor im direkten Vergleich mit dem Qualisys MoCap System, unabhängig von der volitionalen Bewegungsgeschwindigkeit, keine ausreichende Messgenauigkeit zur Erfassung der MV bei der Übung Kreuzheben mit der Langhantel aufweist.

Aus diesem Grund werden die Daten der Übung Kreuzheben mit der Langhantel in allen weiteren Vor- und Hauptuntersuchungen, in denen die Datenerfassung mithilfe des Vmaxpro Sensors erfolgt ist, von der statistischen Analyse ausgeschlossen.

## 4.2.2 Voruntersuchung 2 – Einfluss der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit auf den Hantelpfad beim Kreuzheben mit der Langhantel

### 4.2.2.1 Hintergrund und Problemstellung

Bei Ausführung der Übung Kreuzheben mit der Langhantel mit optimaler Bewegungstechnik sollte der Pfad der Langhantel möglichst vertikal verlaufen (vgl. Kapitel 4.1.2.1; Pürzel, 2022, S. 97–113). Da sämtliche horizontalen Bewegungen der Langhantel auf die Erzeugung von Kräften in Richtungen hindeuten, die nicht zum Erreichen des Bewegungsziels beitragen, kann die Abweichung des Pfades der Langhantel von der Vertikalen als Indikator für eine suboptimale Bewegungsqualität bzw. Bewegungseffizienz angesehen werden. Wie bereits in Kapitel 1.1 thematisiert wurde, kann eine niedrige Bewegungsqualität bei körperlicher Aktivität das Verletzungsrisiko erhöhen, weshalb die Bewegungsqualität in jeder Trainingseinheit in den Vordergrund des Trainings gestellt werden sollte, da dies das Potenzial zur positiven Beeinflussung der Sicherheit und Effektivität des Trainings birgt (Bennett et al., 2021; Koźlenia & Domaradzki, 2021). Diese Voruntersuchung verfolgte das Ziel, die in Kapitel 1.1 aufgestellte These, dass maximale Bewegungsgeschwindigkeiten insbesondere für Personen mit geringer Trainingserfahrung oder fitness- bzw. gesundheitsorientierter Trainingsausrichtung als suboptimal angesehen werden können, zu überprüfen. Hierzu wurde untersucht, ob sich die Differenzen der absoluten Strecke des Hantelpfades und der isolierten vertikalen Strecke des Hantelpfades bei Ausführung der Übung Kreuzheben mit der Langhantel zwischen unterschiedlichen volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten ( $v_{\text{sub}}$  und  $v_{\text{max}}$ ) unterscheiden.

### 4.2.2.2 Untersuchungsmethodik

Die Daten dieser Voruntersuchung wurden innerhalb der gleichen Testtermine wie bei Voruntersuchung 1 erhoben, weshalb die Probandenstichprobe sowie der Untersuchungsablauf identisch sind. Aus diesem Grunde wird auf eine erneute Darstellung der Probandenstichprobe sowie des Untersuchungsablaufs verzichtet und stattdessen auf Kapitel 4.2.1.2 verwiesen. Im Gegensatz zu Voruntersuchung 1 wurden in dieser Voruntersuchung jedoch ausschließlich die Daten des Qualisys MoCap Systems während der Ausführung beider Testsätze mit der Übung Kreuzheben mit der Langhantel mit unterschiedlichen volitionalen

Bewegungsgeschwindigkeiten verwendet. Da es sich beim Qualisys MoCap System um ein markerbasiertes optoelektronisches Messsystem zur Bewegungserfassung handelt, konnten aus den erfassten Daten sowohl die zurückgelegte isolierte vertikale Strecke als auch die absolute Strecke der Langhantel, die zusätzlich zur rein vertikalen Bewegung auch alle horizontalen Bewegungen inkludiert, für alle Einzelwiederholungen beider Testsätze mit unterschiedlichen volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten berechnet werden.

Bei der Datenanalyse wurden, in Übereinstimmung mit Voruntersuchung 1, nur die konzentrischen Bewegungen der Wiederholungen zwei bis sechs betrachtet. Die Werte der ersten Wiederholung wurden nicht betrachtet, da aufgrund der fehlenden vorangehenden exzentrischen Phase beim Anheben des ruhenden Gewichts aus der Startposition eine potenzielle Verzerrung der Messwerte durch übermäßige horizontale Bewegungen der Hantel vermutet werden kann. Die Messwerte der Wiederholungen sieben und acht wurden von der Analyse ausgeschlossen, um einer Verzerrung der Messwerte durch ermüdungsbedingte Veränderungen der Bewegungstechnik bzw. des Hantelpfades vorzubeugen.

Zur Untersuchung des Effekts der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit auf den Hantelpfad beim Kreuzheben mit der Langhantel wurde die mittlere Differenz zwischen dem absoluten und dem vertikalen Hantelpfad der Wiederholungen zwei bis sechs betrachtet. Diese Differenz quantifiziert die mittlere Abweichung des beobachteten vom theoretisch optimalen Hantelpfad als Strecke in Metern (m), weshalb diese als abhängige Variable zur Überprüfung des Effekts der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit auf den Verlauf des Hantelpfades herangezogen wurde. Die Mittelwerte dieser Differenzen zwischen absoluter und vertikaler Strecke der Langhantel wurden für den Testsatz mit volitional maximaler sowie für den Testsatz mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit berechnet und die Unterschiede dieser Streckendifferenzen statistisch analysiert. Da keine Normalverteilung der Daten vorlag (vgl. Kapitel 4.2.2.3), wurde zur statistischen Analyse der Mittelwertsunterschiede als nonparametrisches Verfahren der Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben eingesetzt und das Signifikanzniveau auf  $\alpha = 0,05$  ( $p < 0,05$ ) festgelegt (Janssen & Laatz, 2017, S. 674–677).

### 4.2.2.3 Ergebnisse und Schlussfolgerung

Da während der Datenaufbereitung Ausreißer identifiziert (Abb. 29) und daraufhin die Daten der Fälle 8 und 9 aus dieser Voruntersuchung ausgeschlossen wurden, war die hier untersuchte Probandenstichprobe nicht komplett identisch mit der ersten Voruntersuchung.

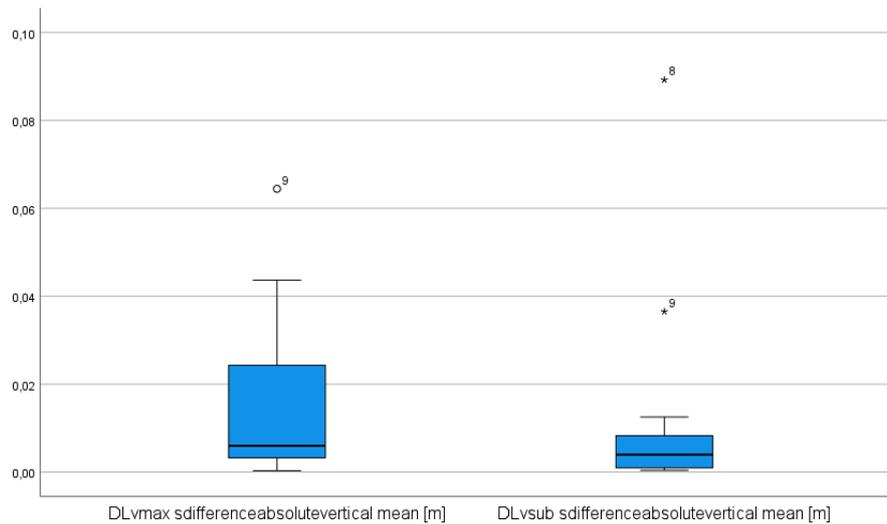


Abb. 29: Boxplots der mittleren Differenzen zwischen absolutem und vertikalem Hantelpfad bei  $v_{\max}$  und  $v_{\text{sub}}$  vor Identifikation und Ausschluss der Ausreißer

In Tab. 8 sind die deskriptiven Statistiken zu den biometrischen und sportmotorischen Parametern der Probandenstichprobe dieser Voruntersuchung abgebildet.

Tab. 8: Deskriptive Statistik zur Probandenstichprobe der zweiten Voruntersuchung

n = 19 (w n = 3; m n = 16)	Größe [m]	Gewicht [kg]	Alter [Jahre]	Krafttrainingserfahrung [Jahre]	10-RM Kreuzheben [kg]
Mittelwert	1,82	80,26	23,05	5,08	93,42
Median	1,82	81,00	23,00	5,00	100,00
Std.-Abweichung	,06	10,22	1,81	3,09	21,02
Varianz	,00	104,54	3,28	9,56	441,81

Tab. 9 zeigt die deskriptive Statistik zu den Strecken des absoluten und vertikalen Hantelpfades für unterschiedliche volitionale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeiten ( $v_{\max}$  und  $v_{\text{sub}}$ ) jeweils als Mittelwerte der betrachteten Wiederholungen zwei bis sechs.

Tab. 9: Deskriptive Statistik zu den Mittelwerten des absoluten und vertikalen Hantelpfades bei  $v_{max}$  und  $v_{sub}$

	Mittlerer absoluter Hantelpfad $v_{max}$ [m]	Mittlerer vertikaler Hantelpfad $v_{max}$ [m]	Mittlerer absoluter Hantelpfad $v_{sub}$ [m]	Mittlerer vertikaler Hantelpfad $v_{sub}$ [m]
N	19	19	19	19
Mittelwert	,61	,59	,58	,57
Median	,61	,59	,57	,57
Std.-Abweichung	,04	,04	,04	,04
Varianz	,00	,00	,00	,00

Abb. 30 stellt die Mittelwerte der Strecken des absoluten und vertikalen Hantelpfades für  $v_{max}$  und  $v_{sub}$  als Boxplots dar, um die Unterschiede der Strecken zu veranschaulichen.

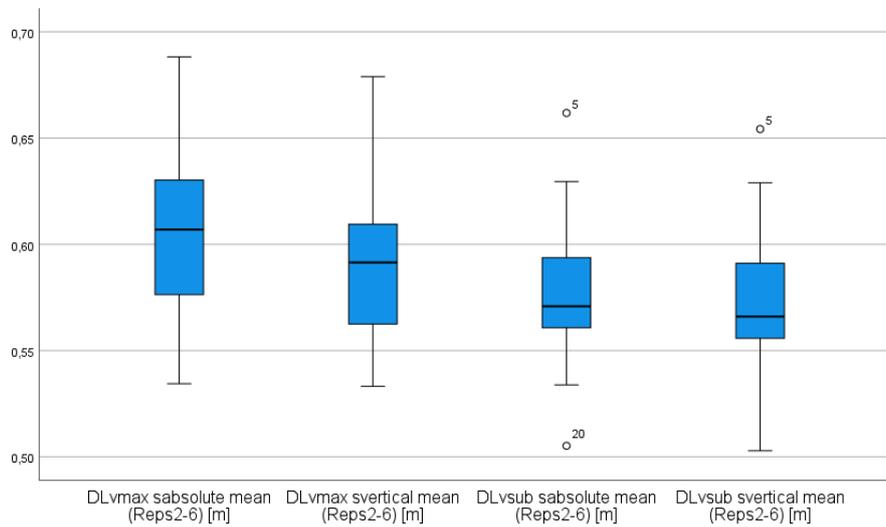


Abb. 30: Boxplots der Mittelwerte des absoluten und vertikalen Hantelpfades bei  $v_{max}$  und  $v_{sub}$

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 10) stellt die deskriptive Statistik zu den mittleren Differenzen zwischen den Strecken des absoluten und des vertikalen Hantelpfades während der Wiederholungen zwei bis sechs dar, jeweils getrennt für die Testung mit volitional maximaler sowie die Testung mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit.

Tab. 10: Deskriptive Statistik zu den mittleren Streckendifferenzen bei  $v_{max}$  und  $v_{sub}$

	Ø Streckendifferenz zwischen absolutem und vertikalem Hantelpfad $v_{max}$ [m]	Ø Streckendifferenz zwischen absolutem und vertikalem Hantelpfad $v_{sub}$ [m]
N	19	19
Mittelwert	,01	,00
Median	,01	,00
Std.-Abweichung	,01	,00
Varianz	,00	,00

Abb. 31 bildet die mittleren Streckendifferenzen von  $v_{max}$  und  $v_{sub}$  als Boxplots ab, um die unterschiedliche Beeinflussung der Bewegungseffizienz bzw. des Hantelpfades durch  $v_{max}$  und  $v_{sub}$  beim Kreuzheben mit der Langhantel grafisch gegenüberzustellen.

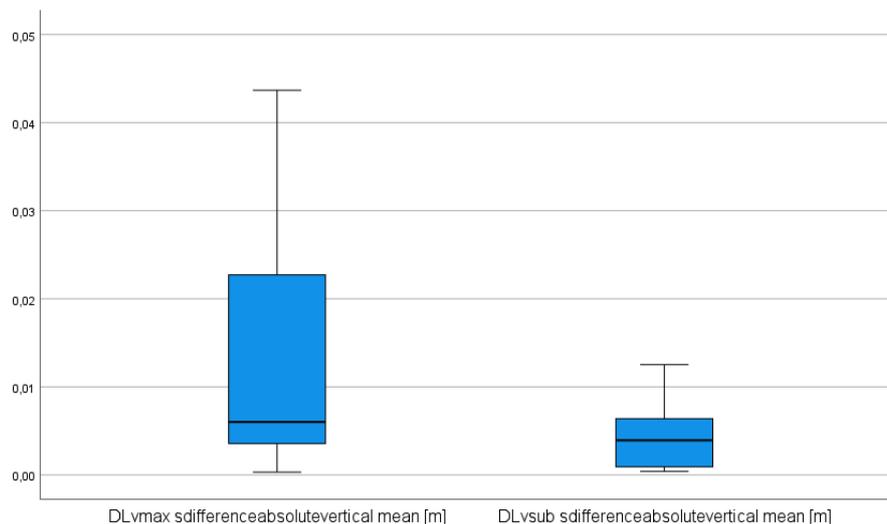


Abb. 31: Boxplots der mittleren Streckendifferenzen bei  $v_{max}$  und  $v_{sub}$

Die statistische Testung der Normalverteilung anhand des Shapiro-Wilk-Tests (Tab. 11) führt zum Schluss, dass für die mittleren Streckendifferenzen zwischen absolutem und vertikalem Hantelpfad keine Normalverteilung der Daten bei  $v_{max}$  und bei  $v_{sub}$  besteht ( $p < 0.05$ ) und deshalb ein nonparametrisches Testverfahren eingesetzt werden muss.

Tab. 11: Tests auf Normalverteilung der mittleren Streckendifferenzen zwischen absolutem und vertikalem Hantelpfad bei  $v_{\max}$  und  $v_{\text{sub}}$

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
DLvmax sdifferenceabsolutevertical mean [m]	,275	19	,001	,828	19	,003
DLvsub sdifferenceabsolutevertical mean [m]	,143	19	,200*	,898	19	,045

Aufgrund der Verletzung der Testvoraussetzungen für parametrische Testverfahren durch nicht normalverteilte Daten wurde mithilfe eines Wilcoxon-Tests für abhängige Stichproben geprüft, ob sich die Mittelwerte der durchschnittlichen Streckendifferenz zwischen absolutem und vertikalem Hantelpfad bei  $v_{\max}$  und bei  $v_{\text{sub}}$  signifikant unterscheiden. Tab. 12 zeigt die Ränge der Mittelwertsunterschiede der durchschnittlichen Streckendifferenzen bei  $v_{\max}$  und  $v_{\text{sub}}$  zur Berechnung des Wilcoxon-Tests für abhängige Stichproben.

Tab. 12: Ränge der Mittelwertsunterschiede der durchschnittlichen Streckendifferenzen bei  $v_{\max}$  und  $v_{\text{sub}}$

		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
DLvsub sdifferenceabsolutevertical mean [m] -	Negative Ränge	13 <sup>a</sup>	12,23	159,00
DLvmax sdifferenceabsolutevertical mean [m]	Positive Ränge	6 <sup>b</sup>	5,17	31,00
	Bindungen	0 <sup>c</sup>		
	Gesamt	19		

- a. DLvsub sdifferenceabsolutevertical mean [m] < DLvmax sdifferenceabsolutevertical mean [m]
- b. DLvsub sdifferenceabsolutevertical mean [m] > DLvmax sdifferenceabsolutevertical mean [m]
- c. DLvsub sdifferenceabsolutevertical mean [m] = DLvmax sdifferenceabsolutevertical mean [m]

Die nachfolgend dargestellte Tab. 13 stellt das Ergebnis der Teststatistik des Wilcoxon-Tests für abhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiede der durchschnittlichen Streckendifferenz zwischen absolutem und vertikalem Hantelpfad bei  $v_{\max}$  und bei  $v_{\text{sub}}$  dar.

Tab. 13: Teststatistik des Wilcoxon-Tests für abhängige Stichproben

DLvsub sdifferenceabsolutevertical mean [m] - DLvmax sdifferenceabsolutevertical mean [m]	
Z	-2,575 <sup>a</sup>
Asymp. Sig. (2-seitig)	,010

Da der mithilfe des Wilcoxon-Tests für abhängige Stichproben errechnete Wert der zweiseitigen Signifikanz ( $p = 0,010$ ) unter dem definierten Signifikanzniveau von  $p = 0,05$  liegt, kann angenommen werden, dass sich die durchschnittliche Streckendifferenz zwischen absolutem und vertikalem Hantelpfad bei volitional maximaler und volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit signifikant unterscheidet. Unter Berücksichtigung der Mittelwerte der durchschnittlichen Streckendifferenzen aus Tab. 10 kann aus diesen Ergebnissen geschlussfolgert werden, dass die beobachteten Effekte auf den Verlauf des Hantelpfades bei Ausführung der Übung Kreuzheben mit der Langhantel mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit signifikant geringer sind als bei der Ausführung mit volitional maximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit.

Diese Ergebnisse untermauern die These, dass maximale Bewegungsgeschwindigkeiten im Krafttraining aufgrund der in dieser Voruntersuchung beobachteten Beeinflussung des Hantelpfades insbesondere für Personen mit geringer Trainingserfahrung oder fitness- bzw. gesundheitsorientierter Trainingsausrichtung als suboptimal angesehen werden können.

### 4.2.3 Voruntersuchung 3 – Einfluss des Geschlechts auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit

#### 4.2.3.1 Hintergrund und Problemstellung

Das Forschungsdesign der Hauptuntersuchung (vgl. Kapitel 4.1) beinhaltet sowohl einen Längsschnittvergleich innerhalb einer Stichprobe mit fitnessorientierter Ausrichtung des Krafttrainings ( $FKT_{\text{detrainiert}}$  vs.  $FKT_{\text{trainiert}}$ ) als auch einen Querschnittsvergleich zwischen zwei Probandenstichproben in vergleichbarem Trainingszustand mit unterschiedlichen Ausrichtungen des Krafttrainings ( $FKT_{\text{trainiert}}$  vs.  $LKT_{\text{trainiert}}$ ). Wie bereits in Kapitel 4.1.1 dargestellt wurde, konnten für die Probandenstichprobe mit leistungsorientierter Ausrichtung des Krafttrainings im trainierten Zustand ( $LKT_{\text{trainiert}}$ ) allerdings nur männliche Personen rekrutiert werden, während in der fitnessorientierten Stichprobe auch weibliche Personen rekrutiert und getestet wurden. Dies erzeugt die Problematik, dass die Vergleichbarkeit der Probandenstichproben  $FKT_{\text{trainiert}}$  und  $LKT_{\text{trainiert}}$  aufgrund der nicht vorhandenen weiblichen Personen in  $LKT_{\text{trainiert}}$  möglicherweise eingeschränkt ist. Der Zweck dieser dritten Voruntersuchung bestand deshalb darin, zu entscheiden, ob die weiblichen Personen der fitnessorientierten Probandenstichproben ( $FKT$ ) zur statistischen Analyse der RSVT in der Hauptuntersuchung (vgl. Kapitel 5) ausgeschlossen werden sollten. Im Hinblick auf die Hauptuntersuchungen ist dies von Relevanz, da keine ausreichende Vergleichbarkeit der Probandenstichproben  $FKT_{\text{trainiert}}$  und  $LKT_{\text{trainiert}}$  angenommen werden kann, sofern signifikante genderspezifische Effekte auf die relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (RSVT; vgl. Kapitel 3.1.4) existieren. In diesem Fall dürften die weiblichen Personen bei den Hauptuntersuchungen nicht berücksichtigt werden, da dies den Gruppenmittelwert der gesamten Probandenstichprobe von  $FKT$  im Verhältnis zu  $LKT$  verzerren würde.

#### 4.2.3.2 Untersuchungsmethodik

Die Daten dieser dritten Voruntersuchung wurden innerhalb der Testtermine der Hauptuntersuchung erhoben, weshalb die Probandenstichprobe ( $FKT_{\text{trainiert}}$ ) sowie der Untersuchungsablauf identisch sind. Aus diesem Grunde wird auf eine erneute Darstellung des Untersuchungsablaufs (Testübungen und -protokolle sowie Variablen und Messtechnik) verzichtet und stattdessen auf Kapitel 4.1.2 verwiesen. Die deskriptive Statistik zu den biometrischen und sportmotorischen Parametern der Probandenstichprobe  $FKT_{\text{trainiert}}$  wird

jeweils für die männlichen und weiblichen Versuchspersonen getrennt im nachfolgenden Kapitel 4.2.3.3 dargestellt. Wie in den Kapiteln 3.1.4 und 3.1.5 erläutert wurde, zielte die Hauptuntersuchung darauf ab einen neuen Ansatz zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung anhand der RSVT zu überprüfen, weshalb diese Voruntersuchung die genderspezifischen Effekte auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) in der Probandenstichprobe  $FKT_{\text{trainiert}}$  untersuchte. Hierzu wurden die mithilfe des Vmaxpro Sensors erfassten konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten der letzten drei Wiederholungen vor Erreichen der MVT (RIR 3-0) eines ausbelastenden Testsatzes mit submaximaler Last (75 % 1-RM) betrachtet. Anhand dieser erfassten Daten konnte die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) der betrachteten Wiederholungen berechnet werden, indem deren konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten durch die MVT ( $v$  bei RIR0) geteilt wurde (z. B.  $RSVT_{RIR3} = v_{RIR3} \div MVT$ ). Zur Überprüfung der genderspezifischen Effekte wurden die Mittelwertsunterschiede von  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  (Prozent der MVT) sowie der MVT ( $v$  in m/s) zwischen den Geschlechtergruppen analysiert. Die potenziellen Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Personen sind primär für den Querschnittsvergleich ( $FKT_{\text{trainiert}}$  vs.  $LKT_{\text{trainiert}}$ ) von Relevanz. Darüber hinaus wurde der skizzierte Steuerungsansatz auf Basis der RSVT primär für das Krafttraining mit submaximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten entwickelt. Da der Vmaxpro Sensor bei der Übung Kreuzheben mit der Langhantel keine ausreichende Messgenauigkeit aufweist (vgl. Kapitel 4.2.1), werden die genderspezifischen Effekte auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit nachfolgend bei der Übung Bankdrücken mit der Langhantel mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{\text{sub}}$ ) in der Probandenstichprobe  $FKT_{\text{trainiert}}$  überprüft. Zur inferenzstatistischen Überprüfung der Unterschiede zwischen den gemessenen Daten der MVT beider Geschlechtergruppen wurde ein t-Test für unabhängige Stichproben berechnet. Um den Einfluss des Geschlechts auf die RSVT bei RIR3-RIR1 statistisch zu analysieren wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung unter Berücksichtigung von Zwischensubjektfaktoren durchgeführt, welche auch als Mixed ANOVA bezeichnet wird (Döring & Bortz, 2015, S. 209). Hierbei wurde das Geschlecht als Zwischensubjektfaktor angegeben, um genderspezifische Unterschiede der RSVT anhand der Zwischensubjekteffekte bewerten zu können. In Übereinstimmung mit der Hauptuntersuchung sowie den bisherigen Voruntersuchungen wurde das Signifikanzniveau auf

$\alpha = 0,05$  ( $p < 0,05$ ) festgelegt. Um einer Akkumulation des  $\alpha$ -Fehlers entgegenzuwirken, wurde bei jeder berechneten RMANOVA die Bonferroni-Korrektur angewendet.

#### 4.2.3.3 Ergebnisse und Schlussfolgerung

Durch explorative Datenanalyse wurden keine relevanten Ausreißer ( $> 2,5$ -facher Interquartilsabstand) für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$ ,  $RSVT_{RIR1}$  und MVT identifiziert, weshalb in dieser Voruntersuchung alle Datensätze berücksichtigt wurden.

Da sich diese Voruntersuchung mit der Überprüfung genderspezifischer Einflüsse auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit ( $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$ ) befasst, werden in den nachfolgenden Tabellen die deskriptiven Statistiken zu den biometrischen und sportmotorischen Parametern der Probandenstichprobe jeweils getrennt für männliche Personen (Tab. 14) und weibliche Personen (Tab. 15) dargestellt.

Tab. 14: Deskriptive Statistik zu den männlichen Probanden

	Größe [m]	Gewicht [kg]	Alter [Jahre]	Krafttrainingserfahrung [Jahre]	1-RM Bankdrücken [kg]
N	11	11	11	11	11
Mittelwert	1,81	81,09	33,21	13,71	88,64
Median	1,80	85,00	30,75	12,75	90,00
Std.-Abweichung	,04	8,02	5,15	4,27	14,11
Varianz	,00	64,29	26,47	18,22	199,21
Minimum	1,75	63,00	27,75	5,75	62,50
Maximum	1,90	91,00	43,75	20,75	105,00

Tab. 15: Deskriptive Statistik zu den weiblichen Probanden

	Größe [m]	Gewicht [kg]	Alter [Jahre]	Krafttrainingserfahrung [Jahre]	1-RM Bankdrücken [kg]
N	8	8	8	8	8
Mittelwert	1,67	63,13	31,50	8,75	46,25
Median	1,69	63,00	31,50	7,50	45,00
Std.-Abweichung	,07	8,63	3,59	6,04	13,09
Varianz	,01	74,41	12,86	36,50	171,43
Minimum	1,56	51,00	28,75	3,75	30,00
Maximum	1,74	75,00	39,75	23,75	65,00

Tab. 16 zeigt die deskriptive Statistik zu den abhängigen Variablen  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$ ,  $RSVT_{RIR1}$  und MVT der männlichen Personen der Probandenstichprobe dieser Voruntersuchung. Die MVT wurde in dieser Voruntersuchung definiert als die geringste Geschwindigkeit der letzten ausführbaren Wiederholung vor Erreichen des momentanen konzentrischen Muskelversagens, die bei den 1-RM- und X-RM-Tests gemessen wurde.

Tab. 17 zeigt die deskriptive Statistik zu den abhängigen Variablen der weiblichen Personen der untersuchten Probandenstichprobe.

Tab. 16: Deskriptive Statistik zu  $RSVT_{RIR3-RIR1}$  und MVT der männlichen Probanden

	RSVT RIR3 vsub [% MVT]	RSVT RIR2 vsub [% MVT]	RSVT RIR1 vsub [% MVT]	MVT [m/s]
N	11	11	11	11
Mittelwert	197,11	168,72	152,62	,14
Median	188,12	166,09	144,30	,14
Std.-Abweichung	36,59	31,61	23,62	,03
Varianz	1338,80	999,19	557,73	,00
Minimum	155,48	128,30	126,04	,10
Maximum	278,99	236,98	194,12	,19

Tab. 17: Deskriptive Statistik zu  $RSVT_{RIR3-RIR1}$  und MVT der weiblichen Probanden

	RSVT RIR3 vsub [% MVT]	RSVT RIR2 vsub [% MVT]	RSVT RIR1 vsub [% MVT]	MVT [m/s]
N	8	8	8	8
Mittelwert	179,21	170,82	138,27	,13
Median	176,92	161,57	131,03	,12
Std.-Abweichung	39,35	41,83	29,75	,03
Varianz	1548,08	1749,82	884,90	,00
Minimum	125,89	114,12	108,93	,11
Maximum	248,74	242,86	191,60	,18

### Einfluss des Geschlechts auf die MVT

Um die Normalverteilung der MVT zu überprüfen, wurde der Shapiro-Wilk-Test eingesetzt (Tab. 18). In Abb. 32 ist ein Boxplot der MVT der Gesamtstichprobe zu sehen, welcher die Höhe der MVT als konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (MV) in Metern pro Sekunde einer fitnessorientiert trainierenden Stichprobe im trainierten Zustand grafisch veranschaulicht.

Tab. 18: Tests auf Normalverteilung der MVT bei männlichen und weiblichen Probanden

	Geschlecht	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
MVT trainiert [m/s]	1 (männlich)	,170	11	,200	,948	11	,615
	2 (weiblich)	,286	8	,053	,858	8	,114

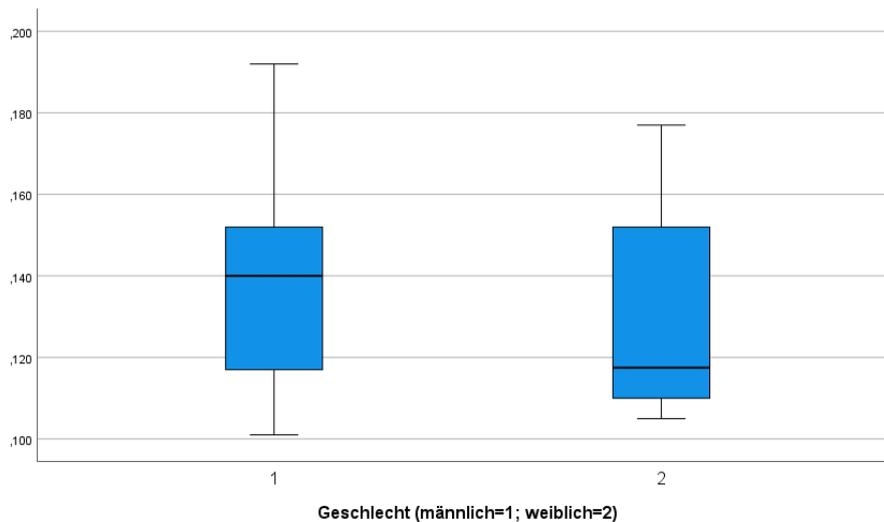


Abb. 32: Boxplots der MVT für männliche und weibliche Probanden

Die statistische Testung der Normalverteilung der MVT anhand des Shapiro-Wilk-Tests (Tab. 18) führt zum Schluss, dass für die Daten der MVT bei beiden Geschlechtern eine Normalverteilung ( $p > 0,05$ ) angenommen werden kann. Da die Voraussetzung der Normalverteilung erfüllt war, wurde zur inferenzstatistischen Überprüfung der Mittelwertsunterschiede der MVT zwischen männlichen und weiblichen Personen ein t-Test für unabhängige Stichproben (Tab. 19) berechnet.

Tab. 19: t-Test (inkl. Levene-Test) zur Analyse genderspezifischer Unterschiede der MVT

	Levene-Test der Varianzgleichheit		t-Test für die Mittelwertgleichheit						
	F	Sig.	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler differenz	95 % Konfidenzintervall der Differenz	
								Unterer Wert	Oberer Wert
MVT [m/s]	,016	,900	,505	17	,620	,006	,013	-,020	,033

Wie Tab. 19 entnommen werden kann, bestätigt der Levene-Test die Varianzhomogenität ( $p > 0.05$ ) der betrachteten Daten der MVT. Der t-Test für unabhängige Stichproben zeigt als Ergebnis des Mittelwertvergleichs der MVT zwischen männlichen und weiblichen Personen eine zweiseitige Signifikanz von  $p = 0,620$ , weshalb keine signifikanten Unterschiede der MVT zwischen männlichen und weiblichen Personen der untersuchten Probandenstichprobe angenommen werden können.

### Einfluss des Geschlechts auf die RSVT bei RIR3-1

Zur statistischen Überprüfung der Normalverteilung der Daten von  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  wurde der Shapiro-Wilk-Test verwendet (Tab. 20). Die darauffolgend dargestellte Abb. 33 veranschaulicht die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT [% MVT]) beider Geschlechter bei RIR3, RIR2 und RIR1 als Boxplots.

Tab. 20: Tests auf Normalverteilung der RSVT bei RIR3-1 bei männlichen und weiblichen Probanden

		Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
RSVT RIR3 [% MVT]	1 (männlich)	,143	11	,200	,920	11	,317
	2 (weiblich)	,130	8	,200	,965	8	,860
RSVT RIR2 [% MVT]	1 (männlich)	,193	11	,200	,930	11	,411
	2 (weiblich)	,235	8	,200	,929	8	,504
RSVT RIR1 [% MVT]	1 (männlich)	,240	11	,077	,882	11	,111
	2 (weiblich)	,224	8	,200	,881	8	,193

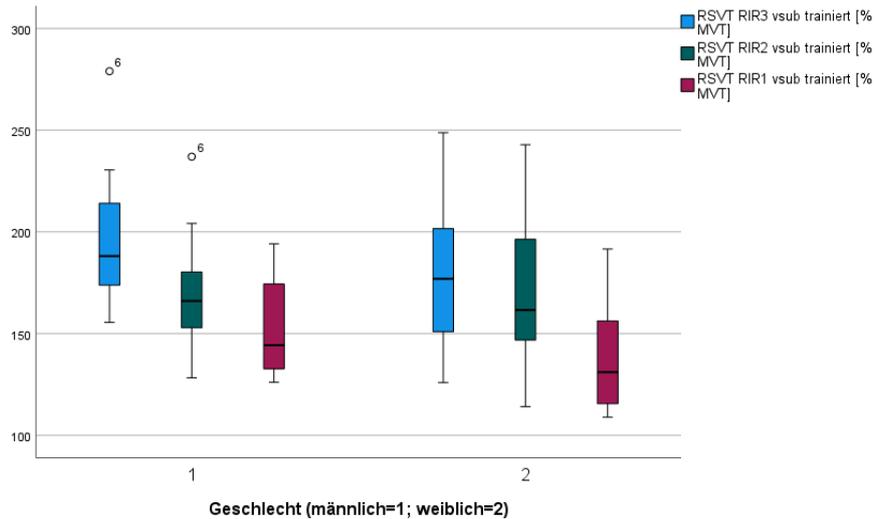


Abb. 33: Boxplots der RSVT bei RIR3-1 für männliche und weibliche Probanden

Die Berechnung von Varianzanalysen mit Messwiederholung setzt voraus, dass Sphärizität besteht. Sphärizität beschreibt die Varianzhomogenität der Differenzen zwischen den Werten der abhängigen Variable der einzelnen Messzeitpunkte (RSVT bei RIR3-1) und kann mithilfe des Mauchly-Tests (Tab. 21) in SPSS geprüft werden.

Tab. 21: Mauchly-Test für RSVT bei RIR3-1 in der Gesamtstichprobe

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres Chi-Quadrat	df	Epsilon			
				Sig.	Greenhouse- Geisser	Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
RIR	,756	4,477	2	,107	,804	,927	,500

Wie dem Ergebnis des Mauchly-Tests auf Sphärizität ( $p = 0,107$ ) in Tab. 21 entnommen werden kann, ist der berechnete Wert für  $p > 0,05$ , weshalb Sphärizität angenommen werden kann. Tab. 22 zeigt die Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung zu den Innersubjekteffekten in der betrachteten Gesamtstichprobe.

Tab. 22: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede der RSVT zwischen RIR3, RIR2 und RIR1 in der Gesamtstichprobe

Quelle		Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
RIR	Sphärizität angenommen	17006,896	2	8503,448	33,415	,000	,663
RIR * Geschlecht	Sphärizität angenommen	1055,216	2	527,608	2,073	,141	,109
Fehler (RIR)	Sphärizität angenommen	8652,228	34	254,477			

Entsprechend der in Tab. 22 dargestellten Ergebnisse der RMANOVA, unterscheiden sich die relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (RSVT) signifikant zwischen den Messzeitpunkten RIR3, RIR2 und RIR1 ( $p < 0,001$ ). Die Betrachtung des partiellen Eta-Quadrats zur Beurteilung der Effektgröße, zeigt einen großen Effekt ( $\eta^2 = 0,663$ ; vgl. Tab. 1) der Messzeitpunkte (RIR) auf die RSVT. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse keine signifikanten Interaktionseffekte ( $p = 0,109$ ) zwischen den Faktoren Messzeitpunkt (RIR) und Geschlecht.

Für die Analyse der Zwischensubjekteffekte anhand der RMANOVA unter Berücksichtigung des Geschlechts als Zwischensubjektfaktor gilt die Varianzhomogenität der untersuchten Gruppen als Testvoraussetzung. Wie den Ergebnissen des Levene-Tests (vgl. Tab. 23;  $RSVT_{RIR3}$ :  $p = 0,881$ ;  $RSVT_{RIR2}$ :  $p = 0,564$ ;  $RSVT_{RIR1}$ :  $p = 0,598$ ) entnommen werden kann, gilt die Voraussetzung der Varianzhomogenität als erfüllt.

Tab. 23: Levene-Test auf Varianzhomogenität für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$

		Levene-Statistik	df1	df2	Sig.
RSVT RIR3 [% MVT]	Basiert auf dem Median	,023	1	17	,881
RSVT RIR2 [% MVT]	Basiert auf dem Median	,347	1	17	,564
RSVT RIR1 [% MVT]	Basiert auf dem Median	,288	1	17	,598

Da alle Voraussetzungen zur Berücksichtigung des Geschlechts als Zwischensubjektfaktor der RMANOVA erfüllt waren, konnten die Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden bei  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  anhand der Zwischensubjekteffekte (Tab. 24) analysiert werden.

Tab. 24: RMANOVA zur Analyse der Zwischensubjekteffekte: Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden bei RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub>

Quelle	Typ III Quadrat- summe	df	Mittel der Quad- rate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Konstanter Term	1564785,713	1	1564785,713	536,485	,000	,969
Geschlecht	1403,108	1	1403,108	,481	,497	,028
Fehler	49584,543	17	2916,738			

Wie Tab. 24 entnommen werden kann, unterscheiden sich die relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten aller Messzeitpunkte (RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub>) nicht signifikant zwischen den männlichen und weiblichen Personen der Probandenstichprobe ( $p = 0,497$ ). Die Betrachtung des partiellen Eta-Quadrats zur Beurteilung der Effektgröße zeigt einen kleinen Effekt ( $\eta^2 = 0,028$ ) des Geschlechts auf die RSVT (vgl. Tab. 1).

Unter Berücksichtigung der zuvor dargestellten Ergebnisse der inferenzstatistischen Analyse der Mittelwertsunterschiede von RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub>, RSVT<sub>RIR1</sub> und MVT zwischen männlichen und weiblichen Personen kann geschlussfolgert werden, dass das Geschlecht der Personen innerhalb einer fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand keinen signifikanten Einfluss auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit besitzt. Da keine signifikanten genderspezifischen Unterschiede nachgewiesen werden konnten, gilt das Risiko einer Verzerrung der Vergleichbarkeit der RSVT zwischen rein männlichen und mixedgeschlechtlichen Probandenstichproben als gering. Aus diesem Grund werden bei allen weiteren Vor- und Hauptuntersuchungen der fitnessorientierten Probandenstichprobe (FKT) sowohl männliche als auch weibliche Personen berücksichtigt.

## 4.2.4 Voruntersuchung 4 – Einfluss der volitionalen Bewegungsgeschwindigkeit, der Belastungsintensität, des Trainingszustandes und der Trainingsausrichtung auf die Minimum Velocity Threshold

### 4.2.4.1 Hintergrund und Problemstellung

Innerhalb eines Trainingssatzes im Widerstandstraining verringert sich die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der Wiederholungen aufgrund der fortschreitenden muskulären Ermüdung bei zunehmender Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens. Die letzte vollständig ausführbare Wiederholung eines ausbelastenden Trainingssatzes drückt sich in einer kritischen Mindestgeschwindigkeit der konzentrischen Bewegungsphase aus, bei deren Unterschreiten keine weitere vollständige Wiederholung mehr ausgeführt werden kann (Izquierdo et al., 2006; Rodríguez-Rosell et al., 2020). Diese konzentrische Mindestgeschwindigkeit wird als Minimum Velocity Threshold (MVT) bezeichnet (Caven et al., 2020; Fernandes et al., 2021; Weakley et al., 2021).

Laut der aktuellen Studienlage gilt die MVT innerhalb einer spezifischen Trainingsübung als unabhängig von der verwendeten Belastungsintensität, unterscheidet sich allerdings zwischen verschiedenen Trainingsübungen. Demzufolge ist die MVT als intensitätsunabhängig und übungsspezifisch anzusehen (Helms et al., 2017; Izquierdo et al., 2006; Rodríguez-Rosell et al., 2020; Sánchez-Medina et al., 2014). Zourdos et al. (2016) untersuchten darüber hinaus den Einfluss der Trainingserfahrung auf die MVT, wobei festgestellt werden konnte, dass Personen, die sehr erfahren in der Ausführung bestimmter Trainingsübungen sind, geringere Bewegungsgeschwindigkeiten an der MVT realisieren können als weniger erfahrene Personen. Bei Betrachtung der aktuell zur Verfügung stehenden Studienlage wurde allerdings keine Studie gefunden, die sich mit dem Einfluss der volitionalen Bewegungsgeschwindigkeit auf die MVT befasst hat.

Da sich die vorliegende Forschungsarbeit mit der Adaptation der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining mit volitional submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten befasst und sich der entwickelte Steuerungsansatz anhand der RSVT unmittelbar auf die MVT bezieht ( $RSVT = v \div MVT$ ; vgl. Kapitel 3.1.4 und 3.1.5), verfolgte diese vierte Voruntersuchung den primären Zweck, den Einfluss der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit sowie der Belastungsintensität auf die MVT zu untersuchen. Um überprüfen zu können, ob sich dieser potenzielle Einfluss der volitionalen

konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten in Probandenstichproben mit verschiedenen Trainingszuständen und Ausrichtungen des Widerstandstrainings unterscheidet, bestand das sekundäre Ziel darin, die MVT zwischen den verschiedenen Probandenstichproben zu vergleichen.

#### 4.2.4.2 Untersuchungsmethodik

Die Daten dieser vierten Voruntersuchung wurden innerhalb der Testtermine der Hauptuntersuchung erhoben, weshalb die Probandenstichproben ( $FKT_{\text{detrainiert}}$ ,  $FKT_{\text{trainiert}}$  und  $LKT_{\text{trainiert}}$ ) sowie der Untersuchungsablauf identisch sind. Aus diesem Grund wird auf eine erneute Darstellung des Untersuchungsablaufs (Testübungen und -protokolle sowie Variablen und Messtechnik) verzichtet und stattdessen auf Kapitel 4.1.2 verwiesen. Die deskriptiven Statistiken zu den biometrischen und sportmotorischen Parametern der Probandenstichproben  $FKT_{\text{detrainiert}}$ ,  $FKT_{\text{trainiert}}$  und  $LKT_{\text{trainiert}}$  werden im nachfolgenden Kapitel 4.2.4.3 dargestellt. Wie in den Kapiteln 3.1.4 und 3.1.5 erläutert wurde, zielte die Hauptuntersuchung darauf ab, einen neuen Ansatz zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung anhand der RSVT zu überprüfen. Da dieser Ansatz voraussetzt, dass die MVT innerhalb von Probandenstichproben mit gleicher Trainingsausrichtung und gleichem Trainingszustand unabhängig von der Belastungsintensität und der volitionalen Bewegungsgeschwindigkeit ist, verfolgte diese vierte Voruntersuchung das primäre Ziel, die Unterschiede der MVT zwischen verschiedenen Intensitäten und volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten ( $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$ ) jeweils innerhalb der Probandenstichproben  $FKT_{\text{detrainiert}}$ ,  $FKT_{\text{trainiert}}$  und  $LKT_{\text{trainiert}}$  zu untersuchen. Darüber hinaus wurde das sekundäre Ziel verfolgt, die Unterschiede der MVT zwischen Probandenstichproben mit unterschiedlichem Trainingszustand und gleicher Ausrichtung des Widerstandstrainings ( $FKT_{\text{detrainiert}}$  vs.  $FKT_{\text{trainiert}}$ ) sowie zwischen Probandenstichproben mit gleichem Trainingszustand und unterschiedlicher Ausrichtung des Widerstandstrainings ( $FKT_{\text{trainiert}}$  vs.  $LKT_{\text{trainiert}}$ ) zu analysieren.

Da es sich bei den betrachteten fitnessorientiert trainierenden Probandenstichproben mit unterschiedlichen Trainingszuständen um die gleiche Stichprobe zu verschiedenen Erhebungszeitpunkten handelte, wurde zur statistischen Analyse der Unterschiede der MVT zwischen unterschiedlichen Intensitäten und volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten ( $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$ ) eine einfaktorielle

Varianzanalyse mit Messwiederholung mit insgesamt sechs Messzeitpunkten berechnet. Um den Einfluss des Trainingszustandes überprüfen zu können, wurden die erfassten Daten für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  post hoc paarweise zwischen den Erhebungszeitpunkten verglichen ( $MVT_{detrainiert}$  vs.  $MVT_{trainiert}$ ). Bei Betrachtung der Probandenstichproben im trainierten Zustand wurde zur inferenzstatistischen Überprüfung der Unterschiede der MVT zwischen unterschiedlichen Intensitäten und volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten ( $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$ ) eine einfaktorische Varianzanalyse mit Messwiederholung mit insgesamt drei Messzeitpunkten unter Berücksichtigung eines Zwischensubjektfaktors durchgeführt. Dies wird auch als Mixed ANOVA bezeichnet (Döring & Bortz, 2015, S. 209). Hierbei wurde die Ausrichtung des Widerstandstrainings als Zwischensubjektfaktor angegeben, um anhand der Zwischensubjekteffekte bewerten zu können, ob sich die MVT zwischen Probandenstichproben mit unterschiedlicher Trainingsausrichtung und gleichem Trainingszustand ( $MVT_{FKT_{trainiert}}$  vs.  $MVT_{LKT_{trainiert}}$ ) unterscheidet. In Übereinstimmung mit der Hauptuntersuchung sowie den bisherigen Voruntersuchungen wurde das Signifikanzniveau auf  $\alpha = 0,05$  ( $p < 0,05$ ) festgelegt. Um einer Akkumulation des  $\alpha$ -Fehlers entgegenzuwirken, wurde bei jeder berechneten RMANOVA die Bonferroni-Korrektur angewendet. Die Daten der Übung Kreuzheben mit der Langhantel wurden nicht analysiert (vgl. Voruntersuchung 1, Kapitel 4.2.1).

#### 4.2.4.3 Ergebnisse und Schlussfolgerung

Durch explorative Datenanalyse wurden keine relevanten Ausreißer ( $> 2,5$ -facher Interquartilsabstand) für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  identifiziert, weshalb in dieser Voruntersuchung alle Datensätze berücksichtigt wurden.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die deskriptiven Statistiken der biometrischen und sportmotorischen Parameter der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im detrainierten Zustand (Tab. 25), der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand (Tab. 26) sowie der leistungsorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand (Tab. 27).

Tab. 25: Deskriptive Statistik zur Probandenstichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

	Größe [m]	Gewicht [kg]	Alter [Jahre]	Krafttrainingserfahrung [Jahre]	1-RM [kg]
N	19	19	19	19	19
Mittelwert	1,75	73,82	32,05	11,18	66,84
Median	1,77	75,00	31,00	11,00	75,00
Std.-Abweichung	,09	11,93	4,47	5,37	24,44
Varianz	,01	142,31	19,94	28,87	597,11
Minimum	1,56	51,00	27,00	3,00	27,50
Maximum	1,90	91,00	43,00	23,00	100,00

Tab. 26: Deskriptive Statistik zur Probandenstichprobe FKT<sub>trainiert</sub>

	Größe [m]	Gewicht [kg]	Alter [Jahre]	Krafttrainingserfahrung [Jahre]	1-RM [kg]
N	19	19	19	19	19
Mittelwert	1,75	73,53	32,80	11,93	70,79
Median	1,77	75,00	31,75	11,75	72,50
Std.-Abweichung	,09	12,15	4,47	5,37	25,29
Varianz	,01	147,71	19,94	28,87	639,62
Minimum	1,56	51,00	27,75	3,75	30,00
Maximum	1,90	91,00	43,75	23,75	105,00

Tab. 27: Deskriptive Statistik zur Probandenstichprobe LKT<sub>trainiert</sub>

	Größe [m]	Gewicht [kg]	Alter [Jahre]	Krafttrainingserfahrung [Jahre]	1-RM [kg]
N	10	10	10	10	10
Mittelwert	1,81	92,24	31,80	10,30	129,75
Median	1,82	94,10	29,50	9,50	117,50
Std.-Abweichung	,044	9,36	8,31	4,67	22,81
Varianz	,00	87,55	69,07	21,79	520,07
Minimum	1,72	79,00	23,75	4,75	105,00
Maximum	1,86	109,00	51,75	18,75	170,00

In Tab. 28 wird die deskriptive Statistik der MVT des 1-RM-Tests ( $MVT_{1-RM}$ ) sowie der X-RM-Tests mit einer Belastungsintensität von 75 % 1-RM und volitional maximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit ( $MVT_{vmax}$ ) und volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit ( $MVT_{vsub}$ ) der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im detrainierten Zustand (FKT<sub>detrainiert</sub>) dargestellt.

Tab. 28: Deskriptive Statistik zu  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  der Probandenstichprobe  $FKT_{destrainiert}$

	$MVT_{1-RM}$ [m/s]	$MVT_{vmax}$ [m/s]	$MVT_{vsub}$ [m/s]
N	19	19	19
Mittelwert	,16	,19	,17
Median	,15	,19	,16
Std.-Abweichung	,04	,05	,04
Varianz	,00	,00	,00
Minimum	,09	,12	,11
Maximum	,22	,29	,26

Tab. 29 zeigt die deskriptive Statistik  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand ( $FKT_{trainiert}$ ).

Tab. 29: Deskriptive Statistik zu  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  der Probandenstichprobe  $FKT_{trainiert}$

	$MVT_{1-RM}$ [m/s]	$MVT_{vmax}$ [m/s]	$MVT_{vsub}$ [m/s]
N	19	19	19
Mittelwert	,15	,17	,16
Median	,15	,16	,16
Std.-Abweichung	,03	,04	,03
Varianz	,00	,00	,00
Minimum	,10	,11	,11
Maximum	,21	,25	,21

Tab. 30 stellt die deskriptive Statistik für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  der leistungsorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand ( $LKT_{trainiert}$ ) dar.

Tab. 30: Deskriptive Statistik zu  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  der Probandenstichprobe  $LKT_{trainiert}$

	$MVT_{1-RM}$ [m/s]	$MVT_{vmax}$ [m/s]	$MVT_{vsub}$ [m/s]
N	10	10	10
Mittelwert	,12	,11	,11
Median	,13	,10	,11
Std.-Abweichung	,02	,01	,02
Varianz	,00	,00	,00
Minimum	,09	,09	,09
Maximum	,15	,13	,14

Um die Normalverteilung der Daten von  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  der Probandenstichprobe  $FKT_{detrainiert}$  statistisch zu überprüfen, wurde der Shapiro-Wilk-Test eingesetzt (Tab. 31). Die darauffolgende Abb. 34 zeigt Boxplots, die die Daten von  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  als konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (MV) in Metern pro Sekunde innerhalb der Probandenstichprobe  $FKT_{detrainiert}$  abbilden.

Tab. 31: Tests auf Normalverteilung für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  in der Stichprobe  $FKT_{detrainiert}$

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
$MVT_{1-RM}$ [m/s]	,138	19	,200	,952	19	,420
$MVT_{vmax}$ [m/s]	,118	19	,200	,958	19	,532
$MVT_{vsub}$ [m/s]	,146	19	,200	,931	19	,180

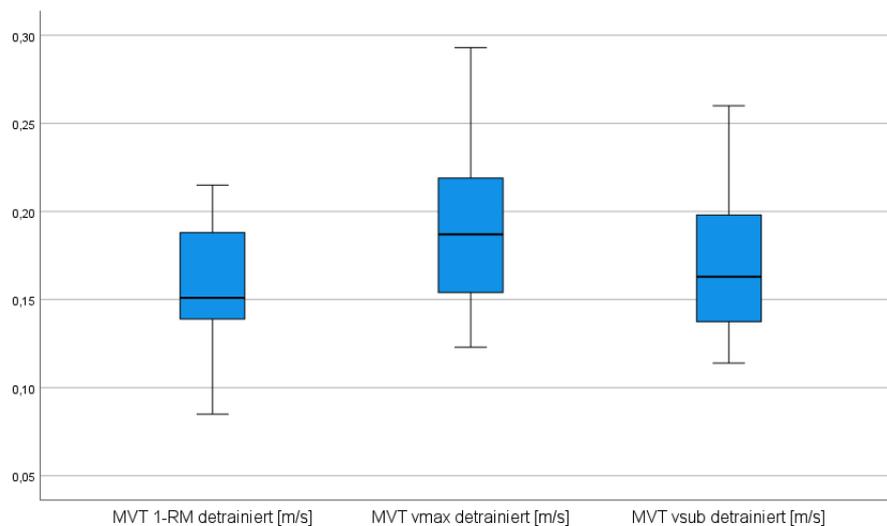


Abb. 34: Boxplots für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  in der Stichprobe  $FKT_{detrainiert}$

Tab. 32 zeigt die Tests auf Normalverteilung für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  in der Probandenstichprobe  $FKT_{trainiert}$ . Die darauffolgende Abb. 35 stellt Boxplots dar, die die Daten von  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  als konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (MV) in Metern pro Sekunde innerhalb der Probandenstichprobe  $FKT_{trainiert}$  visualisieren.

Tab. 32: Tests auf Normalverteilung für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  in der Stichprobe  $FKT_{trainiert}$

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
$MVT_{1-RM}$ [m/s]	,127	19	,200	,945	19	,325
$MVT_{vmax}$ [m/s]	,188	19	,075	,914	19	,089
$MVT_{vsub}$ [m/s]	,156	19	,200	,930	19	,176

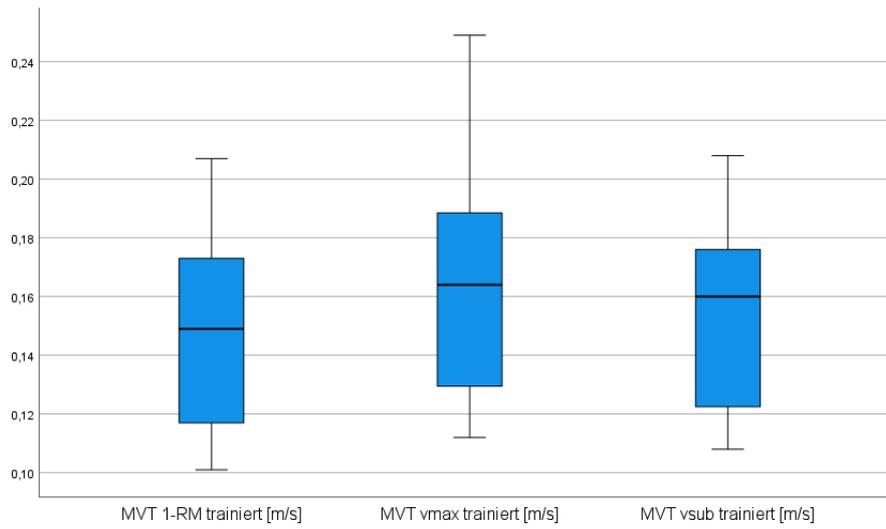


Abb. 35: Boxplots für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  in der Stichprobe  $FKT_{trainiert}$

Tab. 33 bildet die Tests auf Normalverteilung für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  in der Probandenstichprobe  $LKT_{trainiert}$  ab. Die nachfolgende Abb. 36 beinhaltet Boxplots zur Veranschaulichung der Daten von  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  als konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (MV) in Metern pro Sekunde innerhalb der Probandenstichprobe  $LKT_{trainiert}$ .

Tab. 33: Tests auf Normalverteilung für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  in der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
$MVT_{1-RM}$ [m/s]	,193	10	,200	,924	10	,393
$MVT_{vmax}$ [m/s]	,239	10	,111	,869	10	,097
$MVT_{vsub}$ [m/s]	,202	10	,200	,907	10	,259

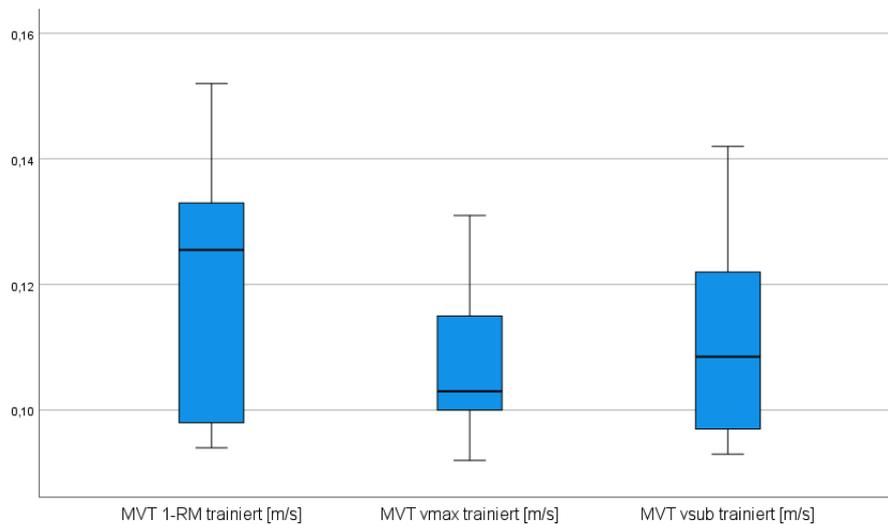


Abb. 36: Boxplots für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  in der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$

**Unterschiede bei  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  zwischen  $FKT_{detrainiert}$  und  $FKT_{trainiert}$**

Tab. 34 gibt die Ergebnisse des Mauchly-Tests auf Sphärizität für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  in der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten und untrainierten Zustand wieder.

Tab. 34: Mauchly-Test für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  in den Stichproben  $FKT_{detrainiert}$  und  $FKT_{trainiert}$

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres Chi-Quadrat	df	Sig.	Epsilon		Untergrenze
					Greenhouse- Geisser	Huynh-Feldt (HF)	
Tests	,269	21,149	14	,101	,687	,869	,200

Wie dem Ergebnis des Mauchly-Tests ( $p = 0,101$ ) in Tab. 34 entnommen werden kann, ist die Voraussetzung der Sphärizität zur Berechnung von Varianzanalysen mit Messwiederholung als erfüllt anzusehen.

Tab. 35 zeigt die Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung als paarweise Vergleiche der Innersubjekteffekte von  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  jeweils innerhalb sowie zwischen den Probandenstichproben  $FKT_{detrainiert}$  und  $FKT_{trainiert}$ .

Tab. 35: Paarweise Vergleiche der RMANOVA für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  der fitnessorientierten Stichprobe in verschiedenen Trainingszuständen ( $FKT_{detrainiert}$  und  $FKT_{trainiert}$ )

(I) Tests	(J) Tests	Mittelwertdifferenz	Std.-Fehler	Sig.	95 % Konfidenzintervall für Differenz	
					Untergrenze	Obergrenze
Vergleiche innerhalb gleicher Trainingszustände						
$MVT_{1-RM}$ $FKT_{detrainiert}$	$MVT_{vmax}$ $FKT_{detrainiert}$	-,032	,010	,055	-,064	,000
$MVT_{1-RM}$ $FKT_{detrainiert}$	$MVT_{vsub}$ $FKT_{detrainiert}$	-,015	,011	1,000	-,052	,022
$MVT_{vmax}$ $FKT_{detrainiert}$	$MVT_{vsub}$ $FKT_{detrainiert}$	,017	,012	1,000	-,022	,056
$MVT_{1-RM}$ $FKT_{trainiert}$	$MVT_{vmax}$ $FKT_{trainiert}$	-,017	,010	1,000	-,052	,017
$MVT_{1-RM}$ $FKT_{trainiert}$	$MVT_{vsub}$ $FKT_{trainiert}$	-,008	,008	1,000	-,033	,018
$MVT_{vmax}$ $FKT_{trainiert}$	$MVT_{vsub}$ $FKT_{trainiert}$	,010	,009	1,000	-,020	,039
Vergleiche zwischen Trainingszuständen						
$MVT_{1-RM}$ $FKT_{detrainiert}$	$MVT_{1-RM}$ $FKT_{trainiert}$	,010	,012	1,000	-,031	,050
$MVT_{vmax}$ $FKT_{detrainiert}$	$MVT_{vmax}$ $FKT_{trainiert}$	,024	,014	1,000	-,022	,070
$MVT_{vsub}$ $FKT_{detrainiert}$	$MVT_{vsub}$ $FKT_{trainiert}$	,017	,008	,836	-,011	,044

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni

Wie Tab. 35 entnommen werden kann, wurden weder für die Mittelwertvergleiche von  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  innerhalb der jeweiligen Trainingszustände der gleichen Probandenstichprobe ( $FKT_{detrainiert}$  und  $FKT_{trainiert}$ ) noch für die Mittelwertvergleiche der MVT zwischen  $FKT_{detrainiert}$  und  $FKT_{trainiert}$  signifikante Unterschiede festgestellt, da alle berechneten  $p$ -Wert der relevanten paarweisen Vergleiche über dem Signifikanzniveau von  $p < 0,05$  liegen.

**Unterschiede bei  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  zwischen  $FKT_{detrainiert}$  und  $FKT_{trainiert}$**

Tab. 36 zeigt den Mauchly-Test auf Sphärizität für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  der fitness- und leistungsorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand.

Tab. 36: Mauchly-Test für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  in den Stichproben  $FKT_{trainiert}$  und  $LKT_{trainiert}$

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres Chi-Quadrat	df	Sig.	Epsilon		Untergrenze
					Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt (HF)	
Tests	,889	3,059	2	,217	,900	,996	,500

Auf Grundlage des Ergebnisses des Mauchly-Tests ( $p = 0,217$ ) in Tab. 36 kann die Voraussetzung der Sphärizität zur Berechnung von Varianzanalysen mit Messwiederholung als erfüllt angesehen werden.

Tab. 37 zeigt die Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung zu den Innersubjekteffekten in den Probandenstichproben mit unterschiedlicher Ausrichtung des Widerstandstrainings und gleichen Trainingszuständen (FKT<sub>trainiert</sub> und LKT<sub>trainiert</sub>).

Tab. 37: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede zwischen MVT<sub>1-RM</sub>, MVT<sub>vmax</sub> und MVT<sub>vsub</sub> in den Stichproben FKT<sub>trainiert</sub> und LKT<sub>trainiert</sub>

Quelle		Typ III Quad- ratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Tests	Sphärizität angenommen	,000	2	8,549E-5	,151	,860	,006
Tests * Ausrichtung	Sphärizität angenommen	,003	2	,001	2,631	,081	,089
Fehler (Tests)	Sphärizität angenommen	,031	54	,001			

Die Analyse der Innersubjekteffekte der RMANOVA in Tab. 37 zeigt, dass sich die Werte der MVT nicht signifikant zwischen den Testkonditionen mit verschiedenen Belastungsintensitäten sowie den verschiedenen volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten unterscheiden ( $p = 0,860$ ). Die Betrachtung des partiellen Eta-Quadrats zur Beurteilung der Effektgröße zeigt außerdem einen zu vernachlässigenden Effekt ( $\eta^2 = 0,006$ ; vgl. Tab. 1) der Belastungsintensität und der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit auf die MVT. Darüber hinaus konnten keine signifikanten Interaktionseffekte ( $p = 0,081$ ) zwischen den Testkonditionen und der MVT festgestellt werden.

Zur differenzierten Analyse der Innersubjekteffekte zwischen den einzelnen Messzeitpunkten wurden die paarweisen Vergleiche nach Anwendung des post hoc-Tests nach Scheffé in Tab. 38 betrachtet. Die paarweisen Vergleiche zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen MVT<sub>1-RM</sub>, MVT<sub>vmax</sub> und MVT<sub>vsub</sub> innerhalb der Probandenstichprobe FKT<sub>trainiert</sub> und LKT<sub>trainiert</sub>.

Tab. 38: Paarweise Vergleiche der RMANOVA für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  der fitness- und leistungsorientierten Stichproben im gleichen Trainingszustand ( $FKT_{trainiert}$  und  $LKT_{trainiert}$ )

(I) Tests	(J) Tests	Mittelwertdifferenz	Std.-Fehler	Sig. <sup>a</sup>	95 % Konfidenzintervall für Differenz	
					Untergrenze	Obergrenze
$MVT_{1-RM}$	$MVT_{vmax}$	-,002	,008	1,000	-,022	,017
	$MVT_{vsub}$	,001	,006	1,000	-,014	,016
$MVT_{vmax}$	$MVT_{1-RM}$	,002	,008	1,000	-,017	,022
	$MVT_{vsub}$	,004	,006	1,000	-,012	,019
$MVT_{vsub}$	$MVT_{1-RM}$	-,001	,006	1,000	-,016	,014
	$MVT_{vmax}$	-,004	,006	1,000	-,019	,012

b. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni

Für die Analyse der Zwischensubjekteffekte wurde die Ausrichtung des Widerstandstrainings als Zwischensubjektfaktor der RMANOVA angegeben. Tab. 39 zeigt den Levene-Test auf Varianzhomogenität zwischen den Gruppen mit unterschiedlichen Ausrichtungen des Widerstandstrainings für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$ .

Tab. 39: Levene-Test auf Varianzhomogenität für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$

		Levene-Statistik	df1	df2	Sig.
$MVT_{1-RM}$ [m/s]	Basiert auf dem Median	3,852	1	27	,060
$MVT_{vmax}$ [m/s]	Basiert auf dem Median	10,418	1	27	,003
$MVT_{vsub}$ [m/s]	Basiert auf dem Median	5,180	1	27	,031

Wie den Ergebnissen des Levene-Tests entnommen werden kann, sind nicht alle berechneten  $p$ -Werte der drei Testkonditionen ( $MVT_{1-RM}$ :  $p = 0,060$ ;  $MVT_{vmax}$ :  $p = 0,003$ ;  $MVT_{vsub}$ :  $p = 0,031$ ) kleiner als die definierte Grenze von  $p < 0,05$ , weshalb die Voraussetzung der Varianzhomogenität zwischen den Gruppen nicht als vollständig erfüllt angesehen werden kann. Obwohl der Levene-Test eine teilweise Verletzung der Varianzhomogenität aufgezeigt hat, werden die Ergebnisse aus Tab. 40 aufgrund der Robustheit von Varianzanalysen gegenüber solchen Verletzungen, der geprüften Normalverteilung der Daten sowie des geringen Ausmaßes der Varianzen innerhalb der Gruppen (Tab. 29 & Tab. 30) zur Interpretation der Zwischensubjekteffekte verwendet (Blanca, Alarcón, Arnau, Bono & Bendayan, 2018; Janssen & Laatz, 2017, S. 352; Schäfer, 2016, S. 235).

Tab. 40: RMANOVA zur Analyse der Zwischensubjekteffekte: Unterschiede für  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{v_{max}}$  und  $MVT_{v_{sub}}$  zwischen Stichproben mit unterschiedlichen Ausrichtungen des Trainings

Quelle	Typ III Quadrat-		Mittel der Quad-	F	Sig.	Partielles Eta-
	summe	df				
Konstanter Term	1,425	1	1,425	799,438	,000	,967
Ausrichtung	,037	1	,037	20,899	,000	,436
Fehler	,048	27	,002			

Den Zwischensubjekteffekten der Varianzanalyse mit Messwiederholung in Tab. 40 kann entnommen werden, dass sich die MVT bei allen Testkonditionen ( $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{v_{max}}$  und  $MVT_{v_{sub}}$ ) signifikant zwischen den Probandenstichproben mit verschiedenen Ausrichtungen des Widerstandstrainings im trainierten Zustand unterscheidet ( $p < 0,001$ ). Die Betrachtung des partiellen Eta-Quadrats zur Beurteilung der Effektgröße, zeigt einen großen Effekt ( $\eta^2 = 0,436$ ) der Ausrichtung des Widerstandstrainings auf die MVT (vgl. Tab. 1).

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse dieser vierten Voruntersuchung, dass weder die Belastungsintensität (1-RM vs 75 % 1-RM) noch die volitionale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{max}$  vs.  $v_{sub}$ ) einen Einfluss auf die MVT haben. Darüber hinaus kann bei Personen mit fitnessorientierter Ausrichtung kein Einfluss des Trainingszustandes (FKT<sub>detrainiert</sub> vs. FKT<sub>trainiert</sub>) auf die MVT festgestellt werden. Allerdings besteht hinsichtlich der MVT ein signifikanter Unterschied zwischen den Probandenstichproben mit unterschiedlicher Ausrichtung des Widerstandstrainings (FKT<sub>trainiert</sub> vs. LKT<sub>trainiert</sub>). Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten der MVT bei FKT<sub>trainiert</sub> (Tab. 29) und LKT<sub>trainiert</sub> (Tab. 30) kann aus diesen Ergebnissen geschlossen werden, dass die leistungsorientiert trainierende Probandenstichprobe signifikant geringere konzentrische Bewegungsgeschwindigkeiten an der MVT realisieren konnte als die fitnessorientiert trainierende Probandenstichprobe. Im Hinblick auf die Hauptuntersuchung bedeutet dies, dass die MVT als unabhängig von der Belastungsintensität, der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit sowie vom Trainingszustand anzusehen ist. Zur Ermittlung der MVT, können folglich Tests mit unterschiedlichen Belastungsintensitäten oder volitionalen Bewegungsgeschwindigkeiten verwendet werden, solange diese maximal ausbelastend sind. Ändert sich die grundsätzliche Ausrichtung des Trainings, sodass vormals fitnessorientiert trainierende Personen seit mehreren Monaten leistungsorientiertes Widerstandstraining betreiben, sollte zur Überprüfung der MVT ein erneuter Test durchgeführt werden.

#### 4.2.5 Ergebniszusammenfassung und Schlussfolgerung aus den Voruntersuchungen

In der ersten Voruntersuchung wurde die Messgenauigkeit des Vmaxpro Sensors bei der Übung Kreuzheben mit der Langhantel mit unterschiedlichen volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten untersucht. Die erste Voruntersuchung hatte zum Ergebnis, dass der Vmaxpro Sensor im direkten Vergleich mit dem Qualisys MoCap System, unabhängig von der volitionalen Bewegungsgeschwindigkeit, keine ausreichende Messgenauigkeit zur Erfassung der MV bei der Übung Kreuzheben mit der Langhantel aufweist. Aus diesem Grund werden die Daten der Übung Kreuzheben mit der Langhantel in der nachfolgend dargestellten Hauptuntersuchung nicht weiter berücksichtigt und von der statistischen Analyse ausgeschlossen.

Die zweite Voruntersuchung untersuchte den Einfluss der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit auf den Hantelpfad beim Kreuzheben mit der Langhantel. Die Ergebnisse zeigen, dass der Verlauf des Hantelpfades durch volitional maximale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit stärker beeinflusst wird als durch volitional submaximale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit. Dies untermauert die dieser Dissertation zugrunde liegende These, dass maximale Bewegungsgeschwindigkeiten den Verlauf des Hantelpfades bzw. die Bewegungseffizienz negativ beeinflussen, und daher insbesondere für Personen mit geringer Trainingserfahrung oder mit fitness- bzw. gesundheitsorientierter Trainingsausrichtung als suboptimal angesehen werden können. Die Entwicklung und Überprüfung eines adaptierten Ansatzes der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining mit submaximalen Geschwindigkeiten erscheint somit legitim.

In der dritten Voruntersuchung wurde der Einfluss des Geschlechts auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) sowie die Minimum Velocity Threshold (MVT) bei Ausführung der Übung Bankdrücken mit der Langhantel mit volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit untersucht. Als Ergebnis dieser dritten Voruntersuchung wurde festgestellt, dass das Geschlecht der Personen innerhalb einer fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand keinen signifikanten Einfluss auf die RSVT sowie die MVT besitzt. Da das Risiko einer eingeschränkten Vergleichbarkeit von RSVT und MVT

zwischen rein männlichen und mischgeschlechtlichen Probandenstichproben als gering zu bewerten ist, wurden sowohl männliche als auch weibliche Personen der fitnessorientierten Probandenstichprobe (FKT) bei der statistischen Datenanalyse der Hauptuntersuchung berücksichtigt.

Die vierte Voruntersuchung untersuchte den Einfluss der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit, der Belastungsintensität, des Trainingszustandes sowie der Ausrichtung des Widerstandstrainings auf die MVT. Die Ergebnisse dieser Voruntersuchung konnten aufzeigen, dass die MVT innerhalb von Stichproben mit gleicher Trainingsausrichtung als unabhängig von der Belastungsintensität, der volitionalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit sowie vom Trainingszustand gilt. Da  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{vmax}$  und  $MVT_{vsub}$  in den Stichproben zwar nicht signifikant, aber trotzdem geringfügig voneinander abweichen, wurde in der Hauptuntersuchung die niedrigste MVT zur Berechnung der RSVT verwendet.

---

V

ERGEBNISSE

---

## 5.1 Deskriptive Statistiken zur Hauptuntersuchung

### 5.1.1 Daten der fitnessorientierten Stichprobe im detrainierten Zustand (FKT<sub>detrainiert</sub>)

Nachfolgend werden die deskriptiven Statistiken zu den allgemeinen und sportmotorischen Parametern sowie der für die Hauptuntersuchung relevanten Variablen innerhalb der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im detrainierten Zustand (FKT<sub>detrainiert</sub>) dargestellt. Tab. 41 zeigt Maße der zentralen Tendenz sowie Dispersionsmaße für die Parameter Körpergröße, Körpergewicht, kalendarisches Alter, Krafttrainingserfahrung und dynamische Maximalkraft (1-RM) der Testübung Bankdrücken mit der Langhantel.

Tab. 41: Deskriptive Statistik zur Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

	Größe [m]	Gewicht [kg]	Alter [Jahre]	Krafttrainingserfahrung [Jahre]	1-RM [kg]
N	19	19	19	19	19
Mittelwert	1,75	73,82	32,05	11,18	66,84
Median	1,77	75,00	31,00	11,00	75,00
Std.-Abweichung	,09	11,93	4,47	5,37	24,44
Varianz	,01	142,31	19,94	28,87	597,11
Minimum	1,56	51,00	27,00	3,00	27,50
Maximum	1,90	91,00	43,00	23,00	100,00

In Tab. 42 werden die deskriptiven Statistiken zu den absoluten konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten ( $v$ ) der letzten drei realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT (RIR3-RIR1), zur bei den X-RM-Tests verwendeten Last (75 % 1-RM) sowie zur Anzahl der im Testsatz mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{sub}$ ) vollständig ausgeführten Wiederholungen abgebildet. Alle nachfolgend dargestellten Tabellen beziehen sich auf die Übung Bankdrücken mit der Langhantel (vgl. Kapitel 4.1.2 und 4.2.1).

Tab. 42: Deskriptive Statistik zu  $v_{RIR3-RIR1}$  sowie zum X-RM-Test bei  $v_{sub}$  der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

	$v_{RIR3}$ [m/s]	$v_{RIR2}$ [m/s]	$v_{RIR1}$ [m/s]	75 % 1-RM [kg]	Wiederholungen bei $v_{sub}$
N	19	19	19	19	19
Mittelwert	,27	,23	,21	50,00	9,89
Median	,27	,22	,21	55,00	10,00
Std.-Abweichung	,06	,06	,06	18,41	3,21
Varianz	,00	,00	,00	338,89	10,32
Minimum	,17	,15	,13	20,00	6,00
Maximum	,37	,39	,33	75,00	16,00

Tab. 43 stellt die deskriptiven Statistiken zu den relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (RSVT) der letzten drei realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT ( $RIR3-RIR1$ ) sowie zur absoluten konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit an der MVT dar. Die MVT wird hier als die individuell niedrigste Geschwindigkeit aus den Daten von  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{v_{max}}$  und  $MVT_{v_{sub}}$  definiert und als Ausgangswert zur Berechnung der RSVT ( $RSVT_{RIR} = v_{RIR} \div MVT$ ) eingesetzt.

Tab. 43: Deskriptive Statistik zu  $RSVT_{RIR3-RIR1}$  und MVT der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

	$RSVT_{RIR3}$ [% MVT]	$RSVT_{RIR2}$ [% MVT]	$RSVT_{RIR1}$ [% MVT]	MVT [m/s]
N	19	19	19	19
Mittelwert	194,61	165,68	146,19	,15
Median	196,71	149,59	154,86	,14
Std.-Abweichung	46,99	40,63	42,33	,03
Varianz	2207,65	1650,50	1791,75	,00
Minimum	114,47	118,42	87,12	,09
Maximum	264,75	250,40	250,00	,22

Die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 37 & Abb. 38) veranschaulichen die relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (RSVT [% MVT]) bei RIR3, RIR2 und RIR1 sowie die absolute konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der individuell niedrigsten MVT der Probandenstichprobe FKT<sub>detrainiert</sub> als Boxplots.

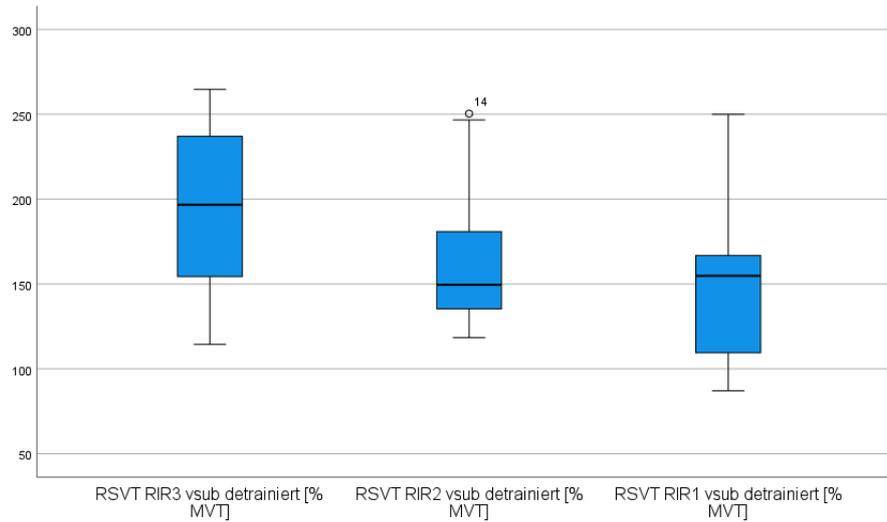


Abb. 37: Boxplots für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $FKT_{detrainiert}$

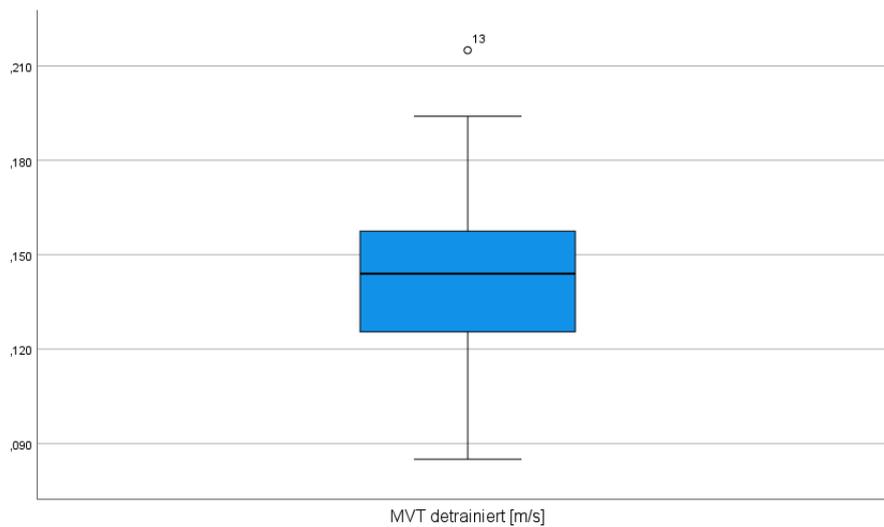


Abb. 38: Boxplot der MVT in der Stichprobe  $FKT_{detrainiert}$

Da die in der Hauptuntersuchung zur inferenzstatistischen Datenanalyse verwendeten Verfahren (vgl. Kapitel 4.1.3) voraussetzen, dass die betrachteten Daten zumindest annähernd normalverteilt sein sollten, werden in Tab. 44 und Tab. 45 die Tests auf Normalverteilung für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$ ,  $RSVT_{RIR1}$  und MVT in der Probandenstichprobe  $FKT_{detrainiert}$  dargestellt.

Tab. 44: Tests auf Normalverteilung für RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
RSVT RIR3 [% MVT]	,163	19	,200	,931	19	,180
RSVT RIR2 [% MVT]	,180	19	,105	,876	19	,018
RSVT RIR1 [% MVT]	,149	19	,200	,942	19	,283

Tab. 45: Test auf Normalverteilung der MVT in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
MVT [m/s]	,154	19	,200	,966	19	,698

Die statistische Testung der Normalverteilung für RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub>, RSVT<sub>RIR1</sub> (Tab. 44) und MVT (Tab. 45) anhand des Shapiro-Wilk-Tests führt zum Schluss, dass für RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR1</sub> und MVT eine Normalverteilung der Daten ( $p > 0,05$ ) angenommen werden kann. Der Shapiro-Wilk-Test für RSVT<sub>RIR2</sub> ( $p = 0,018$ ) zeigt, dass keine Normalverteilung angenommen werden kann. Da die alternative Testung anhand des Kolmogorov-Smirnov-Tests kein signifikantes Ergebnis ( $p = 0,105$ ) liefert und Varianzanalysen zudem als robust gegenüber nicht normalverteilten Daten gelten (Blanca, Alarcón, Arnau, Bono & Bendayan, 2017), wurden zur inferenzstatistischen Datenanalyse in der Hauptuntersuchung trotzdem parametrische Verfahren eingesetzt.

### 5.1.2 Daten der fitnessorientierten Stichprobe im trainierten Zustand (FKT<sub>trainiert</sub>)

Nachfolgend werden die deskriptiven Statistiken zu den allgemeinen und sportmotorischen Parametern sowie der für die Hauptuntersuchung relevanten Variablen innerhalb der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand (FKT<sub>trainiert</sub>) dargestellt. Tab. 46 zeigt Maße der zentralen Tendenz sowie Dispersionsmaße für die Parameter Körpergröße, Körpergewicht, kalendarisches Alter, Krafttrainingserfahrung und dynamische Maximalkraft (1-RM) der Testübung Bankdrücken mit der Langhantel.

Tab. 46: Deskriptive Statistik zur Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub>

	Größe [m]	Gewicht [kg]	Alter [Jahre]	Krafttrainingserfahrung [Jahre]	1-RM [kg]
N	19	19	19	19	19
Mittelwert	1,75	73,53	32,80	11,93	70,79
Median	1,77	75,00	31,75	11,75	72,50
Std.-Abweichung	,09	12,15	4,47	5,37	25,29
Varianz	,01	147,71	19,94	28,87	639,62
Minimum	1,56	51,00	27,75	3,75	30,00
Maximum	1,90	91,00	43,75	23,75	105,00

In Tab. 47 werden die deskriptiven Statistiken zu den absoluten konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten ( $v$ ) der letzten drei realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT (RIR3-RIR1), zur bei den X-RM-Tests verwendeten Last (75 % 1-RM) sowie zur Anzahl der im Testsatz mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{sub}$ ) vollständig ausgeführten Wiederholungen abgebildet. Alle nachfolgend dargestellten Tabellen beziehen sich auf die Übung Bankdrücken mit der Langhantel (vgl. Kapitel 4.1.2 und 4.2.1) in der Probandenstichprobe FKT<sub>trainiert</sub>.

Tab. 47: Deskriptive Statistik zu  $v_{RIR3-RIR1}$  sowie zum X-RM-Test bei  $v_{sub}$  der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub>

	v RIR3 [m/s]	v RIR2 [m/s]	v RIR1 [m/s]	75 % 1-RM [kg]	Wiederholungen bei $v_{sub}$
N	19	19	19	19	19
Mittelwert	,25	,22	,19	54,08	9,79
Median	,25	,24	,20	55,00	9,00
Std.-Abweichung	,05	,04	,04	18,66	2,78
Varianz	,00	,00	,00	348,06	7,73
Minimum	,14	,14	,12	22,50	6,00
Maximum	,33	,29	,26	80,00	15,00

Tab. 48 stellt die deskriptiven Statistiken zu den relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (RSVT) der letzten drei realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT (RIR3-RIR1) sowie zur absoluten konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit an der MVT dar. Die MVT wird hier als die individuell niedrigste Geschwindigkeit aus den Daten von  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{v_{max}}$  und  $MVT_{v_{sub}}$  definiert und als Ausgangswert zur Berechnung der RSVT ( $RSVT_{RIR} = v_{RIR} \div MVT$ ) eingesetzt.

Tab. 48: Deskriptive Statistik zu  $RSVT_{RIR3-RIR1}$  und MVT der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub>

	RSVT RIR3 [% MVT]	RSVT RIR2 [% MVT]	RSVT RIR1 [% MVT]	MVT [m/s]
N	19	19	19	19
Mittelwert	189,57	169,60	146,58	,13
Median	183,02	164,66	140,25	,12
Std.-Abweichung	37,79	35,17	26,59	,03
Varianz	1428,27	1236,73	706,95	,00
Minimum	125,89	114,12	108,93	,10
Maximum	278,99	242,86	194,12	,19

Die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 39 & Abb. 40) veranschaulichen die relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (RSVT [% MVT]) bei RIR3, RIR2 und RIR1 sowie die absolute konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der individuell niedrigsten MVT der Probandenstichprobe FKT<sub>trainiert</sub> als Boxplots.

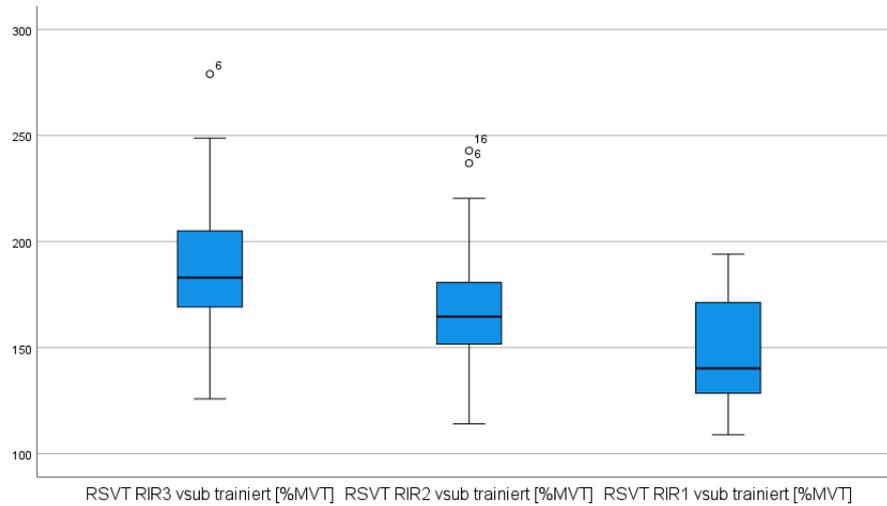


Abb. 39: Boxplots für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $FKT_{trainiert}$

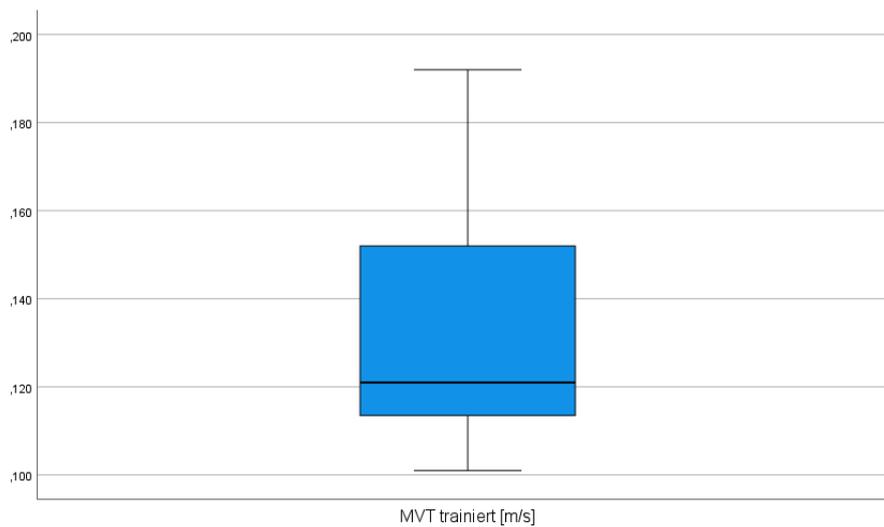


Abb. 40: Boxplot der MVT in der Stichprobe  $FKT_{trainiert}$

Da die in der Hauptuntersuchung zur inferenzstatistischen Datenanalyse verwendeten Verfahren (vgl. Kapitel 4.1.3) voraussetzen, dass die betrachteten Daten zumindest annähernd normalverteilt sein sollten, werden in Tab. 49 und Tab. 50 die Tests auf Normalverteilung für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$ ,  $RSVT_{RIR1}$  und MVT in der Probandenstichprobe  $FKT_{trainiert}$  dargestellt.

Tab. 49: Tests auf Normalverteilung für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $FKT_{trainiert}$

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
RSVT RIR3 [% MVT]	,129	19	,200	,972	19	,807
RSVT RIR2 [% MVT]	,205	19	,034	,927	19	,153
RSVT RIR1 [% MVT]	,186	19	,081	,924	19	,136

Tab. 50: Test auf Normalverteilung der MVT in der Stichprobe  $FKT_{trainiert}$

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
MVT [m/s]	,212	19	,024	,917	19	,101

Die statistische Testung der Normalverteilung für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$ ,  $RSVT_{RIR1}$  (Tab. 49) und MVT (Tab. 50) anhand des Shapiro-Wilk-Tests führt zum Schluss, dass für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$ ,  $RSVT_{RIR1}$  und MVT eine Normalverteilung der Daten ( $p > 0,05$ ) angenommen werden kann.

### 5.1.3 Daten der leistungsorientierten Stichprobe im trainierten Zustand (LKT<sub>trainiert</sub>)

Nachfolgend werden die deskriptiven Statistiken zu den allgemeinen und sportmotorischen Parametern sowie der für die Hauptuntersuchung relevanten Variablen innerhalb der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im detrainierten Zustand (LKT<sub>trainiert</sub>) dargestellt. Tab. 51 zeigt Maße der zentralen Tendenz sowie Dispersionsmaße für die Parameter Körpergröße, Körpergewicht, kalendarisches Alter, Krafttrainingserfahrung und dynamische Maximalkraft (1-RM) der Testübung Bankdrücken mit der Langhantel.

Tab. 51: Deskriptive Statistik zur Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub>

	Größe [m]	Gewicht [kg]	Alter [Jahre]	Krafttrainingserfahrung [Jahre]	1-RM [kg]
N	10	10	10	10	10
Mittelwert	1,81	92,24	31,80	10,30	129,75
Median	1,82	94,10	29,50	9,50	117,50
Std.-Abweichung	,04	9,36	8,31	4,67	22,81
Varianz	,00	87,55	69,07	21,79	520,07
Minimum	1,72	79,00	23,75	4,75	105,00
Maximum	1,86	109,00	51,75	18,75	170,00

In Tab. 52 werden die deskriptiven Statistiken zu den absoluten konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten ( $v$ ) der letzten drei realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT (RIR3-RIR1), zur bei den X-RM-Tests verwendeten Last (75 % 1-RM) sowie zur Anzahl der im Testsatz mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{sub}$ ) vollständig ausgeführten Wiederholungen abgebildet. Alle nachfolgend dargestellten Tabellen beziehen sich auf die Übung Bankdrücken mit der Langhantel (vgl. Kapitel 4.1.2 und 4.2.1) in der Probandenstichprobe LKT<sub>trainiert</sub>.

Tab. 52: Deskriptive Statistik zu  $v_{RIR3-RIR1}$  sowie zum X-RM-Test bei  $v_{sub}$  der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$

	v RIR3 [m/s]	v RIR2 [m/s]	v RIR1 [m/s]	75 % 1-RM [kg]	Wiederholungen bei $v_{sub}$
N	10	10	10	10	10
Mittelwert	,23	,22	,19	95,75	7,90
Median	,23	,22	,19	87,50	8,00
Std.-Abweichung	,04	,03	,03	19,33	1,73
Varianz	,00	,00	,00	373,68	2,99
Minimum	,17	,15	,15	70,00	6,00
Maximum	,30	,27	,23	127,50	12,00

Tab. 53 stellt die deskriptiven Statistiken zu den relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (RSVT) der letzten drei realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT ( $RIR3-RIR1$ ) sowie zur absoluten konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit an der MVT dar. Die MVT wird hier als die individuell niedrigste Geschwindigkeit aus den Daten von  $MVT_{1-RM}$ ,  $MVT_{v_{max}}$  und  $MVT_{v_{sub}}$  definiert und als Ausgangswert zur Berechnung der RSVT ( $RSVT_{RIR} = v_{RIR} \div MVT$ ) eingesetzt.

Tab. 53: Deskriptive Statistik zu  $RSVT_{RIR3-RIR1}$  und MVT der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$

	RSVT RIR3 [% MVT]	RSVT RIR2 [% MVT]	RSVT RIR1 [% MVT]	MVT [m/s]
N	10	10	10	10
Mittelwert	224,44	212,20	182,96	,10
Median	234,42	215,50	172,89	,10
Std.-Abweichung	41,70	39,75	39,67	,01
Varianz	1738,82	1579,68	1570,25	,00
Minimum	156,56	148,54	127,59	,09
Maximum	278,26	281,05	237,23	,12

Die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 41 & Abb. 42) veranschaulichen die relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (RSVT [% MVT]) bei RIR3, RIR2 und RIR1 sowie die absolute konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der individuell niedrigsten MVT der Probandenstichprobe  $LKT_{trainiert}$  als Boxplots.

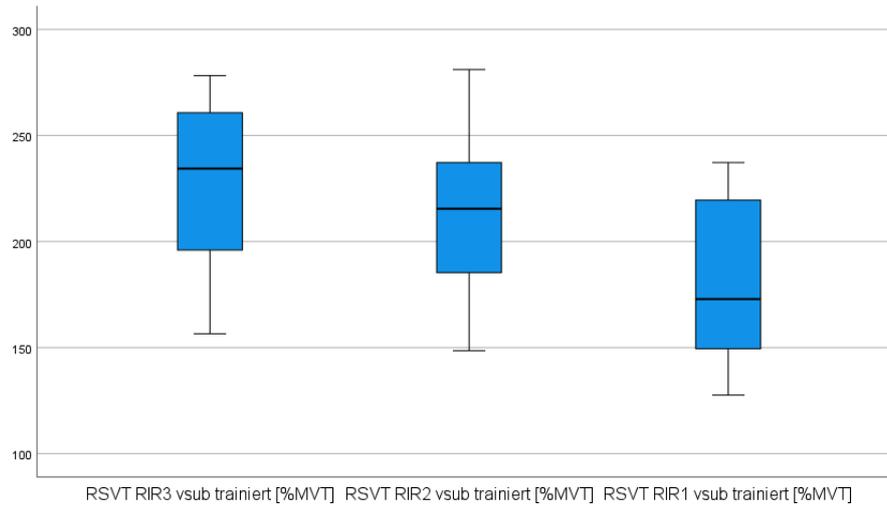


Abb. 41: Boxplots für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$

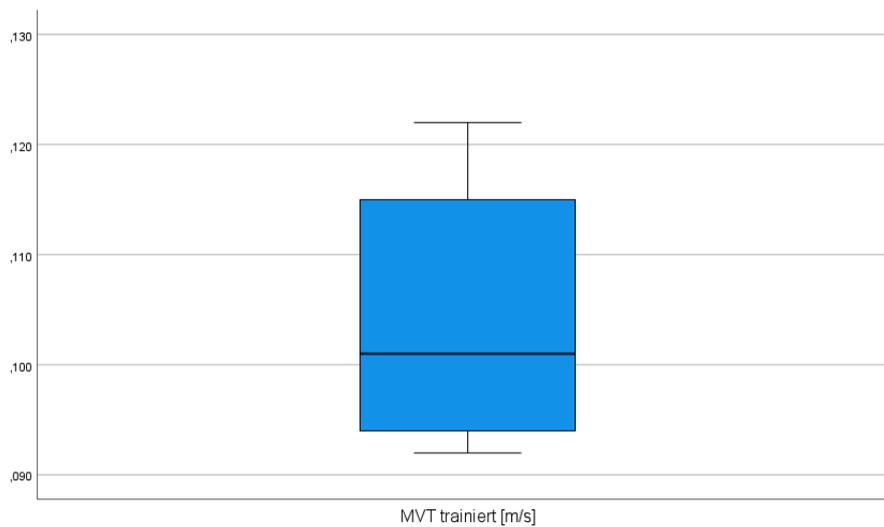


Abb. 42: Boxplot der MVT in der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$

Da die in der Hauptuntersuchung zur inferenzstatistischen Datenanalyse verwendeten Verfahren (vgl. Kapitel 4.1.3) voraussetzen, dass die betrachteten Daten zumindest annähernd normalverteilt sein sollten, werden in Tab. 54 und Tab. 55 die Tests auf Normalverteilung für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$ ,  $RSVT_{RIR1}$  und MVT in der Probandenstichprobe  $LKT_{trainiert}$  dargestellt.

Tab. 54: Tests auf Normalverteilung für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
RSVT RIR3 [% MVT]	,148	10	,200	,932	10	,471
RSVT RIR2 [% MVT]	,184	10	,200	,960	10	,789
RSVT RIR1 [% MVT]	,218	10	,195	,912	10	,293

Tab. 55: Test auf Normalverteilung der MVT in der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
MVT [m/s]	,211	10	,200	,874	10	,113

Die statistische Testung der Normalverteilung für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$ ,  $RSVT_{RIR1}$  (Tab. 54) und MVT (Tab. 55) anhand des Shapiro-Wilk-Tests führt zum Schluss, dass für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$ ,  $RSVT_{RIR1}$  und MVT eine Normalverteilung der Daten ( $p > 0,05$ ) angenommen werden kann.

## 5.2 Ergebnisse der Hauptuntersuchung zu Fragenkomplex 5

Da die Voraussetzung der Normalverteilung angenommen werden konnte, wurde zur inferenzstatistischen Überprüfung der Mittelwertsunterschiede der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten bei den drei letzten vollständig ausführbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT (RSVT<sub>RIR3</sub> vs. RSVT<sub>RIR2</sub> vs. RSVT<sub>RIR1</sub>) eine Varianzanalyse mit Messwiederholung (RMANOVA) eingesetzt (vgl. Kapitel 5.1).

### 5.2.1 Inferenzstatistische Analyse für FKT<sub>detrainiert</sub>

Tab. 56 bildet den Mauchly-Test auf Sphärizität für RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> in der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im detrainierten Zustand ab (FKT<sub>detrainiert</sub>).

Tab. 56: Mauchly-Test für RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> & RSVT<sub>RIR1</sub> in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres		df	Sig.	Epsilon		Untergrenze
		Chi-Quadrat				Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt (HF)	
RSVT	,817	3,440		2	,179	,845	,923	,500

Das Ergebnis des Mauchly-Tests auf Sphärizität ( $p = 0,179$ ) in Tab. 56 bestätigt die Sphärizität als Voraussetzung zur Berechnung von Varianzanalysen mit Messwiederholung.

Tab. 57 zeigt die Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung zu den Innersubjekteffekten bzw. den Unterschieden zwischen RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> innerhalb der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im detrainierten Zustand (FKT<sub>detrainiert</sub>).

Tab. 57: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede zwischen RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> & RSVT<sub>RIR1</sub> in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

Quelle		Typ III		Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
		Quadratsumme	df				
RSVT	Sphärizität angenommen	22553,580	2	11276,790	13,476	,000	,428
Fehler (RSVT)	Sphärizität angenommen	30124,432	36	836,790			

Die Analyse der Innersubjekteffekte in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub> zeigt hinsichtlich der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,001$ ) zwischen den Messzeitpunkten RIR3, RIR2 und RIR1 (Tab. 57). Die Betrachtung des partiellen Eta-Quadrats zur Beurteilung der Effektgröße zeigt außerdem einen großen Effekt ( $\eta^2 = 0,428$ ; vgl. Tab. 1) der Nähe zur MVT (RIR3, RIR2 & RIR1) auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT).

Tab. 58 stellt die Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung als paarweise Vergleiche der Innersubjekteffekte von RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> innerhalb der Probandenstichprobe FKT<sub>detrainiert</sub> nach Anwendung des post hoc-Tests nach Scheffé dar.

Tab. 58: Paarweise Vergleiche der RMANOVA für RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> & RSVT<sub>RIR1</sub> in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

(I) RIR	(J) RIR	Mittelwertdifferenz			95 % Konfidenzintervall für Differenz	
		(I-J)	Std.-Fehler	Sig.	Untergrenze	Obergrenze
RSVT <sub>RIR3</sub>	RSVT <sub>RIR2</sub>	28,927	10,963	,050	-,006	57,861
	RSVT <sub>RIR1</sub>	48,419	9,441	,000	23,502	73,335
RSVT <sub>RIR2</sub>	RSVT <sub>RIR3</sub>	-28,927	10,963	,050	-57,861	,006
	RSVT <sub>RIR1</sub>	19,491	7,411	,051	-,067	39,050
RSVT <sub>RIR1</sub>	RSVT <sub>RIR3</sub>	-48,419	9,441	,000	-73,335	-23,502
	RSVT <sub>RIR2</sub>	-19,491	7,411	,051	-39,050	,067

Die paarweisen Vergleiche in Tab. 58 zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen RSVT<sub>RIR3</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> ( $p < 0,001$ ). Die berechneten  $p$ -Werte der Unterschiede zwischen RSVT<sub>RIR3</sub> und RSVT<sub>RIR2</sub> ( $p = 0,05$ ) sowie zwischen RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> ( $p = 0,051$ ) zeigen keine Signifikanz. Die geringfügige Überschreitung des Signifikanzniveaus deutet in Kombination mit den signifikanten übergeordneten Innersubjekteffekten jedoch auch hier auf einen tendenziellen Unterschied hin.

Die nachfolgende Abbildung (Abb. 43) veranschaulicht den Verlauf der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (RSVT) zu den Messzeitpunkten RIR3, RIR2 und RIR1 innerhalb der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im detrainierten Zustand (FKT<sub>detrainiert</sub>).

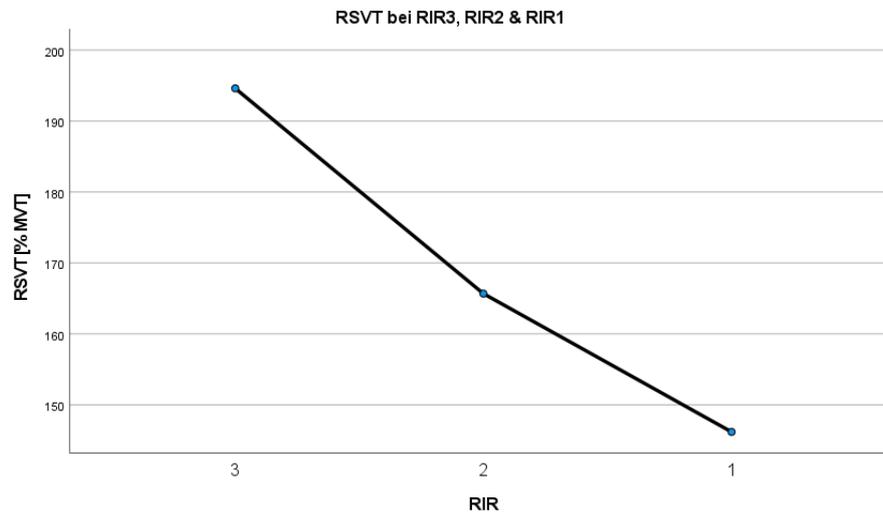


Abb. 43: Verlauf der RSVT von RIR3 bis RIR1 in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

### 5.2.2 Inferenzstatistische Analyse für FKT<sub>trainiert</sub>

Tab. 59 bildet den Mauchly-Test auf Sphärizität für RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> in der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand ab (FKT<sub>trainiert</sub>).

Tab. 59: Mauchly-Test für RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> & RSVT<sub>RIR1</sub> in der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub>

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres		Sig.	Epsilon		
		Chi-Quadrat	df		Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
RSVT	,858	2,607	2	,272	,876	,962	,500

Wie dem Ergebnis des Mauchly-Tests ( $p = 0,272$ ) in Tab. 59 entnommen werden kann, ist die Voraussetzung der Sphärizität zur Berechnung von Varianzanalysen mit Messwiederholung als erfüllt anzusehen.

Tab. 60 stellt die Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung zu den Innersubjekteffekten bzw. den Unterschieden zwischen RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> innerhalb der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand (FKT<sub>trainiert</sub>) dar.

Tab. 60: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede zwischen RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> & RSVT<sub>RIR1</sub> in der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub>

Quelle		Typ III Quad-	df	Mittel der	F	Sig.	Partielles Eta-
		ratsumme		Quadrate			Quadrat
RSVT	Sphärizität angenommen	17588,310	2	8794,155	32,613	,000	,644
Fehler(RSVT)	Sphärizität angenommen	9707,444	36	269,651			

Die Analyse der Innersubjekteffekte in der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub> zeigt hinsichtlich der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,001$ ) zwischen den Messzeitpunkten RIR3, RIR2 und RIR1 (Tab. 60). Die Betrachtung des partiellen Eta-Quadrats zur Beurteilung der Effektgröße zeigt außerdem einen großen Effekt ( $\eta^2 = 0,644$ ; vgl. Tab. 1) der Nähe zur MVT (RIR3, RIR2 & RIR1) auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT).

In Tab. 61 werden die Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung als paarweise Vergleiche der Innersubjekteffekte von  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  innerhalb der Probandenstichprobe  $FKT_{trainiert}$  nach Anwendung des post hoc-Tests nach Scheffé abgebildet.

Tab. 61: Paarweise Vergleiche der RMANOVA für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  &  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $FKT_{trainiert}$

(I) RIR	(J) RIR	Mittelwertdifferenz			95 % Konfidenzintervall für Differenz	
		(I-J)	Std.-Fehler	Sig.	Untergrenze	Obergrenze
$RSVT_{RIR3}$	$RSVT_{RIR2}$	19,970	5,528	,006	5,381	34,558
	$RSVT_{RIR1}$	42,992	6,031	,000	27,075	58,909
$RSVT_{RIR2}$	$RSVT_{RIR3}$	-19,970	5,528	,006	-34,558	-5,381
	$RSVT_{RIR1}$	23,022	4,269	,000	11,756	34,288
$RSVT_{RIR1}$	$RSVT_{RIR3}$	-42,992	6,031	,000	-58,909	-27,075
	$RSVT_{RIR2}$	-23,022	4,269	,000	-34,288	-11,756

Die paarweisen Vergleiche in Tab. 61 zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen  $RSVT_{RIR3}$  und  $RSVT_{RIR1}$  ( $p < 0,001$ ), zwischen  $RSVT_{RIR3}$  und  $RSVT_{RIR2}$  ( $p = 0,006$ ) sowie zwischen  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  ( $p < 0,001$ ).

Die nachfolgende Abbildung (Abb. 44) visualisiert den Verlauf der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (RSVT) zu den Messzeitpunkten RIR3, RIR2 und RIR1 innerhalb der fitnessorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand ( $FKT_{trainiert}$ ).

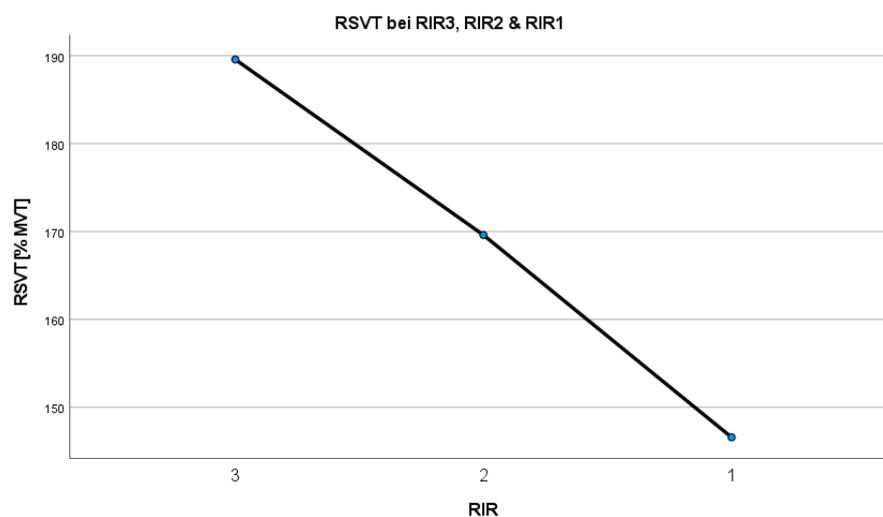


Abb. 44: Verlauf der RSVT von RIR3 bis RIR1 in der Stichprobe  $FKT_{trainiert}$

### 5.2.3 Inferenzstatistische Analyse für LKT<sub>trainiert</sub>

Tab. 62 bildet den Mauchly-Test auf Sphärizität für RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> in der leistungsorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand (LKT<sub>trainiert</sub>) ab.

Tab. 62: Mauchly-Test für RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> & RSVT<sub>RIR1</sub> in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub>

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres Chi-Quadrat	df	Sig.	Epsilon		
					Greenhouse- Geisser	Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
RSVT	,870	1,111	2	,574	,885	1,000	,500

Das Ergebnis des Mauchly-Tests ( $p = 0,574$ ) in Tab. 62 bestätigt, dass die Testvoraussetzung der Sphärizität als erfüllt angesehen werden kann.

Tab. 63 zeigt die Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung zu den Innersubjekteffekten bzw. den Unterschieden zwischen RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> innerhalb der leistungsorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand (LKT<sub>trainiert</sub>).

Tab. 63: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede zwischen RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> & RSVT<sub>RIR1</sub> in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub>

Quelle		Typ III Quad- ratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
RSVT	Sphärizität angenommen	9087,029	2	4543,514	10,789	,001	,545
Fehler(RSVT)	Sphärizität angenommen	7580,563	18	421,142			

Die Analyse der Innersubjekteffekte in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub> zeigt hinsichtlich der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) einen signifikanten Unterschied ( $p = 0,001$ ) zwischen den Messzeitpunkten RIR3, RIR2 und RIR1 (Tab. 63). Die Betrachtung des partiellen Eta-Quadrats zur Beurteilung der Effektgröße zeigt außerdem einen großen Effekt ( $\eta^2 = 0,545$ ; vgl. Tab. 1) der Nähe zur MVT (RIR3, RIR2 & RIR1) auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT).

Tab. 64 stellt die Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung als paarweise Vergleiche der Innersubjekteffekte von RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> innerhalb der Probandenstichprobe LKT<sub>trainiert</sub> nach Anwendung des post hoc-Tests nach Scheffé dar.

Tab. 64: Paarweise Vergleiche der RMANOVA für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  &  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$

(I) RIR	(J) RIR	Mittelwertdifferenz			95 % Konfidenzintervall für Differenz	
		(I-J)	Std.-Fehler	Sig.	Untergrenze	Obergrenze
$RSVT_{RIR3}$	$RSVT_{RIR2}$	12,240	9,118	,637	-14,505	38,985
	$RSVT_{RIR1}$	41,485	10,537	,010	10,577	72,393
$RSVT_{RIR2}$	$RSVT_{RIR3}$	-12,240	9,118	,637	-38,985	14,505
	$RSVT_{RIR1}$	29,245	7,650	,012	6,804	51,686
$RSVT_{RIR1}$	$RSVT_{RIR3}$	-41,485	10,537	,010	-72,393	-10,577
	$RSVT_{RIR2}$	-29,245	7,650	,012	-51,686	-6,804

Die paarweisen Vergleiche in Tab. 64 zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen  $RSVT_{RIR3}$  und  $RSVT_{RIR2}$  ( $p = 0,637$ ). Anhand der berechneten  $p$ -Werte der Unterschiede zwischen  $RSVT_{RIR3}$  und  $RSVT_{RIR1}$  ( $p = 0,01$ ) sowie zwischen  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  ( $p = 0,012$ ) kann hier ein signifikanter Unterschied angenommen werden.

Der Verlauf der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (RSVT) zu den Messzeitpunkten RIR3, RIR2 und RIR1 innerhalb der leistungsorientiert trainierenden Probandenstichprobe im trainierten Zustand ( $LKT_{trainiert}$ ) wird in der nachfolgenden Abb. 45 veranschaulicht.

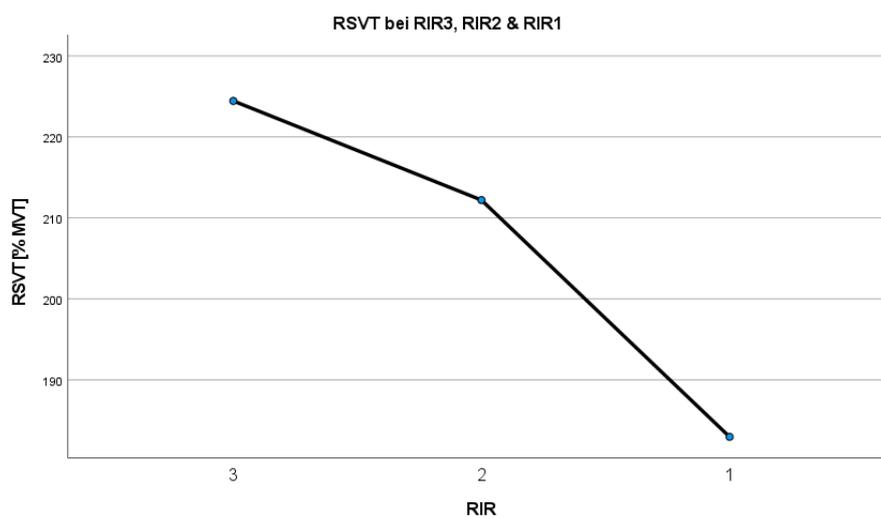


Abb. 45: Verlauf der RSVT von RIR3 bis RIR1 in der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$

### 5.3 Ergebnisse der Hauptuntersuchung zu Fragenkomplex 6

#### 5.3.1 Inferenzstatistische Analyse für FKT<sub>detrainiert</sub> vs. FKT<sub>trainiert</sub>

Da es sich bei den Stichproben FKT<sub>detrainiert</sub> und FKT<sub>trainiert</sub> um die wiederholte Messung der gleichen Personen in unterschiedlichen Trainingszuständen handelt, wurde zur inferenzstatistischen Datenanalyse eine Varianzanalyse mit Messwiederholung (RMANOVA) mit sechs Messzeitpunkten (RSVT<sub>RIR3-1 FKTdetrainiert</sub> + RSVT<sub>RIR3-1 FKTrainiert</sub>) berechnet, um die RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1 paarweise zwischen den unterschiedlichen Trainingszuständen der fitnessorientiert trainierenden Personen zu vergleichen. Die Voraussetzung der Normalverteilung wurde als erfüllt angesehen (vgl. Kapitel 5.1).

Tab. 65 bildet den Mauchly-Test auf Sphärizität der RSVT zu den sechs Messzeitpunkten (RSVT<sub>RIR3-1 FKTdetrainiert</sub> + RSVT<sub>RIR3-1 FKTrainiert</sub>) in der fitnessorientierten Probandenstichprobe im detrainierten sowie trainierten Zustand ab.

Tab. 65: Mauchly-Test für RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> beider Messzeitpunkte der Stichprobe FKT (FKT<sub>detrainiert</sub> und FKT<sub>trainiert</sub>)

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres		Sig.	Epsilon		
		Chi-Quadrat	df		Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
RSVT	,015	67,933	14	,000	,374	,416	,200

Das Ergebnis des Mauchly-Tests ( $p < 0,001$ ) in Tab. 65 führt dazu, dass die Voraussetzung der Sphärizität zur Berechnung von Varianzanalysen mit Messwiederholung nicht als erfüllt angesehen werden kann. Zur Betrachtung der Innersubjekteffekte muss deshalb die Epsilon-Korrektur nach Greenhouse-Geisser berücksichtigt werden.

Tab. 66 zeigt die Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung zu den Innersubjekteffekten bzw. den Unterschieden zwischen allen sechs Messzeitpunkten der RSVT (RSVT<sub>RIR3-1 FKTdetrainiert</sub> + RSVT<sub>RIR3-1 FKTrainiert</sub>) innerhalb der fitnessorientierten Probandenstichprobe im detrainierten und trainierten Zustand.

Tab. 66: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede zwischen den sechs Messzeitpunkten der RSVT (RSVT<sub>RIR3-1 FKTdetrainiert</sub> + RSVT<sub>RIR3-1 FKTtrainiert</sub>) in der Stichprobe FKT

Quelle		Typ III Quad- ratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
RSVT	Greenhouse-Geisser	40143,557	1,872	21448,450	5,697	,008	,240
Fehler (RSVT)	Greenhouse-Geisser	126825,669	33,689	3764,564			

Die Analyse der Innersubjekteffekte in der fitnessorientierten Stichprobe (Tab. 66) deutet auf einen signifikanten Unterschied ( $p = 0,008$ ) zwischen allen sechs Messzeitpunkten der RSVT (RSVT<sub>RIR3-1 FKTdetrainiert</sub> + RSVT<sub>RIR3-1 FKTtrainiert</sub>) hin. Das partielle Eta-Quadrat weist darüber hinaus auf einen großen Effekt ( $\eta^2 = 0,240$ ; vgl. Tab. 1) der Nähe zur MVT (RIR3, RIR2 & RIR1) auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) hin.

Da hier allerdings nicht alle Messzeitpunkte, sondern lediglich die Vergleiche von RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> zwischen den unterschiedlichen Trainingszuständen relevant sind, müssen die zugehörigen paarweisen Vergleiche betrachtet werden. Tab. 67 stellt hierzu die relevanten Vergleichspaare (RSVT<sub>RIR3 detrainiert</sub> vs. RSVT<sub>RIR3 trainiert</sub>; RSVT<sub>RIR2 detrainiert</sub> vs. RSVT<sub>RIR2 trainiert</sub>; RSVT<sub>RIR1 detrainiert</sub> vs. RSVT<sub>RIR1 trainiert</sub>) nach Anwendung des post hoc-Tests nach Scheffé dar.

Tab. 67: Paarweise Vergleiche der RMANOVA zwischen den Stichproben FKT<sub>detrainiert</sub> und FKT<sub>trainiert</sub> bei RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> & RSVT<sub>RIR1</sub>

(I) RIR	(J) RIR	Mittelwertdifferenz			95 % Konfidenzintervall für Differenz	
		(I-J)	Std.-Fehler	Sig.	Untergrenze	Obergrenze
RSVT <sub>RIR3 detrainiert</sub>	RSVT <sub>RIR3 trainiert</sub>	5,037	17,607	1,000	-54,482	64,555
RSVT <sub>RIR2 detrainiert</sub>	RSVT <sub>RIR2 trainiert</sub>	-3,921	13,740	1,000	-50,368	42,526
RSVT <sub>RIR1 detrainiert</sub>	RSVT <sub>RIR1 trainiert</sub>	-,390	12,869	1,000	-43,892	43,111

Die paarweisen Vergleiche in Tab. 67 zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Trainingszuständen bei RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> sowie RSVT<sub>RIR1</sub> innerhalb der fitnessorientierten Probandenstichprobe ( $p = 1,000$ ).

Abb. 46 veranschaulicht die gegenübergestellten Verläufe der RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1 innerhalb der fitnessorientierten Probandenstichprobe für beide Trainingszustände (FKT<sub>detrainiert</sub> vs. FKT<sub>trainiert</sub>).

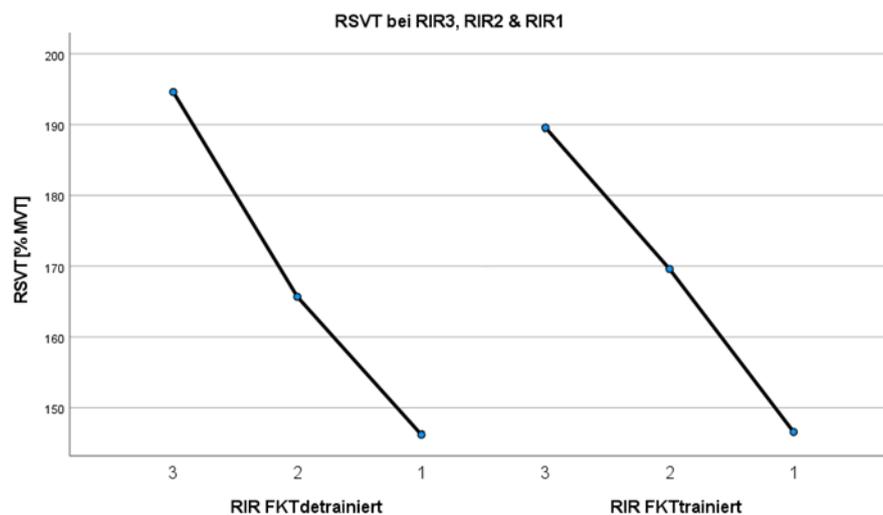


Abb. 46: Vergleich der Verläufe der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) von RIR3 bis RIR1 zwischen den unterschiedlichen Trainingszuständen der Stichprobe FKT

### 5.3.2 Inferenzstatistische Analyse für FKT<sub>trainiert</sub> vs. LKT<sub>trainiert</sub>

Da es sich bei den Stichproben FKT<sub>trainiert</sub> und LKT<sub>trainiert</sub> um unterschiedliche Personen handelt, wurde zur inferenzstatistischen Datenanalyse eine Mixed ANOVA eingesetzt. Dabei wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet, bei der die Ausrichtung des Trainings als Zwischensubjektfaktor angegeben wurde, um die RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1 zwischen den Probandenstichproben mit unterschiedlichen Ausrichtungen des Trainings (RSVT<sub>FKTtrainiert</sub> vs. RSVT<sub>LKTtrainiert</sub>) zu vergleichen. Die Voraussetzung der Normalverteilung wurde als erfüllt angesehen (vgl. Kapitel 5.1).

In Tab. 68 wird der Mauchly-Test auf Sphärizität der RSVT zu den drei betrachteten Messzeitpunkten (RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> & RSVT<sub>RIR1</sub>) der fitness- und leistungsorientiert trainierenden Personen im trainierten Zustand dargestellt.

Tab. 68: Mauchly-Test für RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> & RSVT<sub>RIR1</sub> in den Stichproben FKT<sub>trainiert</sub> und LKT<sub>trainiert</sub>

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres		Sig.	Epsilon		
		Chi-Quadrat	df		Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
RSVT	,865	3,762	2	,152	,881	,973	,500

Das Ergebnis des Mauchly-Tests auf Sphärizität ( $p = 0,152$ ) in Tab. 68 zeigt, dass die Voraussetzung der Sphärizität zur Berechnung von Varianzanalysen mit Messwiederholung als erfüllt angesehen werden kann.

Tab. 69 bildet die Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung zu den Innersubjekteffekten der RSVT in den Probandenstichproben mit unterschiedlicher Ausrichtung des Widerstandstrainings und gleichen Trainingszuständen (FKT<sub>trainiert</sub> und LKT<sub>trainiert</sub>) ab.

Tab. 69: RMANOVA zur Analyse der Innersubjekteffekte: Unterschiede zwischen  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  &  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $FKT_{detrainiert}$

Quelle		Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
RSVT	Sphärizität angenommen	23816,977	2	11908,489	37,197	,000	,579
RSVT * Ausrichtung	Sphärizität angenommen	220,033	2	110,016	,344	,711	,013
Fehler (RSVT)	Sphärizität angenommen	17288,007	54	320,148			

Die Analyse der Innersubjekteffekte der RMANOVA in Tab. 69 zeigt, dass sich die RSVT-Werte signifikant zwischen den Messzeitpunkten (RIR3, RIR2 und RIR1) unterscheiden ( $p < 0,001$ ). Die Betrachtung des partiellen Eta-Quadrats zur Beurteilung der Effektgröße zeigt außerdem einen großen Effekt ( $\eta^2 = 0,579$ ; vgl. Tab. 1) der Nähe zur MVT (RIR3, RIR2 & RIR1) auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT). Es wurden keine signifikanten Interaktionseffekte ( $p = 0,711$ ) zwischen der RSVT und der Ausrichtung des Trainings festgestellt.

Da zur Beantwortung der Forschungsfrage allerdings nicht die Unterschiede der RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1, sondern der Vergleich der RSVT zwischen den beiden Probandenstichproben mit unterschiedlichen Trainingsausrichtungen relevant ist, müssen hierfür die Zwischensubjekteffekte genauer betrachtet werden. Für die Analyse der Zwischensubjekteffekte wurde die Ausrichtung des Widerstandstrainings als Zwischensubjektfaktor der RMANOVA angegeben.

Tab. 70 zeigt den Levene-Test auf Varianzhomogenität zwischen den Gruppen mit unterschiedlichen Ausrichtungen des Widerstandstrainings für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$ .

Tab. 70: Levene-Test auf Varianzhomogenität für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$

		Levene-Statistik	df1	df2	Sig.
RSVT RIR3 [% MVT]	Basiert auf dem Median	,194	1	27	,663
RSVT RIR2 [% MVT]	Basiert auf dem Median	,184	1	27	,671
RSVT RIR1 [% MVT]	Basiert auf dem Median	2,419	1	27	,132

Wie den Ergebnissen des Levene-Tests entnommen werden kann, weisen die berechneten  $p$ -Werte der drei Testkonditionen (RSVT<sub>RIR3</sub>:  $p = 0,663$ ; RSVT<sub>RIR2</sub>:  $p = 0,671$ ; RSVT<sub>RIR1</sub>:  $p = 0,132$ ) darauf hin, dass die Voraussetzung der Varianzhomogenität zwischen den Probandenstichproben mit unterschiedlichen Trainingsausrichtungen als erfüllt angesehen werden kann.

Da die Voraussetzungen zur Berücksichtigung der Trainingsausrichtung als Zwischensubjektfaktor der RMANOVA erfüllt waren, konnten die Unterschiede zwischen fitness- und leistungsorientiert trainierenden Personen bei RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub> anhand der Zwischensubjekteffekte (Tab. 71) analysiert werden.

Tab. 71: RMANOVA zur Analyse der Zwischensubjekteffekte: Unterschiede zwischen fitness- und leistungsorientierten Probanden bei RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> & RSVT<sub>RIR1</sub>

Quelle	Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Konstanter Term	2765789,415	1	2765789,415	854,364	,000	,969
Ausrichtung	28306,405	1	28306,405	8,744	,006	,245
Fehler	87405,776	27	3237,251			

Die in Tab. 71 dargestellten Ergebnisse bestätigen, dass sich die relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten aller Messzeitpunkte (RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub>) zwischen den fitnessorientiert und leistungsorientiert trainierenden Personen im trainierten Zustand signifikant unterscheiden. Die Beurteilung der Effektgröße anhand des partiellen Eta-Quadrats demonstriert einen großen Effekt ( $\eta^2 = 0,245$ ) der Trainingsausrichtung auf die RSVT.

In Abb. 47 werden die Verläufe der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (RSVT) zu den Messzeitpunkten RIR3, RIR2 und RIR1 der fitnessorientierten sowie der leistungsorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand (FKT<sub>trainiert</sub> vs. LKT<sub>trainiert</sub>) grafisch gegenübergestellt.

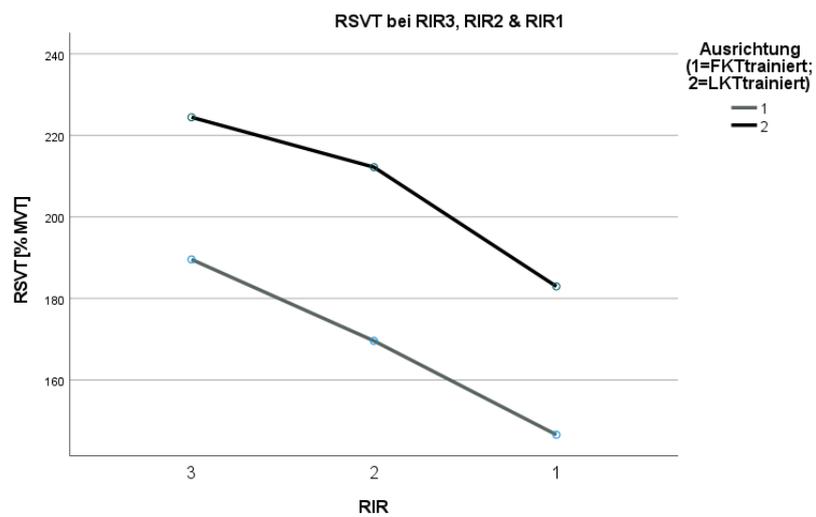


Abb. 47: Vergleich der Verläufe der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) von RIR3 bis RIR1 zwischen den Stichproben FKT<sub>trainiert</sub> und LKT<sub>trainiert</sub>

## 5.4 Ergebnisse der Hauptuntersuchung zu Fragenkomplex 7

Zur inferenzstatistischen Analyse des Zusammenhangs zwischen der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT bei RIR 3-0) und der Anzahl der noch realisierbaren Wiederholungen (RIR 3-0) innerhalb der Probandenstichproben mit gleichem Trainingszustand und gleicher Ausrichtungen des Widerstandstrainings werden sowohl Korrelations- als auch Regressionsanalysen eingesetzt. Hierbei ist RIR0 gleichbedeutend mit der MVT zu verstehen, da es sich bei beiden Angaben um die letzte vollständig ausführbare Wiederholung vor dem Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens handelt.

Da aus Kapitel 5.3 hervorgeht, dass sich die relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten ( $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  &  $RSVT_{RIR1}$ ) zwischen den Probandenstichproben mit verschiedenen Ausrichtungen des Trainings ( $FKT_{trainiert}$  vs.  $LKT_{trainiert}$ ) signifikant unterscheiden und es sich bei den fitnessorientierten Probandenstichproben mit verschiedenen Trainingszuständen ( $FKT_{detrainiert}$  vs.  $FKT_{trainiert}$ ) um die gleiche Personengruppe handelt, werden die Korrelations- und Regressionsanalysen nachfolgend für alle Stichproben getrennt dargestellt.

### 5.4.1 Inferenzstatistische Analyse für FKT<sub>detrainiert</sub>

Da es sich bei den betrachteten Variablen (RSVT & RIR) um metrisch skalierte Variablen handelt, wird die Pearson-Produkt-Moment-Korrelation (Tab. 72) eingesetzt, um die Stärke des linearen Zusammenhangs zwischen der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT bei RIR 3-0) und der Anzahl der noch realisierbaren Wiederholungen (RIR 3-0) innerhalb der fitnessorientierten Probandenstichprobe im detrainierten Zustand (FKT<sub>detrainiert</sub>) zu bestimmen.

Tab. 72: Pearson-Produkt-Moment-Korrelation zwischen RSVT und RIR der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

		RIR	RSVT
RIR	Pearson-Korrelation	1	,675
	Sig. (2-seitig)		,000
	N	76	76
RSVT	Pearson-Korrelation	,675	1
	Sig. (2-seitig)	,000	
	N	76	76

Bei der Pearson-Produkt-Moment-Korrelation wird zur Quantifizierung der Stärke des Zusammenhangs der Korrelationskoeffizient ( $r$ ) berechnet. Tab. 72 zeigt in der fitnessorientierten Probandenstichprobe im detrainierten Zustand (FKT<sub>detrainiert</sub>) einen Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,675$ , welcher besagt, dass ein starker positiver Zusammenhang zwischen der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) und der Anzahl der noch realisierbaren Wiederholungen (RIR) existiert (vgl. Tab. 2).

Da durch korrelative Analysen gefundene Zusammenhänge keine Aussage über die kausale Beziehung zwischen RSVT und RIR ermöglichen, wurde eine bivariate Regressionsanalyse zur inferenzstatistischen Analyse eingesetzt, um kausale Zusammenhänge zwischen den betrachteten Variablen überprüfen zu können. Hierfür wurde die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) als abhängige Variable deklariert, um überprüfen zu können, wie sich diese durch die Nähe zum momentanen konzentrischen Muskelversagen (RIR = unabhängige Variable bzw. Prädiktor) vorhersagen lässt.

Tab. 73 zeigt die deskriptive Statistik der standardisierten und unstandardisierten Residuen in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>.

Tab. 73: Deskriptive Statistik der Residuen in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

		Statistik	Standard Fehler	
Unstandardized Residual	Mittelwert	,000	4,279	
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	-8,524	
		Obergrenze	8,524	
	5 % getrimmtes Mittel	-1,488		
	Median	-6,123		
	Varianz	1391,391		
	Standardabweichung	37,301		
	Minimum	-82,645		
	Maximum	113,545		
	Spannweite	196,190		
	Interquartilbereich	49,126		
	Schiefe	,655	,276	
	Kurtosis	,438	,545	
	Standardized Residual	Mittelwert	,000	,114
95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts		Untergrenze	-,227	
		Obergrenze	,227	
5 % getrimmtes Mittel		-,040		
Median		-,163		
Varianz		,987		
Standardabweichung		,993		
Minimum		-2,201		
Maximum		3,024		
Spannweite		5,224		
Interquartilbereich		1,308		
Schiefe		,655	,276	
Kurtosis		,438	,545	

In Tab. 74 werden die Tests auf Normalverteilung der standardisierten und unstandardisierten Residuen in der fitnessorientierten Probandenstichprobe im detrainierten Zustand abgebildet.

Tab. 74: Tests auf Normalverteilung der Residuen in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Unstandardized Residual	,157	76	,000	,959	76	,015
Standardized Residual	,157	76	,000	,959	76	,015

Die statistische Testung der Normalverteilung der standardisierten und unstandardisierten Residuen anhand des Shapiro-Wilk-Tests (Tab. 74) führt zum Schluss, dass in der Stichprobe  $FKT_{\text{detrainiert}}$  keine Normalverteilung der Residuen angenommen werden kann, da die berechneten  $p$ -Werte ( $p = 0,015$ ) kleiner als  $p = 0,05$  sind.

Als weitere Voraussetzung für bivariate lineare Regressionsanalysen gilt die Homoskedastizität der Residuen, welche in Abb. 48 als Streudiagramm abgebildet werden.

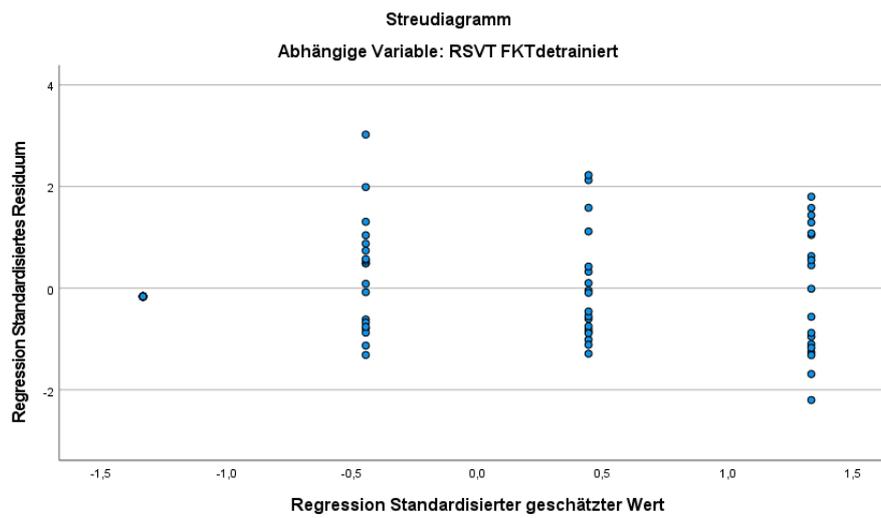


Abb. 48: Streudiagramm der standardisierten Residuen der Stichprobe  $FKT_{\text{detrainiert}}$

Die grafische Beurteilung des Streudiagramms (Abb. 48) ergibt, dass die Voraussetzung homoskedastischer Residuen in der Stichprobe  $FKT_{\text{detrainiert}}$  ebenfalls nicht als erfüllt angesehen werden kann. Die Verletzung der Testvoraussetzungen deutet darauf hin, dass kein linearer Zusammenhang zwischen den betrachteten Variablen existiert.

In der verwendeten Statistiksoftware SPSS können über die Prozedur „Kurvenanpassung“ neben der linearen Regression auch zahlreiche Arten nicht linearer Zusammenhänge analysiert werden, um das Regressionsmodell mit der höchsten Erklärungskraft zu ermitteln (IBM Corporation, 2021), was in der nachfolgenden Tabelle (Tab. 75) dargestellt wird.

Tab. 75: Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

Gleichung	Modellübersicht					Parameterschätzungen			
	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Sig.	Konstante	b1	b2	b3
Linear	,456	61,980	1	74	,000	106,123	30,332		
Logarithmisch	.	.	.	.	.	.	.		
Invers	.	.	.	.	.	.	.		
Quadratisch	,463	31,493	2	73	,000	101,807	43,280	-4,316	
Kubisch	,470	21,253	3	72	,000	100,000	71,586	-31,418	6,023
Zusammengesetzt	,515	78,587	1	74	,000	105,866	1,227		
S	.	.	.	.	.	.	.		
Wachstumsfunktion	,515	78,587	1	74	,000	4,662	,205		
Exponentiell	,515	78,587	1	74	,000	105,866	,205		
Logistisch	,515	78,587	1	74	,000	,009	,815		

Aus dem Vergleich der Regressionsmodelle in Tab. 75 geht hervor, dass in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub> unter anderem das exponentielle Regressionsmodell die höchste Erklärungskraft mit einem Determinationskoeffizienten von  $R^2 = 0,515$  ( $p < 0,001$ ) besitzt. Dieser Wert besagt, dass 51,5 Prozent der Varianzen der RSVT durch die Veränderung der RIR erklärt werden können. Die nachfolgende Abb. 49 stellt die Regressionsmodelle grafisch dar.

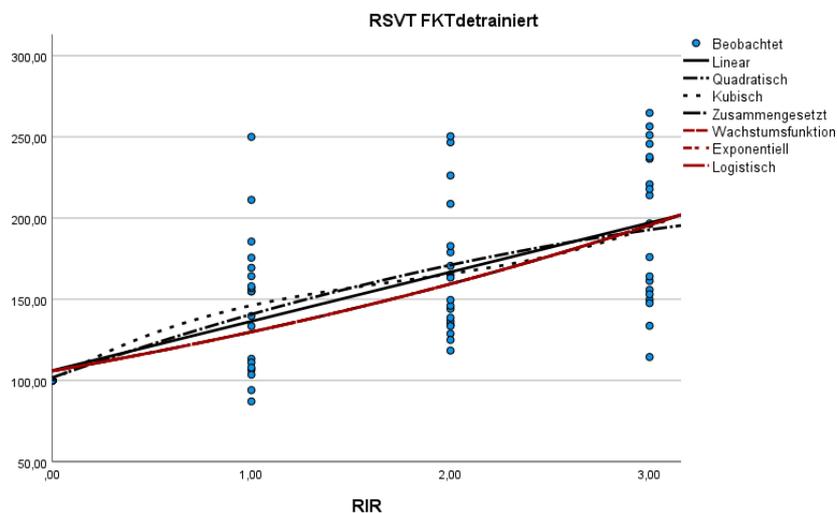


Abb. 49: Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub>

Zur präziseren Eingrenzung der RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1 zu ermöglichen, werden in Tab. 76 die deskriptiven Statistiken inklusive der Konfidenzintervalle für FKT<sub>detrainiert</sub> dargestellt.

Tab. 76: Konfidenzintervalle für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  &  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $FKT_{\text{detrainiert}}$

		Statistik	Standard Fehler	
RSVT RIR3 [% MVT]	Mittelwert	194,610	10,779	
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	171,963	
		Obergrenze	217,256	
	5 % getrimmtes Mittel	195,1650		
	Median	196,711		
	Varianz	2207,648		
	Standardabweichung	46,986		
	Minimum	114,474		
	Maximum	264,754		
	Spannweite	150,280		
	Interquartilbereich	84,578		
RSVT RIR2 [% MVT]	Mittelwert	165,682	9,320	
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	146,101	
		Obergrenze	185,264	
	5 % getrimmtes Mittel	163,601		
	Median	149,593		
	Varianz	1650,504		
	Standardabweichung	40,626		
	Minimum	118,421		
	Maximum	250,400		
	Spannweite	131,979		
	Interquartilbereich	48,354		
RSVT RIR1 [% MVT]	Mittelwert	146,191	9,711	
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	125,789	
		Obergrenze	166,593	
	5 % getrimmtes Mittel	143,706		
	Median	154,861		
	Varianz	1791,750		
	Standardabweichung	42,329		
	Minimum	87,117		
	Maximum	250,000		
	Spannweite	162,883		
	Interquartilbereich	61,517		

### 5.4.2 Inferenzstatistische Analyse für FKT<sub>trainiert</sub>

Auch in der fitnessorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand (FKT<sub>trainiert</sub>) wird die Pearson-Produkt-Moment-Korrelation (Tab. 77) eingesetzt, um die Stärke des linearen Zusammenhangs zwischen der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT bei RIR 3-0) und der Anzahl der noch realisierbaren Wiederholungen (RIR 3-0) zu bestimmen.

Tab. 77: Pearson-Produkt-Moment-Korrelation zwischen RSVT und RIR der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub>

		RIR	RSVT
RIR	Pearson-Korrelation	1	,746
	Sig. (2-seitig)		,000
	N	76	76
RSVT	Pearson-Korrelation	,746	1
	Sig. (2-seitig)	,000	
	N	76	76

Entsprechend des in Tab. 77 abgebildeten Korrelationskoeffizienten ( $r = 0,746$ ) existiert in der fitnessorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand (FKT<sub>trainiert</sub>) ein sehr starker positiver Zusammenhang zwischen der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) und der Anzahl der noch realisierbaren Wiederholungen (RIR). Auch hier wurde eine bivariate Regressionsanalyse zur inferenzstatistischen Analyse eingesetzt, um kausale Zusammenhänge zwischen RSVT und RIR zu überprüfen.

Tab. 78 bildet die deskriptive Statistik der standardisierten und unstandardisierten Residuen in der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub> ab.

Tab. 78: Deskriptive Statistik der Residuen in der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub>

		Statistik	Standard Fehler	
Unstandardized Residual	Mittelwert	,000	3,363	
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	-6,699	
		Obergrenze	6,699	
	5 % getrimmtes Mittel	-,939		
	Median	-7,678		
	Varianz	859,445		
	Standardabweichung	29,316		
	Minimum	-69,308		
	Maximum	83,791		
	Spannweite	153,099		
	Interquartilbereich	21,011		
	Schiefe	,754	,276	
	Kurtosis	1,072	,545	
Standardized Residual	Mittelwert	,000	,114	
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	-,227	
		Obergrenze	,227	
	5 % getrimmtes Mittel	-,0318		
	Median	-,260		
	Varianz	,987		
	Standardabweichung	,993		
	Minimum	-2,348		
	Maximum	2,839		
	Spannweite	5,187		
	Interquartilbereich	,712		
	Schiefe	,754	,276	
	Kurtosis	1,072	,545	

In Tab. 79 werden die Tests auf Normalverteilung der standardisierten und unstandardisierten Residuen in der fitnessorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand abgebildet.

Tab. 79: Tests auf Normalverteilung der Residuen in der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub>

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Unstandardized Residual	,174	76	,000	,915	76	,000
Standardized Residual	,174	76	,000	,915	76	,000

Anhand der Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests (Tab. 79) kann angenommen werden, dass in der Stichprobe  $FKT_{\text{trainiert}}$  keine Normalverteilung der Residuen vorliegt. Die Homoskedastizität der Residuen wird in Abb. 50 als Streudiagramm visualisiert, da diese als weitere Voraussetzung für bivariate lineare Regressionsanalysen gilt.

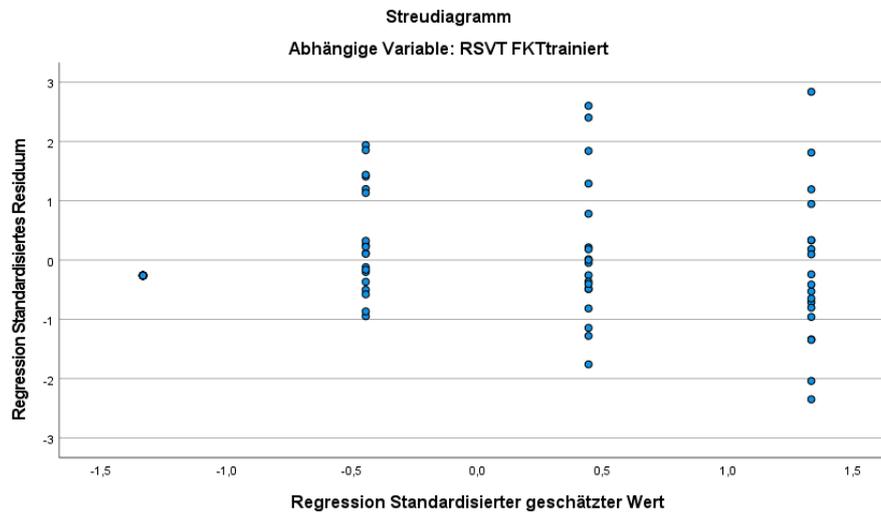


Abb. 50: Streudiagramm der standardisierten Residuen der Stichprobe  $FKT_{\text{trainiert}}$

Nach grafischer Beurteilung des Streudiagramms (Abb. 50) wird die Voraussetzung homoskedastischer Residuen in der Stichprobe  $FKT_{\text{trainiert}}$  als nicht erfüllt definiert.

Da die Testvoraussetzungen verletzt wurden, wird ein nicht linearer Zusammenhang zwischen den betrachteten Variablen vermutet. Aus diesem Grund wurde erneut die Prozedur „Kurvenanpassung“ angewendet, um das nicht lineare Regressionsmodell mit der höchsten Erklärungskraft zu ermitteln (Tab. 80).

Tab. 80: Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) in der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub>

Gleichung	Modellübersicht					Parameterschätzungen			
	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Sig.	Konstante	b1	b2	b3
Linear	,556	92,826	1	74	,000	107,678	29,174		
Logarithmisch	.	.	.	.	.	.	.		
Invers	.	.	.	.	.	.	.		
Quadratisch	,580	50,316	2	73	,000	101,025	49,133	-6,653	
Kubisch	,582	33,461	3	72	,000	100,000	65,196	-22,033	3,418
Zusammengesetzt	,620	120,512	1	74	,000	107,632	1,222		
S	.	.	.	.	.	.	.		
Wachstumsfunktion	,620	120,512	1	74	,000	4,679	,200		
Exponentiell	,620	120,512	1	74	,000	107,632	,200		
Logistisch	,620	120,512	1	74	,000	,009	,818		

Aus dem Vergleich der Regressionsmodelle in Tab. 80 geht hervor, dass in der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub> unter anderem das exponentielle Regressionsmodell die höchste Erklärungskraft mit einem Determinationskoeffizienten von  $R^2 = 0,620$  ( $p < 0,001$ ) besitzt. Dieser Wert besagt, dass durch das exponentielle Modell 62,0 Prozent der Varianzen der RSVT durch die Veränderung der RIR erklärt werden können. Abb. 51 stellt die Regressionsmodelle für grafisch dar.

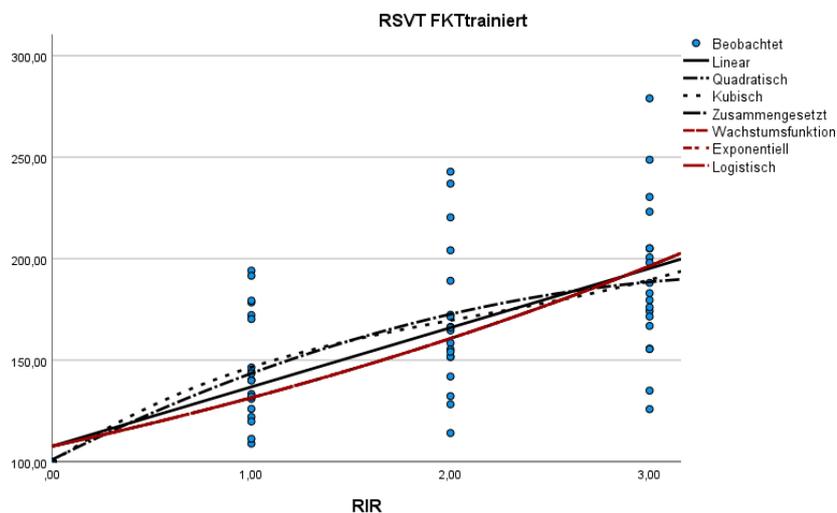


Abb. 51: Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) in der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub>

Tab. 81 bildet die deskriptiven Statistiken inklusive der Konfidenzintervalle in der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub> ab, um eine präzisere Eingrenzung der RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1 zu ermöglichen.

Tab. 81: Konfidenzintervalle für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  &  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $FKT_{trainiert}$

		Statistik	Standard Fehler	
RSVT RIR3 [% MVT]	Mittelwert	189,573	8,670	
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	171,358	
		Obergrenze	207,788	
	5 % getrimmtes Mittel	188,143		
	Median	183,019		
	Varianz	1428,273		
	Standardabweichung	37,793		
	Minimum	125,893		
	Maximum	278,992		
	Spannweite	153,099		
Interquartilbereich	38,276			
RSVT RIR2 [% MVT]	Mittelwert	169,603	8,068	
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	152,653	
		Obergrenze	186,553	
	5 % getrimmtes Mittel	168,616		
	Median	164,655		
	Varianz	1236,728		
	Standardabweichung	35,167		
	Minimum	114,124		
	Maximum	242,857		
	Spannweite	128,733		
Interquartilbereich	37,496			
RSVT RIR1 [% MVT]	Mittelwert	146,581	6,010	
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	133,766	
		Obergrenze	159,396	
	5 % getrimmtes Mittel	146,032		
	Median	140,252		
	Varianz	706,948		
	Standardabweichung	26,588		
	Minimum	108,929		
	Maximum	194,118		
	Spannweite	85,189		
Interquartilbereich	46,181			

### 5.4.3 Inferenzstatistische Analyse für LKT<sub>trainiert</sub>

Wie in den anderen Stichproben auch wurde in der leistungsorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand (LKT<sub>trainiert</sub>) ebenfalls die Pearson-Produkt-Moment-Korrelation (Tab. 82) eingesetzt, um die Stärke des linearen Zusammenhangs zwischen der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT bei RIR 3-0) und der Anzahl der noch realisierbaren Wiederholungen (RIR 3-0) zu bestimmen.

Tab. 82: Pearson-Produkt-Moment-Korrelation zwischen RSVT und RIR der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub>

		RIR	RSVT
RIR	Pearson-Korrelation	1	,766
	Sig. (2-seitig)		,000
	N	40	40
RSVT	Pearson-Korrelation	,766	1
	Sig. (2-seitig)	,000	
	N	40	40

Tab. 82 zeigt als Ergebnis der Pearson-Produkt-Moment-Korrelation einen Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,766$  in der leistungsorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand (LKT<sub>trainiert</sub>). Dieser Wert sagt aus, dass ein sehr starker positiver Zusammenhang zwischen RSVT und RIR besteht.

Um darüber hinaus eine Aussage über kausale Zusammenhänge zwischen RSVT und RIR treffen zu können, wurde auch hier wieder eine Regressionsanalyse durchgeführt.

Tab. 83 zeigt die deskriptive Statistik der standardisierten und unstandardisierten Residuen in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub>.

Tab. 83: Deskriptive Statistik der Residuen in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub>

		Statistik	Standard Fehler	
Unstandardized Residual	Mittelwert	,000	6,054	
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	-12,245	
		Obergrenze	12,245	
	5 % getrimmtes Mittel	,067		
	Median	-10,536		
	Varianz	1466,030		
	Standardabweichung	38,289		
	Minimum	-83,730		
	Maximum	81,023		
	Spannweite	164,753		
	Interquartilbereich	42,032		
	Schiefe	,223	,374	
	Kurtosis	,010	,733	
Standardized Residual	Mittelwert	,000	,156	
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	-,316	
		Obergrenze	,316	
	5 % getrimmtes Mittel	,002		
	Median	-,272		
	Varianz	,974		
	Standardabweichung	,987		
	Minimum	-2,159		
	Maximum	2,089		
	Spannweite	4,247		
	Interquartilbereich	1,084		
	Schiefe	,223	,374	
	Kurtosis	,010	,733	

Die Tests auf Normalverteilung der standardisierten und unstandardisierten Residuen in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub> werden in Tab. 84 abgebildet.

Tab. 84: Tests auf Normalverteilung der Residuen in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub>

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Unstandardized Residual	,145	40	,034	,962	40	,192
Standardized Residual	,145	40	,034	,962	40	,192

Das Ergebnis des Shapiro-Wilk-Tests (Tab. 84;  $p = 0,192$ ) führt zum Schluss, dass eine Normalverteilung der Residuen in der Stichprobe  $LKT_{\text{trainiert}}$  angenommen werden kann.

Abb. 52 stellt die Residuen als Streudiagramm dar, womit die Homoskedastizität der Residuen als weitere Voraussetzung für bivariate lineare Regressionsanalysen beurteilt werden kann.

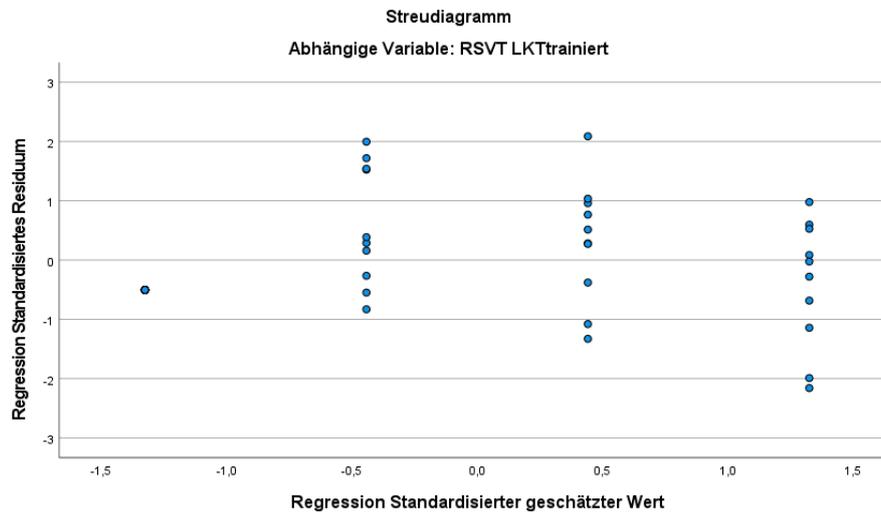


Abb. 52: Streudiagramm der standardisierten Residuen der Stichprobe  $LKT_{\text{trainiert}}$

Nach grafischer Beurteilung des Streudiagramms in Abb. 52 muss die Voraussetzung homoskedastischer Residuen in der Stichprobe  $LKT_{\text{trainiert}}$  als nicht erfüllt angesehen werden, weshalb kein linearer Zusammenhang zwischen den betrachteten Variablen vermutet wird.

In Tab. 85 werden mehrere nicht linearer Regressionsmodelle gezeigt, welche über die Prozedur „Kurvenanpassung“ in SPSS analysiert wurden, um das Regressionsmodell mit der höchsten Erklärungskraft zu ermitteln.

Tab. 85: Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub>

Gleichung	Modellübersicht					Parameterschätzungen			
	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Sig.	Konstante	b1	b2	b3
Linear	,586	53,857	1	38	,000	119,515	40,258		
Logarithmisch	.	.	.	.	.	.	.		
Invers	.	.	.	.	.	.	.		
Quadratisch	,677	38,736	2	37	,000	101,835	93,296	-17,680	
Kubisch	,682	25,694	3	36	,000	100,000	122,051	-45,210	6,118
Zusammengesetzt	,629	64,386	1	38	,000	115,981	1,288		
S	.	.	.	.	.	.	.		
Wachstumsfunktion	,629	64,386	1	38	,000	4,753	,253		
Exponentiell	,629	64,386	1	38	,000	115,981	,253		
Logistisch	,629	64,386	1	38	,000	,009	,777		

Der Vergleich der Regressionsmodelle in Tab. 85 führt zum Schluss, dass in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub> das kubische Regressionsmodell die höchste Erklärungskraft ( $R^2 = 0,682$ ;  $p < 0,001$ ) besitzt. Diesem Wert zufolge können 68,2 Prozent der Varianzen der RSVT durch die Veränderung der RIR anhand des kubischen Modells erklärt werden. Die Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) werden nachfolgend in Abb. 53 grafisch visualisiert.

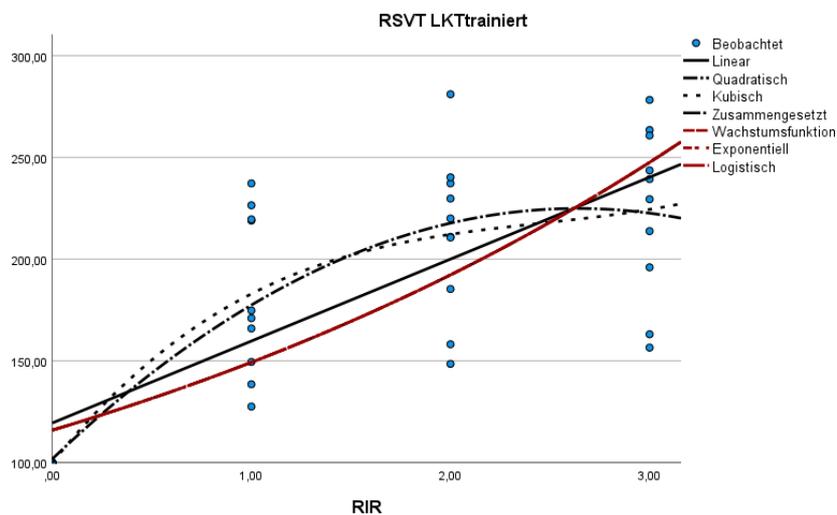


Abb. 53: Regressionsmodelle für RSVT (AV) und RIR (UV) in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub>

In Tab. 86 werden die deskriptiven Statistiken inklusive der Konfidenzintervalle für LKT<sub>trainiert</sub> dargestellt, um eine präzisere Eingrenzung der RSVT bei RIR<sub>3</sub>, RIR<sub>2</sub> und RIR<sub>1</sub> zu ermöglichen.

Tab. 86: Konfidenzintervalle für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  &  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$

		Statistik	Standard Fehler
RSVT RIR3 [% MVT]	Mittelwert	224,443	13,186
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	194,614
		Obergrenze	254,273
	5 % getrimmtes Mittel	225,225	
	Median	234,418	
	Varianz	1738,815	
	Standardabweichung	41,699	
	Minimum	156,557	
	Maximum	278,261	
	Spannweite	121,703	
Interquartilbereich	73,681		
RSVT RIR2 [% MVT]	Mittelwert	212,204	12,569
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	183,772
		Obergrenze	240,636
	5 % getrimmtes Mittel	211,915	
	Median	215,500	
	Varianz	1579,680	
	Standardabweichung	39,745	
	Minimum	148,544	
	Maximum	281,053	
	Spannweite	132,509	
Interquartilbereich	59,438		
RSVT RIR1 [% MVT]	Mittelwert	182,958	12,531
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	154,611
		Obergrenze	211,305
	5 % getrimmtes Mittel	183,019	
	Median	172,891	
	Varianz	1570,248	
	Standardabweichung	39,626	
	Minimum	127,586	
	Maximum	237,234	
	Spannweite	109,648	
Interquartilbereich	74,524		



---

# VI

## Diskussion

---

## 6.1 Ergebniszusammenfassung

Im vorangegangenen Kapitel 5 wurden die Ergebnisse der im Rahmen dieses Promotionsprojektes untersuchten Fragestellungen ausführlich dargestellt. Bevor in den nachfolgenden Kapiteln eine Interpretation dieser Ergebnisse, eine Diskussion der Limitationen der durchgeführten Untersuchung sowie eine abschließende Ableitung anwendungsorientierter Handlungsempfehlungen für die Trainingspraxis vorgenommen werden, soll in diesem Teil der Arbeit zunächst eine Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse abgebildet werden, die im Hinblick auf die Beantwortung der Forschungsfragen relevant sind.

Alle Fragenkomplexe der Hauptuntersuchung verfolgten die übergeordnete Zielsetzung, zu überprüfen, ob sich die Vorgabe einer Relative Stopping Velocity Threshold (RSVT), welche als Vielfaches der MVT in Prozent ausgedrückt wird, dazu eignet, den Grad der intraserialen muskulären Ermüdung bei volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit im Widerstandstraining mit submaximaler Last zu steuern.

Tab. 87 bildet die Mittelwerte der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit der letzten drei realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT ( $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  &  $RSVT_{RIR1}$ ) sowie der absoluten Geschwindigkeit an der MVT ab, welche in den untersuchten Probandenstichproben ( $FKT_{detrainiert}$ ,  $FKT_{trainiert}$  &  $LKT_{trainiert}$ ) während der Ausführung eines ausbelastenden Trainingssatzes der Übung Bankdrücken mit der Langhantel bei einer Belastungsintensität von 75 % 1-RM mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit beobachtet wurden.

Tab. 87: Mittelwerte für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$ ,  $RSVT_{RIR1}$  & MVT in den Probandenstichproben  $FKT_{detrainiert}$ ,  $FKT_{trainiert}$  &  $LKT_{trainiert}$

	RSVT RIR3 [% MVT]	RSVT RIR2 [% MVT]	RSVT RIR1 [% MVT]	MVT [m/s]
$FKT_{detrainiert}$	194,61 ± 46,99	165,68 ± 40,63	146,19 ± 42,33	,15 ± ,03
$FKT_{trainiert}$	189,57 ± 37,79	169,60 ± 35,17	146,58 ± 26,59	,13 ± ,03
$LKT_{trainiert}$	224,44 ± 41,70	212,20 ± 39,75	182,96 ± 39,67	,10 ± ,01

**Fragenkomplex 5** zielte darauf ab, zu überprüfen, ob ein Unterschied zwischen den relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten der letzten drei realisierbaren Wiederholungen vor Erreichen der MVT (RSVT bei RIR 3-1) in einem ausbelastenden Widerstandstraining mit submaximalen Lasten und volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit innerhalb der betrachteten Probandenstichproben besteht.

In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 88) werden die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche von  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  innerhalb der Probandenstichproben  $FKT_{detrainiert}$ ,  $FKT_{trainiert}$  und  $LKT_{trainiert}$  dargestellt.

Tab. 88: Ergebniszusammenfassung für Fragenkomplex 5 ( $FKT_{detrainiert}$ ,  $FKT_{trainiert}$  &  $LKT_{trainiert}$ )

		$FKT_{detrainiert}$	$FKT_{trainiert}$	$LKT_{trainiert}$
		Sig.	Sig.	Sig.
$RSVT_{RIR3}$	$RSVT_{RIR2}$	,050	,006	,637
	$RSVT_{RIR1}$	,000	,000	,010
$RSVT_{RIR2}$	$RSVT_{RIR3}$	,050	,006	,637
	$RSVT_{RIR1}$	,051	,000	,012
$RSVT_{RIR1}$	$RSVT_{RIR3}$	,000	,000	,010
	$RSVT_{RIR2}$	,051	,000	,012

In der fitnessorientierten Probandenstichprobe im detrainierten Zustand ( $FKT_{detrainiert}$ ) konnte ein signifikanter Unterschied zwischen  $RSVT_{RIR3}$  und  $RSVT_{RIR1}$  ( $p < 0,001$ ) beobachtet werden. Zwischen  $RSVT_{RIR3}$  und  $RSVT_{RIR2}$  ( $p = 0,05$ ) sowie zwischen  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  ( $p = 0,051$ ) wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Aufgrund der signifikanten übergeordneten Innersubjekteffekte ( $p < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,428$ ) kann insgesamt trotzdem ein großer Effekt von RIR auf RSVT angenommen werden.

Bei der erneuten Testung derselben fitnessorientierten Personengruppe im trainierten Zustand ( $FKT_{trainiert}$ ) konnte beobachtet werden, dass sich  $RSVT_{RIR3}$  und  $RSVT_{RIR1}$  ( $p = 0,006$ ),  $RSVT_{RIR3}$  und  $RSVT_{RIR2}$  ( $p < 0,001$ ) sowie  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  ( $p < 0,001$ ) signifikant unterscheiden. Die Betrachtung der übergeordneten Innersubjekteffekte zeigte einen großen Effekt von RIR auf RSVT ( $p < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,644$ ).

Die Untersuchung der leistungsorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand hatte zum Ergebnis, dass zwischen  $RSVT_{RIR3}$  und  $RSVT_{RIR2}$  ( $p = 0,637$ ) kein signifikanter Unterschied besteht. Demgegenüber konnten bei Betrachtung der Vergleiche von  $RSVT_{RIR3}$  und  $RSVT_{RIR1}$  ( $p = 0,01$ ) sowie von  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  ( $p = 0,012$ ) signifikante Unterschiede festgestellt werden. Die übergeordneten Innersubjekteffekte zeigten auch hier einen großen Effekt ( $p = 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,545$ ) von RIR auf RSVT.

**Fragenkomplex 6** verfolgte das Ziel, herauszufinden, ob sich die RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1 in einem ausbelastenden Widerstandstraining mit submaximalen Lasten und volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit zwischen den betrachteten Probandenstichproben unterscheidet.

Tab. 89 fasst hierzu die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche von  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  der fitnessorientierten Probandenstichprobe im detrainierten Zustand ( $FKT_{detrainiert}$ ) mit derselben Personengruppe im trainierten Zustand ( $FKT_{trainiert}$ ) zusammen.

Die Mittelwertvergleiche von  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  sowie  $RSVT_{RIR1}$  der beiden Probandenstichproben im trainierten Zustand ( $FKT_{trainiert}$  vs.  $LKT_{trainiert}$ ) wurden unter Berücksichtigung der Trainingsausrichtung als Zwischensubjektfaktor untersucht und in der nachfolgenden Tab. 90 zusammengefasst.

Tab. 89: Ergebniszusammenfassung für Fragenkomplex 6 ( $FKT_{detrainiert}$  vs.  $FKT_{trainiert}$ )

		Sig.
$RSVT_{RIR3}$ detrainiert	$RSVT_{RIR3}$ trainiert	1,000
$RSVT_{RIR2}$ detrainiert	$RSVT_{RIR2}$ trainiert	1,000
$RSVT_{RIR1}$ detrainiert	$RSVT_{RIR1}$ trainiert	1,000

Tab. 90: Ergebniszusammenfassung für Fragenkomplex 6 (FKT<sub>trainiert</sub> vs. LKT<sub>trainiert</sub>)

	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Ausrichtung (FKT <sub>trainiert</sub> vs. LKT <sub>trainiert</sub> )	,006	,245

Anhand der paarweisen Vergleiche von RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> sowie RSVT<sub>RIR1</sub> konnten keine signifikanten Unterschiede ( $p = 1,000$ ) zwischen den unterschiedlichen Trainingszuständen der fitnessorientierten Probandenstichprobe (FKT<sub>detrainiert</sub> vs. FKT<sub>trainiert</sub>) ermittelt werden.

Die Betrachtung des Zwischensubjektfaktors zeigte hinsichtlich der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten aller Messzeitpunkte (RSVT<sub>RIR3</sub>, RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub>) jedoch einen signifikanten Unterschied ( $p = 0,006$ ) zwischen den fitnessorientiert und leistungsorientiert trainierenden Personen im trainierten Zustand ( $\eta^2 = 0,245$ ).

**Fragenkomplex 7** befasste sich damit, den Zusammenhang der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) und der Anzahl der noch realisierbaren Wiederholungen (RIR 3-0) innerhalb der Probandenstichproben zu untersuchen.

In Tab. 91 wird die Ergebniszusammenfassung der Korrelationsanalysen für RSVT und RIR der letzten vier vollständig ausführbaren Wiederholungen vor dem Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens in den Probandenstichproben FKT<sub>detrainiert</sub>, FKT<sub>trainiert</sub> und LKT<sub>trainiert</sub> abgebildet.

Um die kausalen Zusammenhänge zwischen RSVT (AV) und RIR (UV) quantifizieren zu können, wurden darüber hinaus Regressionsanalysen durchgeführt. Die Regressionsmodelle mit der jeweils höchsten Erklärungskraft werden in Tab. 92 für alle Probandenstichproben dargestellt.

Tab. 91: Ergebniszusammenfassung für Fragenkomplex 7 (FKT<sub>detrainiert</sub>, FKT<sub>trainiert</sub> & LKT<sub>trainiert</sub>) - Korrelation

	FKT <sub>detrainiert</sub>	FKT <sub>trainiert</sub>	LKT <sub>trainiert</sub>
Pearson-Korrelation (RSVT; RIR)	,675	,746	,766
Sig. (2-seitig)	,000	,000	,000

Tab. 92: Ergebniszusammenfassung für Fragenkomplex 7 (FKT<sub>detrainiert</sub>, FKT<sub>trainiert</sub> & LKT<sub>trainiert</sub>) - Regression

Modell	FKT <sub>detrainiert</sub>		FKT <sub>trainiert</sub>		LKT <sub>trainiert</sub>	
	R <sup>2</sup>	Sig.	R <sup>2</sup>	Sig.	R <sup>2</sup>	Sig.
Kubisch					,682	,000
Exponentiell	,515	,000	,620	,000		

In der Probandenstichprobe FKT<sub>detrainiert</sub> wurde ein starker positiver Zusammenhang ( $r = 0,675$ ) zwischen RSVT und RIR beobachtet. Darüber hinaus konnte ermittelt werden, dass das exponentielle Regressionsmodell ( $R^2 = 0,515$ ;  $p < 0,001$ ) 51,5 Prozent der Varianzen der RSVT durch die Veränderung der RIR erklären kann.

Die Betrachtung der Probandenstichprobe FKT<sub>trainiert</sub> ergab, dass ein sehr starker positiver Zusammenhang ( $r = 0,746$ ) zwischen RSVT und RIR existiert. Aus dem Vergleich der Regressionsmodelle ging hervor, dass unter anderem das exponentielle Regressionsmodell die höchste Erklärungskraft ( $R^2 = 0,620$ ;  $p < 0,001$ ) besitzt, welches 62,0 Prozent der Varianzen der RSVT durch die Veränderung der RIR aufklären kann.

In der leistungsorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand (LKT<sub>trainiert</sub>) wurde ein sehr starker positiver Zusammenhang ( $r = 0,766$ ) zwischen RSVT und RIR entdeckt. Die Auswertung der betrachteten Regressionsmodelle führte zum Schluss, dass anhand eines kubischen Regressionsmodells ( $R^2 = 0,682$ ;  $p < 0,001$ ) 68,2 Prozent der Varianzen der RSVT durch die Veränderung der RIR aufgeklärt werden können.

## 6.2 Ergebnisdiskussion

Nachdem die Ergebnisse der Hauptuntersuchungen vorangehend kompakt und übersichtlich zusammengefasst wurden, soll sich die in diesem Kapitel dargestellte Ergebnisdiskussion mit der Interpretation der Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf die übergeordnete Zielsetzung dieses Promotionsprojektes sowie mit der Einordnung der Erkenntnisse in den gegenwärtigen Kenntnisstand der Trainingswissenschaft befassen.

Die geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung im Widerstandstraining, das sogenannte Velocity Based Training, verwendet die volitional maximale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit gegen den Lastwiderstand sowie deren ermüdungsbedingte intraserielle Reduktion, um den Grad der neuromuskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes objektiv abzubilden (Morán-Navarro et al., 2019). Die bis dato in diesem Kontext dominierende Vorgehensweise nutzt sogenannte Velocity Loss Thresholds, mit denen der angestrebte Grad der muskulären Ermüdung anhand der prozentualen Geschwindigkeitsreduktion in Relation zur volitional maximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit zu Beginn des Trainingssatzes vorgegeben wird (Jukic, Castilla et al., 2023; Weakley et al., 2020; Weakley et al., 2021; vgl. Kapitel 2.3.2).

Dieser Ansatz der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung ist aufgrund der aufgezeigten Abhängigkeit von der volitional maximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit allerdings nicht anwendbar, wenn man sich im Widerstandstraining bewusst mit submaximaler Geschwindigkeit bewegt (Zhao et al., 2022; Zhao et al., 2023).

Aufgrund dieser übergeordneten Problemstellung sowie der in Kapitel 3.1 detailliert aufgezeigten weiteren Schwachstellen des geschwindigkeitsbasierten Ansatzes zur Belastungssteuerung anhand des prozentualen Geschwindigkeitsverlustes wurde die sogenannte Minimum Velocity Threshold (MVT) als vielversprechender Ausgangspunkt für einen adaptierten Ansatz zur objektiven Steuerung der intraseriellen Beanspruchung identifiziert, der nicht von der Bewegungsausführung mit volitional maximaler konzentrischer Geschwindigkeit abhängig ist. Die MVT kennzeichnet die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der letzten vollständig ausführbaren Wiederholung vor dem momentanen konzentrischen Muskelversagen (Caven et al., 2020; Fernandes et al., 2021; Weakley et al., 2021).

Basierend auf den zuvor dargestellten Überlegungen wurde eine zentrale Forschungsfrage formuliert, die zur Vergegenwärtigung der grundsätzlichen Intention dieser Untersuchung nachfolgend erneut dargestellt wird:

*Eignet sich die Minimum Velocity Threshold (MVT) als Ausgangspunkt zur Entwicklung eines adaptierten Ansatzes der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining, bei dem der Grad der muskulären Ermüdung über die Belastungsdauer, unabhängig von der volitional maximalen Bewegungsgeschwindigkeit, gesteuert werden kann?*

Gemäß der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung determiniert das Ausmaß des willkürlich erzeugten Krafteinsatzes die Höhe der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit bei der Übungsausführung im Widerstandstraining (Alcazar et al., 2019; Cuevas-Aburto et al., 2018; Helms et al., 2017). Bei wiederholter Bewegungsausführung innerhalb eines Trainingssatzes äußert sich die zunehmende muskuläre Ermüdung durch eine subsequente Reduktion der realisierbaren Kraftleistung (Cè et al., 2020; Tornero-Aguilera et al., 2022; Zajac et al., 2015). Die intraserielle ermüdungsbedingte Reduktion der Kraftleistung kann folglich als Verringerung der Durchschnittsgeschwindigkeit der konzentrischen Bewegung beobachtet und zur beanspruchungsorientierten Steuerung der Belastungsdauer im Widerstandstraining verwendet werden (Izquierdo et al., 2006; Morán-Navarro et al., 2019).

Wie aus der zuvor erwähnten Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung abgeleitet werden kann, ist der erforderliche Krafteinsatz zu Beginn eines Trainingssatzes mit submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeiten ebenfalls submaximal. Hinsichtlich der beobachteten konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten äußert sich dies darin, dass die Wiederholungen zu Beginn eines Trainingssatzes keine Reduktion der Bewegungsgeschwindigkeit aufweisen, bis die akkumulierte Ermüdung durch wiederholte Bewegungsausführung die Fähigkeit zur Krafterzeugung so stark verringert hat, dass die Bewegungsgeschwindigkeit nicht mehr willkürlich gesteuert werden kann.

Demzufolge lässt sich die muskuläre Ermüdung auch im Widerstandstraining mit volitional submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten durch die Reduktion der konzentrischen Durchschnittsgeschwindigkeit erfassen, wobei dies im Gegensatz zum Widerstandstraining mit

volitional maximalen Bewegungsgeschwindigkeiten allerdings erst bei ausreichend starker intraserieller Ermüdung am Ende eines Trainingssatzes möglich wird.

Da die MVT den absoluten Endpunkt der intraseriellen Geschwindigkeitsreduktion abbildet, wurde ein theoretischer Ansatz zur Steuerung der neuromuskulären Beanspruchung im Widerstandstraining entwickelt, der auf der Annäherung der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten an die MVT basiert und dadurch auch im Widerstandstraining mit volitional submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten angewendet werden könnte.

Um die Steuerung des Grades der intraseriellen muskulären Ermüdung nach diesem Ansatz zu ermöglichen, wurde die konzentrische Durchschnittsgeschwindigkeit der betrachteten Wiederholungen in Relation zur MVT gesetzt, wodurch eine relative Abbruchgeschwindigkeit als interindividuell gültige Zielgröße der intraseriellen muskulären Beanspruchung angegeben werden konnte. Diese Zielgröße wurde im Rahmen dieser Untersuchung als „Relative Stopping Velocity Threshold“ (RSVT) definiert, die sich als Vielfaches der individuellen übungsspezifischen MVT in Prozent (z. B. RSVT = 150 %) ausdrückt.

Die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) wurde als zentraler Steuerungsparameter des in dieser Dissertation untersuchten adaptierten Ansatzes zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining definiert. Um eine präzise Steuerung der intraseriellen muskulären Beanspruchung anhand der RSVT gewährleisten zu können, sollte den letzten Wiederholungen (RIR 3-1) vor Erreichen der MVT jeweils ein möglichst eindeutiger Wert der RSVT zugeordnet werden können.

Da die MVT selbst stellvertretend für die durchschnittliche konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (MV) der letzten vollständig ausführbaren Wiederholung eines ausbelastenden Satzes im Widerstandstraining steht, stellt der Wert von RSVT bei RIR3 die MV der viertletzten Wiederholung, die RSVT bei RIR2 die MV der drittletzten Wiederholung und die RSVT bei RIR1 die MV der vorletzten Wiederholung eines ausbelastenden Satzes im Widerstandstraining mit submaximaler Intensität (75 % 1-RM) und volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit bei der Übung Bankdrücken mit der Langhantel dar. Der Umstand, dass die letzten vier Wiederholungen vor Erreichen des Punktes des momentanen konzentrischen Muskelversagens in der vorliegenden Untersuchung betrachtet wurden, ist darauf begründet, dass dieses Ausmaß der muskulären Beanspruchung unter Berücksichtigung

des aktuellen trainingswissenschaftlichen Kenntnisstandes im Kontext des Widerstandstrainings zur Vergrößerung der Skelettmuskelmasse von besonderer Relevanz ist (Helms et al., 2017; Krzysztofik et al., 2019).

Um zu überprüfen, ob eine klare Abgrenzung der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten zwischen den letzten Wiederholungen eines ausbelastenden Trainingssatzes besteht, wurde in Übereinstimmung mit dem in Kapitel 3.2.2 dargestellten Fragenkomplex 5 dieses Promotionsprojektes untersucht, ob sich die RSVT bei RIR 3-1 innerhalb der betrachteten Probandenstichproben voneinander unterscheiden.

Die inferenzstatistischen Analysen der Ergebnisse zur Untersuchung von Fragenkomplex 5 zeigen in allen betrachteten Probandenstichproben bei den letzten drei Wiederholungen vor Erreichen der MVT einen großen Effekt ( $F_{KT_{\text{detrainiert}}}: \eta^2 = 0,428$ ;  $F_{KT_{\text{trainiert}}}: \eta^2 = 0,644$ ;  $L_{KT_{\text{trainiert}}}: \eta^2 = 0,545$ ) der Annäherung an das momentane konzentrische Muskelversagen (RIR) auf das Ausmaß der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT). Daraus kann geschlossen werden, dass die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit zwischen der viertletzten und vorletzten Wiederholung eines ausbelastenden Trainingssatzes bei der Übung Bankdrücken mit der Langhantel in signifikantem Ausmaß abnimmt.

Da die hier erläuterten Ergebnisse während der Untersuchung maximal ausbelastender Testsätze erhoben wurden, bei denen die Testsätze mit einer volitional submaximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit begonnen wurden, kann auf Basis der genannten Ergebnisse angenommen werden, dass die durchschnittliche konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit ab einem gewissen Ausmaß der Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens aufgrund der fortschreitenden muskulären Ermüdung nicht mehr willkürlich gesteuert werden kann und dementsprechend als Indikator der muskulären Ermüdung gilt.

Diese Erkenntnis dient als erstes Indiz dafür, dass sich die RSVT grundsätzlich als zentraler Parameter zur Steuerung der intraseriellen muskulären Beanspruchung im Sinne des adaptierten Ansatzes zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining mit submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten eignet.

### 6.2.1 Interpretation der Untersuchungsergebnisse zu Fragenkomplex 5

Da eine Betrachtung der übergeordneten Innersubjekteffekte jedoch keine genauen Rückschlüsse darüber zulässt, wie präzise die Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens anhand der RSVT gesteuert werden kann, wurden hierfür zusätzlich die relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten von RIR3, RIR2 und RIR1 paarweise miteinander verglichen. Dadurch sollte untersucht werden, ob sich einer definierten Annäherung an das Muskelversagen (RIR) ein konkreter Wert oder zumindest ein Wertebereich der RSVT zuordnen lässt, was als Voraussetzung dafür gilt, dass die Vorgabe der RSVT zur präzisen Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung herangezogen werden kann.

Wie in den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 54; Abb. 55 & Abb. 56) zur erleichterten Übersicht nochmals grafisch visualisiert wird, konnte nicht in allen untersuchten Probandenstichproben ein signifikanter Unterschied zwischen den relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten bei RIR 3, RIR 2 und RIR 1 festgestellt werden.

Für fitness- und gesundheitsorientiert trainierende Personen im detrainierten Zustand wurden weder zwischen RIR3 und RIR2 noch zwischen RIR2 und RIR1 signifikante Unterschiede der RSVT festgestellt (vgl. Abb. 54), weshalb sich die RSVT in dieser Stichprobe nicht zur präzisen Steuerung der muskulären Ermüdung im Sinne einer konkreten Nähe zum momentanen konzentrischen Muskelversagen zu eignen scheint.

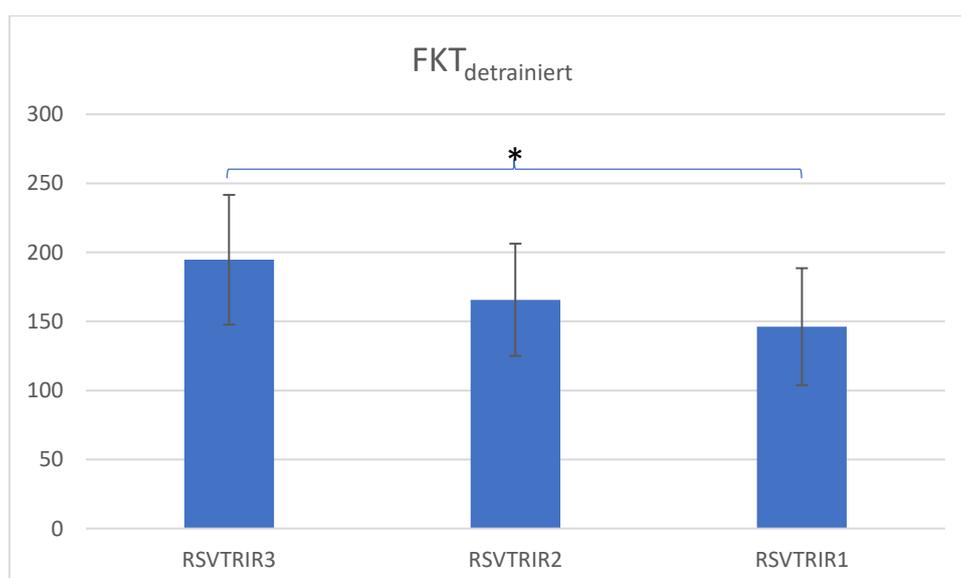


Abb. 54: RSVT [% MVT] bei RIR3, RIR2 und RIR1 in der Stichprobe FKT<sub>detrainiert</sub> (\* =  $p < 0,05$ )

Da die Überschreitung des Signifikanzniveaus bei den Mittelwertvergleichen von RIR3 und RIR2 sowie RIR2 und RIR1 sehr gering war ( $p = 0,05$  bzw.  $p = 0,051$ ), muss diese Schlussfolgerung unter Berücksichtigung der signifikanten übergeordneten Innersubjekteffekte jedoch kritisch betrachtet werden, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich die Unterschiede der RSVT bei RIR3 und RIR2 sowie RIR2 und RIR 1 in einer größeren Probandenstichprobe als signifikant erweisen. Nichtsdestotrotz zeigt die Stichprobe  $FKT_{\text{detrainiert}}$  von allen betrachteten Probandenstichproben die größten Varianzen für die Werte der RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1 (vgl. Tab. 43), was möglicherweise dadurch begründet werden kann, dass sich aufgrund der mehrmonatigen Unterbrechung der regelmäßigen Ausführung der Testübung mit höheren Intensitäten bewegungstechnische Defizite manifestiert haben, die sich bei fortschreitender muskulärer Ermüdung in einer höheren Varianz der Bewegungseffizienz äußern.

Diese Theorie zum potenziellen Einfluss des Trainingszustandes auf die Bewegungseffizienz wird zusätzlich dadurch bekräftigt, dass in der Probandenstichprobe  $FKT_{\text{detrainiert}}$  von allen betrachteten Stichproben auch die höchste MVT ( $MVT_{FKT_{\text{detrainiert}}} = 0,15 \text{ m/s}$ ) gemessen wurde (vgl. Tab. 35). Diese Vermutung lässt sich unter anderem auf die Ergebnisse einer Untersuchung von Cortes, Onate und Morrison (2014) zurückführen, in der eine erhöhte Variabilität von Bewegungen im ermüdeten Zustand festgestellt wurde. Die Studie stellte neben einer Reduktion der Kraftleistung fest, dass die Fähigkeit der Probanden zur flüssigen und kontrollierten Bewegungsausführung im ermüdeten Zustand ebenfalls limitiert waren.

Die inferenzstatistische Analyse der Unterschiede zwischen den RSVT-Werten bei RIR3, RIR2 und RIR1 in derselben fitness- und gesundheitsorientierten Probandenstichprobe nach mindestens sechsmonatiger Wiederaufnahme des regelmäßigen Krafttrainings mit höheren Belastungsintensitäten ( $FKT_{\text{trainiert}}$ ) zeigte ebenso wie  $FKT_{\text{detrainiert}}$  eine signifikante Reduktion der durchschnittlichen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten.

Allerdings konnten im Gegensatz zu  $FKT_{\text{detrainiert}}$  für dieselben Personen im trainierten Zustand neben dem Vergleich der RSVT zwischen RIR3 und RIR1 ( $p < 0,001$ ) auch signifikante Unterschiede der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit zwischen RIR3 und RIR2 ( $p = 0,006$ ) sowie zwischen RIR2 und RIR1 ( $p < 0,001$ ) nachgewiesen werden (vgl. Abb. 55).

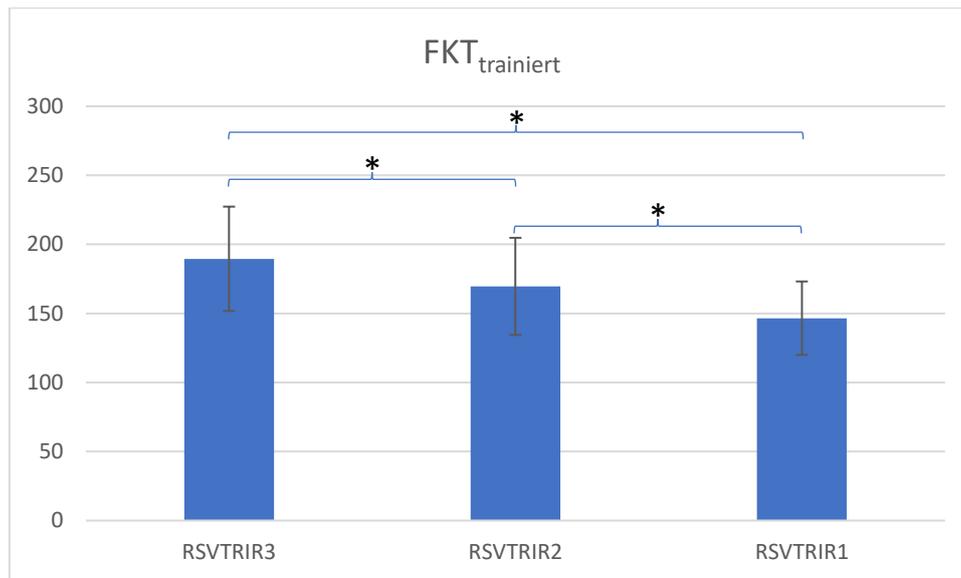


Abb. 55: RSVT [% MVT] bei RIR3, RIR2 und RIR1 in der Stichprobe FKT<sub>trainiert</sub> (\* =  $p < 0,05$ )

Diese Ergebnisse können unter Berücksichtigung des Hintergrundes zu Fragenkomplex 5 dahingehend interpretiert werden, dass bei fitness- und gesundheitsorientierten Personen im trainierten Zustand eine exakte Zuordnung von RSVT-Wertebereichen zu einer bestimmten Nähe zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens möglich ist. Auf dieser Erkenntnis fußt die Schlussfolgerung, dass sich die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit im Kontext des adaptierten Ansatzes zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung dazu eignet, das Ausmaß der intraseriellen muskulären Ermüdung bei trainierten Personen mit fitness- und gesundheitsorientierter Ausrichtung mit einer hohen Präzision zu steuern.

Dass die Unterschiede der RSVT zwischen RIR3, RIR2 und RIR1 bei der fitness- und gesundheitsorientierten Probandenstichprobe nach mehrmonatiger Wiederaufnahme des Trainings nun signifikant sind, spricht in Kombination mit der geringeren Varianz der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (Tab. 48) außerdem für die Annahme der zuvor geäußerten Theorie, dass die bei FKT<sub>detrainiert</sub> festgestellte fehlende Signifikanz der Unterschiede durch den Trainingszustand begründet werden kann.

Die leistungsorientiert trainierende Probandenstichprobe im trainierten Zustand zeigte ebenso wie die beiden zuvor thematisierten Probandenstichproben mit fitness- und gesundheitsorientierter Ausrichtung einen signifikanten Unterschied ( $p = 0,01$ ) zwischen der RSVT der drittletzten (RIR3) und der letzten (RIR1) Wiederholung vor Erreichen der MVT.

Während in dieser Stichprobe für die RSVT bei RIR3 und RIR2 kein signifikanter Unterschied ( $p = 0,637$ ) festgestellt werden konnte, unterschied sich die RSVT zwischen RIR2 und RIR1 signifikant ( $p = 0,012$ ; vgl. Abb. 56).

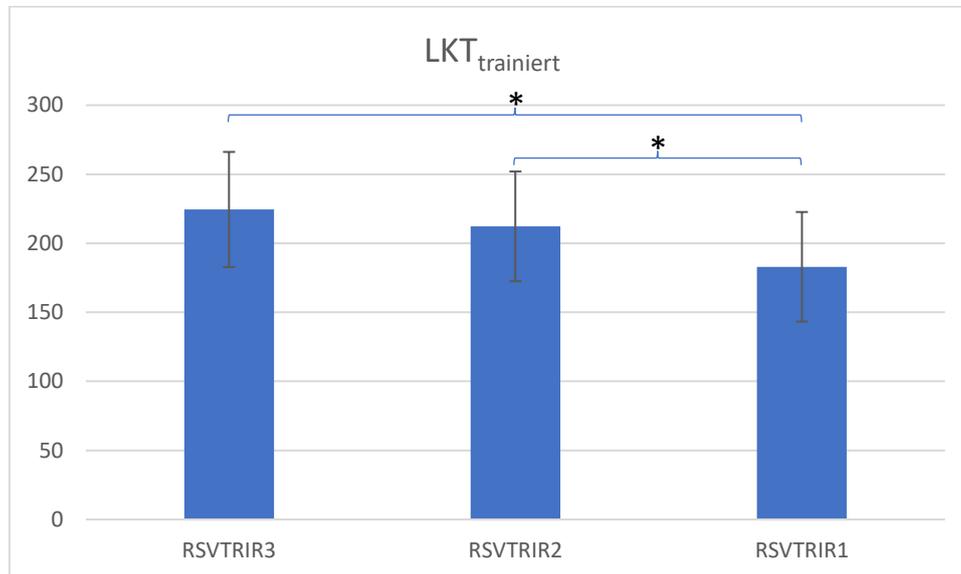


Abb. 56: RSVT [% MVT] bei RIR3, RIR2 und RIR1 in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub> (\* =  $p < 0,05$ )

Bezugnehmend auf die übergeordnete Fragestellung dieser Untersuchung können die Ergebnisse für das leistungsorientiert trainierende Personenkollektiv dahingehend interpretiert werden, dass nur die letzten beiden Wiederholungen vor Erreichen der MVT präzise mit dem hier vorgestellten adaptierten Ansatz zu geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung präzise anhand der Vorgabe einer RSVT (RSVT<sub>RIR2</sub> und RSVT<sub>RIR1</sub>) gesteuert werden können.

Ein möglicher Erklärungsansatz für den nicht signifikanten Unterschied der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit zwischen RIR3 und RIR2 könnte das SAID-Prinzip (engl.: „specific adaption to imposed demand“) liefern, welches besagt, dass die größten Anpassungseffekte des Organismus spezifisch zur im Training erzeugten Beanspruchungssituation auftreten (Sale & MacDougall, 1981; Stone, Hornsby, Suarez, Duca & Pierce, 2022). Da leistungsorientierte Kraftsportler üblicherweise mit höheren Beanspruchungsgraden trainieren als fitness- und gesundheitsorientierte Sportler (Steele et al., 2022), kann angenommen werden, dass die Probanden der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub> spezifischer auf die bei der Datenerhebung verwendeten maximal ausbelastenden Testsätze mit 75 % 1-RM konditioniert sind als die Probanden der fitness- und gesundheitsorientierten Stichprobe. Aus

diesem Grund ist es theoretisch denkbar, dass leistungsorientierte Kraftsportler durch eine effizientere bzw. technisch konsistentere Bewegungsausführung im ermüdeten Zustand beim Training mit volitional submaximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten ebendiese Geschwindigkeit bis zu einer stärkeren Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens aufrechterhalten können, bevor es zu einem signifikanten Abfall der Geschwindigkeit kommt.

Als weiteres Indiz für einen potenziellen Einfluss der Trainingsausrichtung auf die spezifischen Anpassungsprozesse kann die Betrachtung der realisierten Wiederholungszahlen (vgl. Tab. 42, Tab. 47 & Tab. 52) sowie der Relativkraftleistung dienen. Hierbei wurde hinsichtlich der Belastungsdauer festgestellt, dass in den Testsätzen der Stichprobe  $LKT_{\text{trainiert}}$  weniger Wiederholungen ( $\bar{\varnothing} = 7,90$ ) bis zum Muskelversagen ausgeführt wurden als in den Stichproben  $FKT_{\text{detrainiert}}$  ( $\bar{\varnothing} = 9,89$ ) und  $FKT_{\text{trainiert}}$  ( $\bar{\varnothing} = 9,79$ ). In Bezug auf die Relativkraftleistung, ausgedrückt als Quotient aus dem 1-RM (kg) und dem Körpergewicht (kg), wurden bei der leistungsorientierten Probandenstichprobe höhere relative Kraftwerte (1,41 kg/kg) als bei der fitnessorientierten Stichprobe im trainierten Zustand (0,94 kg/kg) und der fitnessorientierten Stichprobe im detrainierten Zustand (0,91 kg/kg) festgestellt. Diese Beobachtungen können als Indiz dafür gewertet werden, dass die leistungsorientierten Kraftsportler aufgrund ihrer spezifischen Trainingsgestaltung nicht nur höhere Beanspruchungen gewohnt sind, sondern darüber hinaus darauf konditioniert sind, höhere relative sowie absolute Lasten über eine geringere Anzahl an Wiederholungen zu bewegen, was sich mit dem bereits frühzeitig von Sale und MacDougall (1981) beschriebenen SAID-Prinzip deckt. Dass zwischen leistungs- und fitnessorientierten Kraftsportlern darüber hinaus ein grundsätzlicher Unterschied hinsichtlich der Bewegungstechnik beim Bankdrücken existiert, wurde beispielsweise bereits in einer Untersuchung von Mausehund und Krosshaug (2023) nachgewiesen.

Die zuvor aufgestellte These, dass es aufgrund der spezifischen Konditionierung von leistungsorientierten Kraftsportlern erst bei stärkerer Annäherung an das Muskelversagen zu einem ermüdungsbedingten Abfall der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit kommt, stimmt darüber hinaus mit den geschlussfolgerten Handlungsempfehlungen der Metaanalyse von Refalo et al. (2023) überein, welche zur Optimierung der Hypertrophieeffekte im Widerstandstraining für hochtrainierte Personen eine stärkere muskuläre Beanspruchung empfehlen als bei Personen mit niedrigerem Leistungsstand.

---

### 6.2.2 Interpretation der Untersuchungsergebnisse zu Fragenkomplex 6

Um die Eignung des adaptierten Ansatzes zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining auf Basis der MVT für unterschiedliche Adressatengruppen zu überprüfen, musste neben den Unterschieden der RSVT innerhalb der Gruppen auch überprüft werden, ob sich die relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten zwischen den betrachteten Probandenstichproben unterscheiden. Daher zielten die unter Fragenkomplex 6 (vgl. Kapitel 3.2.2) zusammengefassten Forschungsfragen darauf ab, herauszufinden, ob sich die RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1 voneinander unterscheiden.

Die Ergebnisse der inferenzstatistischen Datenanalyse zeigen, dass innerhalb der fitness- und gesundheitsorientierten Probandenstichprobe bei den paarweisen Vergleichen von  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  sowie  $RSVT_{RIR1}$  keine signifikanten Unterschiede ( $p = 1,000$ ) zwischen den unterschiedlichen Trainingszuständen der fitnessorientierten Probandenstichprobe ( $FKT_{detrainiert}$  vs.  $FKT_{trainiert}$ ) ermittelt werden konnten (vgl. Abb. 57).

Demgegenüber erbrachte der Vergleich der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten aller Messzeitpunkte ( $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$ ) zwischen der fitness- und gesundheitsorientierten und der leistungsorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand ( $FKT_{trainiert}$  vs.  $LKT_{trainiert}$ ) das Ergebnis, dass hinsichtlich der RSVT ein signifikanter Unterschied ( $p = 0,006$ ;  $\eta^2 = 0,245$ ) zwischen den verschiedenen Trainingsausrichtungen besteht. Hierbei muss als auffällig bezeichnet werden, dass in der leistungsorientierten Probandenstichprobe höhere relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeiten beobachtet wurden als in der fitness- und gesundheitsorientierten Probandenstichprobe (vgl. Abb. 58).

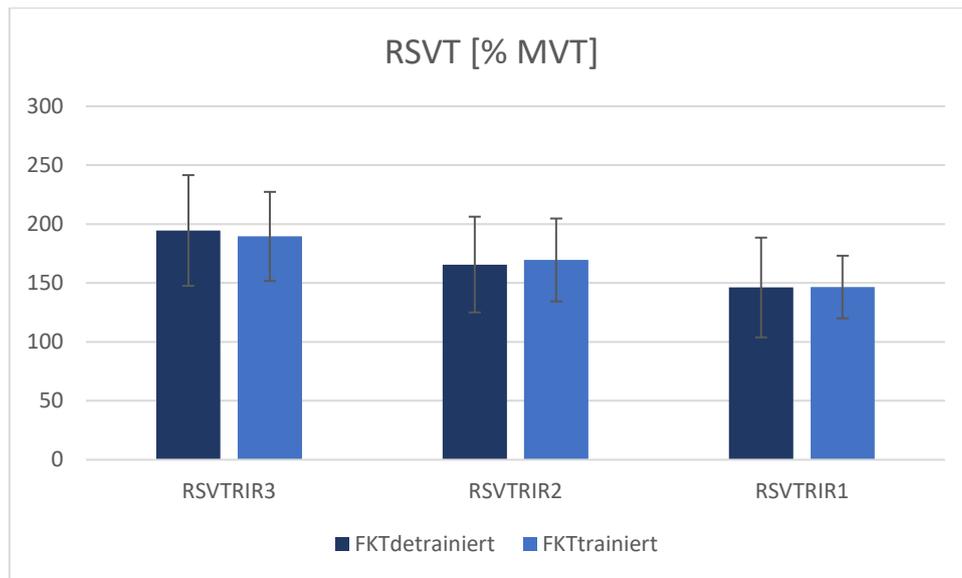


Abb. 57: Vergleich der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT in % MVT) bei RIR3, RIR2 und RIR1 zwischen den Stichproben FKT<sub>detrainiert</sub> und FKT<sub>trainiert</sub>

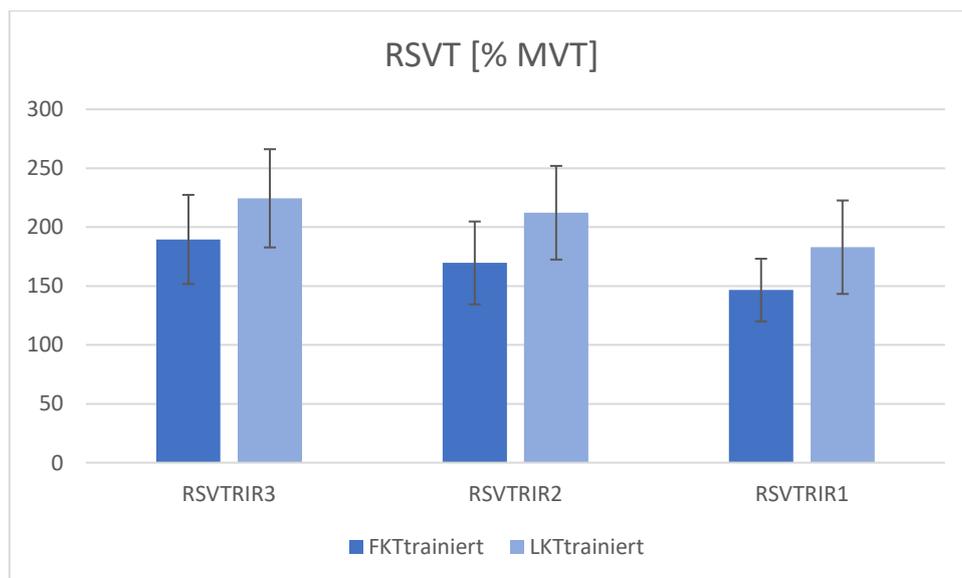


Abb. 58: Vergleich der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT in % MVT) bei RIR3, RIR2 und RIR1 zwischen den Stichproben FKT<sub>trainiert</sub> und LKT<sub>trainiert</sub>

Die höhere RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1 in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub> kann durch eine detaillierte Betrachtung der zur Berechnung der RSVT verwendeten Kenngrößen logisch erklärt werden. Da diese Hintergründe jedoch keinen Einfluss auf die Interpretation der Ergebnisse besitzen, erfolgt diese Erläuterung erst nach der Schlussfolgerung zur Eignung der RSVT als Zielparameter

---

dieses adaptierten Ansatzes der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining.

Im Hinblick auf die übergeordnete Forschungsfrage dieses Promotionsprojektes kann aus den Vergleichen der untersuchten Probandenstichproben geschlussfolgert werden, dass der Trainingszustand bei fitness- und gesundheitsorientiert trainierenden Personen ( $FKT_{\text{detrainiert}}$  vs.  $FKT_{\text{trainiert}}$ ) keinen Einfluss auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit bei RIR3, RIR2 und RIR1 besitzt. Auf Grundlage dieser Erkenntnis scheint sich die RSVT unabhängig vom aktuellen Trainingszustand zur geschwindigkeitsbasierten Steuerung der intraseriellen muskulären Beanspruchung bei fitness- und gesundheitsorientierten Personen zu eignen.

Demgegenüber müssen die signifikanten Unterschiede zwischen  $FKT_{\text{trainiert}}$  und  $LKT_{\text{trainiert}}$  so interpretiert werden, dass ein Einfluss der Trainingsausrichtung auf die RSVT besteht, weshalb es zur präzisen Steuerung der muskulären Beanspruchung innerhalb eines Trainingssatzes erforderlich ist, ausrichtungsspezifische Werte der RSVT zu verwenden, die sich für leistungsorientierte sowie fitness- und gesundheitsorientierte Kraftsportler unterscheiden.

Da die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) bei RIR3, RIR2 und RIR1 als Vielfaches der individuellen übungsspezifischen MVT in Prozent ausgedrückt wird, wurden zur genaueren Betrachtung der Zusammenhänge sowohl die Werte der MVT als auch die absoluten konzentrischen Durchschnittsgeschwindigkeiten (MV; engl.: „mean velocity“) bei RIR3, RIR2 und RIR1 herangezogen. Wie aus der vierten Voruntersuchung hervorging (vgl. 4.2.4), wurden bei den Probanden der Stichprobe  $LKT_{\text{trainiert}}$  im direkten Vergleich mit den beiden fitnessorientierten Stichproben die niedrigsten Werte sowie die geringste Variabilität der konzentrischen Geschwindigkeiten der letzten vollständig ausführbaren Wiederholung ( $MVT_{FKT_{\text{detrainiert}}} = 0,15 \pm 0,03$  m/s;  $MVT_{FKT_{\text{trainiert}}} = 0,13 \pm 0,03$  m/s;  $MVT_{LKT_{\text{trainiert}}} = 0,10 \pm 0,01$  m/s) beobachtet.

Aufgrund der Berechnungsweise der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit ( $RSVT = MV \div MVT$ ) kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich die ausrichtungsspezifischen Unterschiede der MVT auf die Vergleichbarkeit der RSVT in den untersuchten Probandenstichproben auswirkt. Aus diesem Grund mussten zusätzlich die absoluten konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (MV) betrachtet werden, um festzustellen, ob sich diese ebenfalls zwischen  $FKT_{\text{trainiert}}$  und  $LKT_{\text{trainiert}}$  unterscheiden (vgl. Abb. 59).

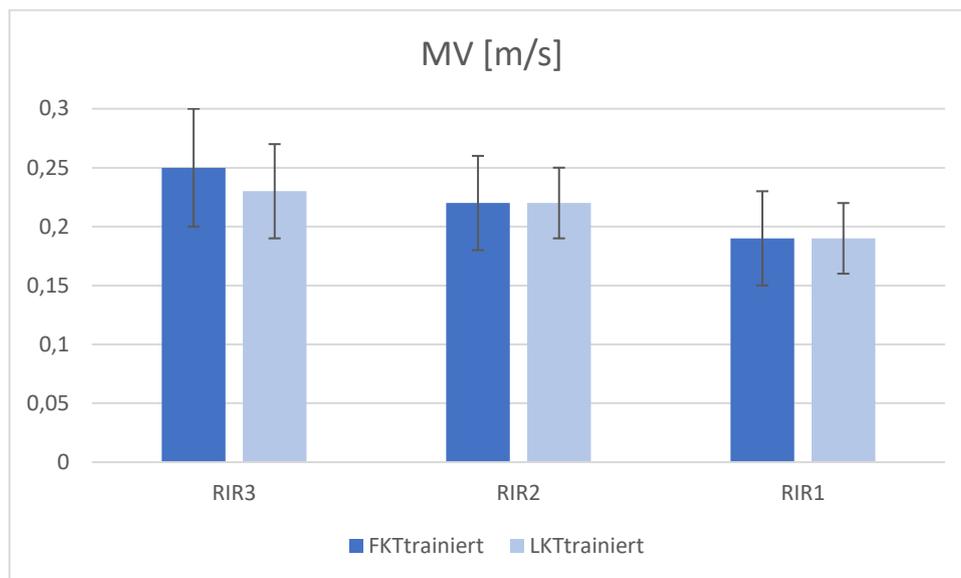


Abb. 59: Vergleich der durchschnittlichen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (MV in m/s) bei RIR3, RIR2 und RIR1 zwischen den Stichproben FKT<sub>trainiert</sub> und LKT<sub>trainiert</sub>

Dabei hat sich gezeigt, dass lediglich die MV bei RIR3 eine geringfügig unterschiedliche Höhe zwischen FKT<sub>trainiert</sub> und LKT<sub>trainiert</sub> aufweist. Die mittleren konzentrischen Geschwindigkeiten der Wiederholungen bei RIR2 und RIR1 waren identisch, auch wenn die Standardabweichungen bei FKT<sub>trainiert</sub> größer waren als bei LKT<sub>trainiert</sub> (vgl. Abb. 59). Aufgrund des Umstandes, dass hierzu keine inferenzstatistische Analyse der Mittelwertsunterschiede durchgeführt wurde, lässt sich diesbezüglich keine Aussage zu einer möglichen Signifikanz treffen. Allerdings ist zumindest bei RIR2 und RIR1 davon auszugehen, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den MV-Werten von FKT<sub>trainiert</sub> und LKT<sub>trainiert</sub> existieren, da die Mittelwerte identisch sind (vgl. Tab. 47 & Tab. 52).

Betrachtet man die interdependente Wirkung der MV und der MVT auf die Höhe der RSVT, so können die höheren relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten in der Stichprobe LKT<sub>trainiert</sub> (vgl. Abb. 58) dadurch erklärt werden, dass die leistungsorientierte Probandenstichprobe signifikant niedrigere MVT-Werte aufweist als die fitness- und gesundheitsorientierten Personen. Diese Beobachtung steht im Einklang mit der aktuellen wissenschaftlichen Evidenz zum Einfluss der Trainingsausrichtung bzw. der Erfahrung bei der Ausführung bestimmter Übungen auf die Höhe der MVT (Zourdos et al., 2016). Setzt man zur Berechnung der RSVT nun die MV-Werte bei RIR3, RIR2 und RIR1, welche in beiden

---

betrachteten Stichproben im trainierten Zustand nahezu identisch sind ( $MV_{FKT_{trainiert}} \approx MV_{LKT_{trainiert}}$ ), in Relation zu den ausrichtungsspezifischen MVT-Werten ( $MVT_{FKT_{trainiert}} > MVT_{LKT_{trainiert}}$ ), so ergeben sich daraus logischerweise höhere relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeiten für  $LKT_{trainiert}$  als für  $FKT_{trainiert}$ . Die ausrichtungsspezifischen Unterschiede der RSVT resultieren dieser Erläuterung zufolge direkt aus den ausrichtungsspezifischen Unterschieden der MVT.

Für die Gültigkeit der zuvor formulierten Beantwortung der Forschungsfragen aus Fragenkomplex 6 hat dies jedoch keine Konsequenz. Ungeachtet etwaiger Übereinstimmungen der MV bei RIR3, RIR2 und RIR1 in den Stichproben  $FKT_{trainiert}$  und  $LKT_{trainiert}$  ist es bei der Verwendung der RSVT als zentraler Parameter zur geschwindigkeitsbasierten Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung erforderlich, dass ausrichtungsspezifische Werte der RSVT verwendet werden, da sich die MVT signifikant zwischen den betrachteten Trainingsausrichtungen unterscheidet (vgl. Kapitel 4.2.4.3).

Ergänzend zu den zuvor diskutierten Erkenntnissen der Hauptuntersuchungen zur RSVT können auf Basis der in diesem Promotionsprojekt durchgeführten Voruntersuchungen weitere Aussagen zur interindividuellen Anwendbarkeit dieses adaptierten Ansatzes der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining mit submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten getroffen werden. Da bei diesem neu entwickelten Ansatz die RSVT als Steuerungsparameter zur Vorgabe des Grades der intraseriellen muskulären Ermüdung verwendet wird, welcher maßgeblich durch die Höhe der individuellen MVT beeinflusst wird, werden zur eingehenden Betrachtung potenzieller Effekte nachfolgend weitere Einflussgrößen im Kontext der RSVT sowie der MVT diskutiert.

An dieser Stelle wurde bereits ausführlich anhand der Ergebnisse der Hauptuntersuchungen erläutert, welchen Einfluss die Ausrichtung des Trainings sowie der Trainingszustand auf die RSVT besitzt. Darüber hinaus ging aus den Darstellungen des theoretischen Hintergrundes in Kapitel 2.3.2 bereits hervor, dass sowohl die MVT als auch die ermüdungsbedingte Geschwindigkeitsreduktion im Widerstandstraining bei unterschiedlichen Übungen signifikante Unterschiede aufweisen. Die MVT sowie die Reduktionsverläufe der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten müssen demzufolge im Kontext der weiteren Diskussion als übungsspezifisch betrachtet werden (Izquierdo et al., 2006; Sánchez-Medina et al., 2014).

Bislang wurde allerdings nicht diskutiert, welchen Einfluss das biologische Geschlecht der Probanden besitzt.

In der dritten Voruntersuchung dieses Promotionsprojektes wurde daher untersucht, welchen Einfluss das biologische Geschlecht auf die MVT sowie die RSVT besitzt. Hierbei konnte weder für die RSVT bei den Wiederholungen RIR3, RIR2 und RIR1 noch für die MVT signifikante Unterschiede zwischen den männlichen und weiblichen Probanden des untersuchten Probandenkollektivs mit fitness- und gesundheitsorientierter Trainingsausrichtung im trainierten Zustand festgestellt werden (vgl. Kapitel 4.2.3). Wie den Ergebnissen dieser Voruntersuchung entnommen werden kann, unterscheiden sich die relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten aller Messzeitpunkte ( $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$ ) nicht signifikant zwischen den männlichen und weiblichen Personen der Probandenstichprobe ( $p = 0,497$ ). Aufgrund dieser nicht signifikanten Unterschiede sowie des kleinen statistischen Effekts ( $\eta^2 = 0,028$ ) des Geschlechts auf die RSVT kann geschlussfolgert werden, dass das biologische Geschlecht keinen relevanten Einfluss auf die RSVT besitzt. Da die Mittelwertsvergleiche der MVT zwischen männlichen und weiblichen Personen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede ( $p = 0,620$ ) der MVT zwischen männlichen und weiblichen Personen der untersuchten Probandenstichprobe feststellen konnte und die RSVT anhand des Quotienten der MV in Relation zu MVT ausgedrückt wird, kann auf Basis der vorliegenden Ergebnisse angenommen werden, dass sich auch die durchschnittlichen absoluten konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten (MV) nicht in relevantem Ausmaß unterscheiden. Demzufolge kann angenommen werden, dass im Widerstandstraining mit volitional submaximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten bei einer Belastungsintensität von 75 %-1-RM kein signifikanter Einfluss des Geschlechts auf die RSVT oder die MVT besteht.

Aus diesem Grund können die Ergebnisse der Vor- und Hauptuntersuchungen dahingehend interpretiert werden, dass die RSVT als zentraler Parameter zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung bei Ausführung der Übung Bankdrücken mit der Langhantel mit volitional submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten unabhängig vom Geschlecht angewendet werden kann. Da diese Einflüsse jedoch ausschließlich in der fitness- und gesundheitsorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand untersucht wurden, sind weitere Untersuchungen erforderlich, um potenzielle geschlechtsspezifische Einflüsse auf die RSVT bei leistungsorientierten Personen sowie un- und detrainierten Personen zu erforschen.

---

### Zwischenfazit zur Untersuchung der Fragenkomplexe 5 und 6

Aus den Untersuchungen der Fragenkomplexe 5 und 6 können folgende Aussagen zur Eignung der RSVT für die Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung im Widerstandstraining mit einer Intensität von 75 % 1-RM und volitional submaximaler Geschwindigkeit als Zwischenfazit festgehalten werden.

1. In allen untersuchten Probandenstichproben konnte eine signifikante Reduktion der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit von der viertletzten zur vorletzten Wiederholung eines ausbelastenden Satzes festgestellt werden ( $RSVT_{RIR3} > RSVT_{RIR1}$ ).
2. Die Stichprobe  $FKT_{\text{detrainiert}}$  zeigte keine klare Differenzierung der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten zwischen RIR3 und RIR2 sowie zwischen RIR2 und RIR1, weshalb die Eignung der RSVT zur präzisen Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung im Sinne einer konkreten Annäherung an das momentane konzentrische Muskelversagen bei fitness- und gesundheitsorientierten Personen im detrainierten Zustand kritisch betrachtet werden muss.
3. In der Stichprobe  $FKT_{\text{trainiert}}$  wurden sowohl zwischen RIR3 und RIR2 als auch zwischen RIR2 und RIR1 signifikante Unterschiede der RSVT festgestellt. Aufgrund der klaren Differenzierung der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten kann die RSVT als geeignet dafür angesehen werden, die intraserielle muskuläre Ermüdung im Sinne einer konkreten Annäherung an das momentane konzentrische Muskelversagen bei fitness- und gesundheitsorientierten Personen im trainierten Zustand zu steuern.
4. Die Datenanalyse der Stichprobe  $LKT_{\text{trainiert}}$  zeigte keine signifikanten Unterschiede der RSVT zwischen RIR3 und RIR2. Da die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit jedoch zwischen RIR2 und RIR1 signifikant unterschiedlich ist, eignet sich die RSVT zur präzisen Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung im Sinne einer konkreten Annäherung an das momentane konzentrische Muskelversagen, sofern die Distanz zum Muskelversagen nicht mehr als drei vollständigen Wiederholungen ( $RIR \leq 2$ ) entspricht.

5. Bei der Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung anhand der RSVT muss berücksichtigt werden, dass die spezifische Ausrichtung des Trainings einen signifikanten Einfluss auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der letzten ausführbaren Wiederholungen eines ausbelastenden Trainingssatzes besitzt, was die Ableitung ausrichtungsspezifischer Referenzwerte notwendig macht.
  
6. Da in der fitness- und gesundheitsorientierten Probandenstichprobe kein signifikanter Einfluss des Trainingszustandes auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit festgestellt werden konnte, kann angenommen werden, dass sich die intraserielle muskuläre Ermüdung bei fitness- und gesundheitsorientiert Trainierenden unabhängig vom Trainingszustand anhand der ausrichtungsspezifischen RSVT steuern lässt.
  
7. Zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung im Widerstandstraining müssen RSVT auf Basis der übungsspezifischen MVT verwendet werden, während sowohl die RSVT als auch die MVT als geschlechtsunabhängig angesehen werden können.

### 6.2.3 Interpretation der Untersuchungsergebnisse zu Fragenkomplex 7

Die aktuelle trainingswissenschaftliche Evidenz deutet an, dass im Widerstandstraining signifikante Effekte auf die Skelettmuskelhypertrophie bei einer Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens bis auf einen Abstand von ungefähr drei bis vier Wiederholungen (RIR2-3) zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens (engl.: „repetitions in reserve“) ausgelöst werden (Helms et al., 2018; Krzysztofik et al., 2019). Um die Erreichung dieses Zielbereichs der intraseriellen muskulären Ermüdung überprüfen bzw. dies im Widerstandstraining objektiv steuern zu können, kann die ermüdungsbedingte Reduktion der durchschnittlichen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit (MV) als Kenngröße der muskulären Beanspruchung verwendet werden (González-Badillo et al., 2017; Morán-Navarro et al., 2019; Rodríguez-Rosell et al., 2020). Die MVT ( $MVT = MV_{RIR0}$ ) gibt dabei den absoluten Endpunkt der Geschwindigkeitsreduktion an, da diese die durchschnittliche konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der letzten vollständig ausführbaren Wiederholung vor Erreichen des momentanen konzentrischen Muskelversagens definiert (Caven et al., 2020; Fernandes et al., 2021; Weakley et al., 2021).

Anhand der zuvor dargestellten Erkenntnisse aus den Untersuchungen der Fragenkomplexe 5 und 6 konnte aufgezeigt werden, dass sich die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit ( $RSVT = MV \div MVT$ ) zu den Beobachtungszeitpunkten RIR3 und RIR1 in einem ausbelastenden Trainingssatz mit einer Intensität von 75 % 1-RM und volitional submaximaler Geschwindigkeit signifikant voneinander unterscheiden. Eine klare Differenzierbarkeit der RSVT zwischen RIR3 und RIR2 scheint nur in der fitness- und gesundheitsorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand gegeben zu sein, während sich die RSVT-Werte der letzten beiden Wiederholungen vor Erreichen der MVT ( $RSVT_{RIR2}$  &  $RSVT_{RIR1}$ ) sowohl bei leistungsorientierten als auch bei fitness- und gesundheitsorientierten Personen im trainierten Zustand statistisch signifikant voneinander abgrenzen lassen. Die Beobachtung, dass insbesondere bei leistungsorientierten Personen erst bei einem höheren Ausbelastungsgrad eine Reduktion der Kraftleistung im Sinne einer unwillkürlichen Reduktion der Bewegungsgeschwindigkeit eintritt, steht im Einklang mit anderen Untersuchungen, die sich mit dem Einfluss der Trainingserfahrung bzw. -ausrichtung auf das erforderliche Ausmaß der Annäherung an das Muskelversagen zur Optimierung der muskulären Trainingseffekte befasst haben. Nach aktuellem Kenntnisstand wird hierbei angenommen, dass bei hochtrainierten Personen eine stärkere Annäherung an das

Muskelversagen zur Optimierung von Hypertrophieeffekten erforderlich ist als bei Personen mit niedrigerem Leistungsstand (Refalo et al., 2023).

Nachdem in den bisher dargestellten Hauptuntersuchungen eine übergeordnete Unterscheidung der RSVT bei einer Annäherung an das momentane konzentrische Muskelversagen im Bereich zwischen RIR3 und RIR1 in allen Probandenstichproben nachgewiesen wurde, kann diese zentrale Voraussetzung zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung nach dem in diesem Promotionsprojekt entwickelten adaptierten Ansatz der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung als erfüllt angesehen werden.

Neben der Untersuchung der grundlegenden Unterschiede der RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1 muss jedoch zusätzlich auch der Zusammenhang zwischen der Reduktion der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit und der exakten Annäherung an das momentane konzentrische Muskelversagen betrachtet werden, um eine Aussage über die Präzision dieses Steuerungsansatzes treffen zu können.

Dementsprechend befasste sich Fragenkomplex 7 mit der Fragestellung, ob bei einem ausbelastenden Widerstandstraining mit volitional submaximaler konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit und einer Belastungsintensität von 75 % 1-RM ein Zusammenhang der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit der letzten vier realisierbaren Wiederholungen vor dem Punkt des momentanen Muskelversagens (RSVT bei RIR 3-0) und der Anzahl der noch realisierbaren Wiederholungen (RIR 3-0) besteht. Aufgrund der signifikanten Unterschiede der  $RSVT_{RIR3-1}$  zwischen den leistungs- und fitnessorientierten Personen im trainierten Zustand ( $LKT_{trainiert}$  vs.  $FKT_{trainiert}$ ) sowie der Tatsache, dass es sich bei  $FKT_{detrainiert}$  und  $FKT_{trainiert}$  um das gleiche Probandenkollektiv zu unterschiedlichen Zeitpunkten handelt, wurden diese Zusammenhänge getrennt für alle Probandenstichproben betrachtet.

Die Korrelationsanalyse zeigte in allen betrachteten Probandenstichproben einen starken bis sehr starken statistischen Zusammenhang zwischen der Höhe der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit und der Anzahl noch ausführbarer Wiederholungen bis zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens (vgl. Kapitel 5.4). Die Pearson-Korrelation zeigte in der Probandenstichprobe  $FKT_{detrainiert}$  einen Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,675$ , was einen starken positiven Zusammenhang zwischen RSVT und RIR demonstriert. Bei leistungs- sowie fitness- und gesundheitsorientierten Personen im trainierten Zustand konnte

---

anhand der Korrelationskoeffizienten der Pearson-Produkt-Moment-Korrelation sogar ein sehr starker positiver Zusammenhang zwischen RSVT und RIR festgestellt werden ( $FKT_{\text{trainiert}}: r = 0,746$ ;  $LKT_{\text{trainiert}}: r = 0,766$ ).

Die Qualität der beobachteten Zusammenhänge bestätigt die ursprüngliche Hypothese, dass die Höhe der durchschnittlichen konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit in Relation zur MVT umso mehr abnimmt, je stärker man sich der muskulären Ausbelastung annähert. Dieser für alle Probandenstichproben bestätigte starke Zusammenhang kann als Indiz dafür verstanden werden, dass die RSVT-Werte repräsentativ für das Ausmaß der intraseriellen muskulären Ermüdung sind und die muskuläre Beanspruchung im Widerstandstraining mit volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit anhand der RSVT gesteuert werden kann.

Unter Berücksichtigung der bereits mehrfach erwähnten Empfehlung (Helms et al., 2018; Krzysztofik et al., 2019), sich zur Optimierung von Muskelaufbaueffekten dem konzentrischen Muskelversagen auf mindestens drei bis vier Wiederholungen anzunähern sowie der signifikanten Reduktion der RSVT zwischen den Wiederholungen RIR3 und RIR1, können die dargestellten Zusammenhänge so interpretiert werden, dass das Unterschreiten der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit bei RIR3 ( $RSVT_{RIR3}$ ; vgl. Tab. 87) als Kriterium zur Erzeugung eines adäquaten Hypertrophiestimulus innerhalb eines Trainingssatzes angesehen werden kann.

Allerdings sagen diese Zusammenhänge nichts darüber aus, ob sich die Vorgabe eines bestimmten RSVT-Wertes als Zielgröße dazu eignet, ein konkretes Ausmaß der Annäherung an die vollständige Ausbelastung im Sinne einer exakten Anzahl verbleibender Wiederholungen (RIR) zu erzeugen. Aus diesem Grund wurden zusätzlich zu den Korrelationsanalysen auch Regressionsanalysen durchgeführt, um die Kausalität der interdependenten Beziehung zwischen der Verringerung der RSVT und der Anzahl der ausführbaren Wiederholungen bis zum Muskelversagen zu untersuchen.

Bei den durchgeführten Regressionsanalysen wurde die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) als abhängige Variable deklariert, um überprüfen zu können, wie sich diese durch die Nähe zum momentanen konzentrischen Muskelversagen (RIR = unabhängige Variable bzw. Prädiktor) vorhersagen lässt. Als Ergebnis zeigte sich in der Stichprobe  $FKT_{\text{detrainiert}}$ , dass ein exponentielles Regressionsmodell ( $R^2 = 0,515$ ;  $p < 0,001$ ) 51,5 Prozent der Varianzen der RSVT durch die Veränderung der RIR erklären kann. Bei den gleichen Personen im trainierten Zustand ( $FKT_{\text{trainiert}}$ ) wies ein exponentielles Regressionsmodell die

höchste Erklärungskraft ( $R^2 = 0,620$ ;  $p < 0,001$ ) auf, wodurch 62,0 Prozent der Varianzen der RSVT durch die Veränderung der RIR aufgeklärt werden können. In der leistungsorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand ( $LKT_{\text{trainiert}}$ ) konnten anhand eines kubisches Regressionsmodells ( $R^2 = 0,682$ ;  $p < 0,001$ ) sogar 68,2 Prozent der Streuung der RSVT durch die Veränderung der RIR erklärt werden.

Gemäß der Erklärungskraft der identifizierten Regressionsmodelle können jeweils nur knapp die Hälfte bis zwei Drittel der aufgetretenen Varianzen der RSVT durch die als RIR operationalisierte Annäherung an das momentane konzentrische Muskelversagen erklärt werden. Demzufolge lassen die Ergebnisse der Regressionsanalysen keine zweifelsfreie Vorhersage der Anzahl verbleibender Wiederholungen bis zum Muskelversagen anhand der Vorgabe eines bestimmten RSVT-Wertes zu, da die Streuung der RSVT-Werte bei RIR3-1 zu groß ist. Das besagte Ausmaß der Streuung der RSVT-Werte respektive die Höhe der Erklärungskraft der jeweiligen Regressionsmodelle könnte unter anderem dadurch erklärt werden, dass sich die RSVT zwar in allen betrachteten Stichproben zwischen RIR3 und RIR1 unterscheidet, allerdings nicht in allen Stichproben eine klare Abgrenzung der RSVT-Bereiche zwischen RIR3 und RIR2 sowie zwischen RIR2 und RIR1 möglich ist.

Auf Grundlage der zusammengefassten Erkenntnisse aus den Korrelations- und Regressionsanalysen kann hinsichtlich der Eignung des MVT-basierten Ansatzes zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung geschlussfolgert werden, dass aufgrund der suboptimalen Abgrenzung der RSVT-Bereiche zwischen RIR3, RIR2 und RIR1 keine klare Vorhersage der RSVT hinsichtlich einer konkreten Annäherung an das konzentrische Muskelversagen im Sinne einer definierten Anzahl ausführbarer Wiederholungen möglich ist.

#### 6.2.4 Ableitung von Zielkorridoren der RSVT zur Steuerung der muskulären Beanspruchung

Aufgrund der signifikanten Unterschiede zwischen RIR3 und RIR1 sowie der starken bis sehr starken Zusammenhänge zwischen dem Absinken der RSVT und der Anzahl verbleibender Wiederholungen bis zum Muskelversagen in allen untersuchten Personengruppen kann die RSVT allerdings als Bereich für RIR3, RIR2 und RIR1 definiert werden, um damit einen Zielkorridor der individuell anzustrebenden RSVT-Reduktion zu kennzeichnen. Das Erreichen dieses Zielkorridors der RSVT zwischen RIR3 und RIR1 kann zur Gewährleistung einer ausreichenden intraseriellen muskulären Ermüdung im Widerstandstraining zur Vergrößerung der Skelettmuskelmasse verwendet werden, ohne dass dieser adaptierte Ansatz der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung dabei von der Erzeugung volitional maximaler Bewegungsgeschwindigkeiten abhängig ist.

Die zuvor erläuterte Interpretation der Untersuchungsergebnisse zu Fragenkomplex 7 entspricht auch der von Döring und Bortz (2015, S. 677) empfohlenen Vorgehensweise, dass bei signifikanten Ergebnissen der Regressionsanalysen diskutiert werden sollte, inwiefern die Effektgröße praktisch bedeutsam ist. Denn auch wenn die dargestellten Regressionsmodelle ein beträchtliches Ausmaß der Varianzen der RIR-spezifischen RSVT-Werte aufklären können, reicht die Vorhersagekraft der Modelle nicht aus, um die intraserielle muskuläre Ermüdung im Widerstandstraining mit ausreichender Präzision zu steuern. Aus diesem Grund fokussieren sich die nachfolgend dargestellten Diskussionsinhalte auf die Ableitung der bereits erwähnten Zielkorridore der RSVT, mit denen eine adäquate muskuläre Beanspruchung zur Auslösung von Muskelhypertrophie gewährleistet werden kann.

Zur möglichst exakten Ableitung dieser Zielkorridore wurden nicht nur die Mittelwerte der RIR-spezifischen RSVT, sondern zusätzlich auch deren Konfidenzintervalle herangezogen. Konfidenzintervalle geben einen Schätzbereich an, in dem der wahre Populationsparameter mit hoher Wahrscheinlichkeit (z. B. 95 % Wahrscheinlichkeit bei 95 %-Konfidenzintervallen) liegt, weshalb dies auch als Intervallschätzung bezeichnet wird (Döring & Bortz, 2015, S. 297). Diese Vorgehensweise folgt den in der einschlägigen Literatur geäußerten Empfehlungen zur Analyse und Interpretation von empirischen Untersuchungsergebnissen. Diese Empfehlungen

besagen, dass die interessierenden Effekte bzw. Populationsparameter, ergänzend zu den statistischen Tests zur Überprüfung von Mittelwertsunterschieden (Punktschätzungen), auch als Intervallschätzungen angegeben werden sollten, da Konfidenzintervalle allgemein als aussagekräftiger gelten als die alleinige Betrachtung von Punktschätzungen und Irrtumswahrscheinlichkeiten (Döring & Bortz, 2015, S. 677).

Um adressatenspezifische Zielkorridore zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung anhand der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit definieren zu können, wurden für alle untersuchten Probandenstichproben die 95 %-Konfidenzintervalle der Mittelwerte für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  berechnet, welche in den nachfolgenden Tabellen abgebildet werden (Tab. 93, Tab. 94 & Tab. 95).

Tab. 93: Konfidenzintervalle der Mittelwerte für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $FKT_{\text{detrainiert}}$

RSVT RIR3 [% MVT]	Mittelwert		194,610
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	171,963
		Obergrenze	217,256
RSVT RIR2 [% MVT]	Mittelwert		165,682
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	146,101
		Obergrenze	185,264
RSVT RIR1 [% MVT]	Mittelwert		146,191
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	125,789
		Obergrenze	166,593

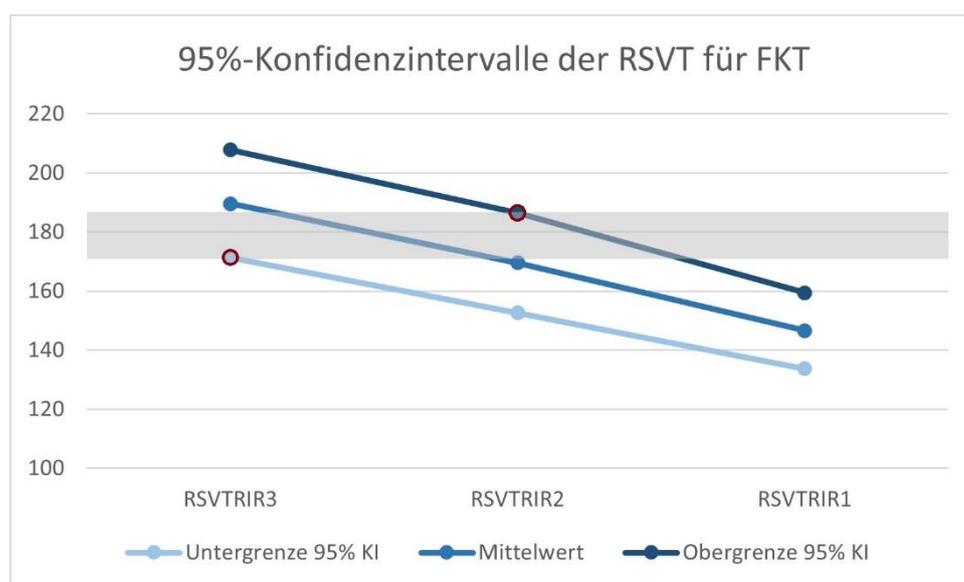
Tab. 94: Konfidenzintervalle der Mittelwerte für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $FKT_{\text{trainiert}}$

RSVT RIR3 [% MVT]	Mittelwert		189,573
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	171,358
		Obergrenze	207,788
RSVT RIR2 [% MVT]	Mittelwert		169,603
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	152,653
		Obergrenze	186,553
RSVT RIR1 [% MVT]	Mittelwert		146,581
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	133,766
		Obergrenze	159,396

Tab. 95: Konfidenzintervalle der Mittelwerte für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  in der Stichprobe  $LKT_{trainiert}$ 

RSVT RIR3 [% MVT]	Mittelwert		224,443
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	194,614
		Obergrenze	254,273
RSVT RIR2 [% MVT]	Mittelwert		212,204
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	183,772
		Obergrenze	240,636
RSVT RIR1 [% MVT]	Mittelwert		182,958
	95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	154,611
		Obergrenze	211,305

Aus Tab. 93 und Tab. 94 wird ersichtlich, dass die Werte von  $FKT_{detrainiert}$  und  $FKT_{trainiert}$  nahezu identisch sind. Dies deckt sich mit den Untersuchungsergebnissen zu Fragenkomplex 6, bei denen kein signifikanter Unterschied der RSVT bei RIR3-1 zwischen  $FKT_{detrainiert}$  und  $FKT_{trainiert}$  festgestellt werden konnte. Aus diesem Grund wird nachfolgend nicht weiter zwischen den Trainingszuständen dieser Personengruppe differenziert und ein übergeordneter Zielkorridor für fitness- und gesundheitsorientierte Personen auf Basis der Daten von  $FKT_{trainiert}$  abgeleitet. Abb. 60 stellt die 95 %-Konfidenzintervalle für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  der fitness- und gesundheitsorientierten Probandenstichprobe dar, die übergeordnet sowohl für detrainierte als auch trainierte Personen gelten und auf Basis der RSVT-Werte von  $FKT_{trainiert}$  berechnet wurden.

Abb. 60: 95 %-Konfidenzintervalle für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  inkl. Zielkorridor für FKT

In Abb. 60 wurde außerdem bereits der Zielkorridor der RSVT zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung anhand der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit grau eingefärbt. Dieser Zielkorridor wurde anhand der Untergrenze des 95 %-Konfidenzintervalls der RSVT bei RIR3 und der Obergrenze des 95 %-Konfidenzintervalls der RSVT bei RIR2 definiert.

Da 95 %-Konfidenzintervalle den Schätzbereich angeben, in dem der wahre Wert der betrachteten Variable mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit zu finden ist, kann angenommen werden, dass sich jeweils 2,5 Prozent der Werte unterhalb der Untergrenze sowie oberhalb der Obergrenze befinden. Alternativ kann dies so betrachtet werden, dass sich 97,5 Prozent der beobachteten Werte oberhalb der Untergrenze bzw. 97,5 unterhalb der Obergrenze befinden, weshalb die Annahme gilt, dass 95 % der tatsächlichen Werte zwischen diesen Grenzen zu finden sind.

Dieser Annahme folgend sind 97,5 Prozent der Werte der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit bei RIR3 größer als  $RSVT = 171,4$  % der MVT. Darüber hinaus kann angenommen werden, dass 97,5 Prozent der Werte der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit bei RIR2 kleiner als  $RSVT = 186,6$  % der MVT sind.

Daraus kann geschlussfolgert werden, dass das Erreichen des Zielkorridors der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit von  **$RSVT = 171,4 - 186,6$  % der MVT bei fitness- und gesundheitsorientierten Personen** mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit den Grad der intraseriellen muskulären Ermüdung kennzeichnet, der RIR3 oder RIR2 entspricht. Entsprechend dieser Werte sollten nach Erreichen dieses Zielkorridors maximal noch drei (RIR2, RIR1, RIR0) und mindestens noch zwei weitere Wiederholungen ausführbar sein, bevor der Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens erreicht wird.

In Abb. 61 werden die 95 %-Konfidenzintervalle für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  der leistungsorientierten Probandenstichprobe im trainierten Zustand anhand der Werte aus Tab. 95 grafisch visualisiert.

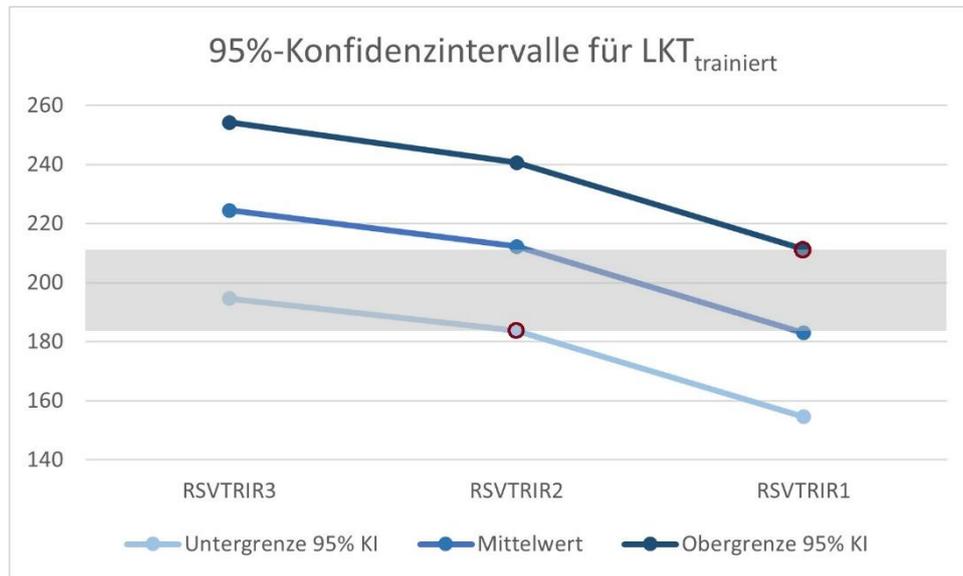


Abb. 61: 95 %-Konfidenzintervalle für  $RSVT_{RIR3}$ ,  $RSVT_{RIR2}$  und  $RSVT_{RIR1}$  inkl. Zielkorridor für  $LKT_{trainiert}$

Der in der zuvor dargestellten Abb. 61 gekennzeichnete Zielkorridor wurde auf der Annahme basierend definiert, dass 97,5 Prozent der Werte der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit bei RIR2 größer sind als  $RSVT = 183,8$  % der MVT. Darüber hinaus wurde zur Festlegung des Zielkorridors angenommen, dass 97,5 Prozent der Werte der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit bei RIR1 unterhalb des Grenzwertes von  $RSVT = 211,3$  % der MVT liegen.

Für **leistungsorientierte Personen** im trainierten Zustand könnte demzufolge geschlussfolgert werden, dass das Erreichen des Zielkorridors der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit von  **$RSVT = 183,8 - 211,3$  % der MVT** mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit den Grad der intraserialen muskulären Ermüdung kennzeichnet, der RIR2 oder RIR1 entspricht. Demzufolge sollten nach Erreichen dieses Korridors maximal noch zwei (RIR1, RIR0) und mindestens noch eine weitere Wiederholung realisiert werden können, bevor der Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens erreicht wird.

Die hier abgeleiteten Zielkorridore wurden auf Basis des aktuellen Kenntnisstandes zur optimalen adressatenspezifischen Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens im Widerstandstraining zur Vergrößerung der Skelettmuskelmasse festgelegt. Da eine intraserielle Annäherung von mindestens drei bis vier Wiederholungen an das Muskelversagen zur Auslösung von Hypertrophieeffekten empfohlen wird (Helms et al., 2018; Krzysztofik et al., 2019) und leistungsorientierte Personen laut aktuellem Kenntnisstand einen höheren Ausbelastungsgrad zur Optimierung der Anpassungsreaktionen benötigen als fitness- und gesundheitsorientierte Personen (Refalo et al., 2023), wurden bei der Festlegung der Zielkorridore entsprechend geeignete Bereiche festgelegt. Dementsprechend wurde für leistungsorientierte Personen der Bereich der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit zwischen RIR1-2 und für fitnessorientierte Personen der RSVT-Bereich zwischen RIR2-3 als exemplarisches Zielausmaß der intraseriellen muskulären Ermüdung gewählt.

**Anwendungsorientierte Handlungsempfehlung**

Grundsätzlich sollte bei der praktischen Anwendung davon ausgegangen werden, dass zumindest am Ende eines annähernd ausbelastenden Trainingssatzes mit volitional maximalen Krafteinsätzen gegen den aufgelegten Widerstand gearbeitet wird, um den Bewegungsfluss trotz ermüdungsbedingter Reduktion der Kraftleistung weiter aufrechtzuerhalten.

Zur Sicherstellung der Gültigkeit der erfassten konzentrischen Durchschnittsgeschwindigkeiten kann es allerdings ratsam sein, nach erstmaligem Erreichen des Zielkorridors der RSVT eine weitere Wiederholung auszuführen. Anhand der bei dieser Wiederholung erfassten konzentrischen Durchschnittsgeschwindigkeit (MV) kann überprüft werden, ob der Zielkorridor der RSVT bei der vorherigen Wiederholung durch zu geringen volitionalen Krafteinsatz oder durch eine ermüdungsbedingt verringerte Kraftleistung erreicht wurde.

Steigt die MV nach erstmaligem Erreichen des Zielkorridors der RSVT wieder an, so kann dies als Indikator dafür angesehen werden, dass noch kein ausreichendes Ausmaß intraserieller muskulärer Ermüdung erreicht wurde, weshalb weitere Wiederholungen ausgeführt werden sollten, bis der Zielkorridor erneut erreicht wird und sich die beschriebene Prozedur wiederholt.

Sinkt die MV bei dieser Wiederholung nach erstmaligem Erreichen des Zielkorridors der RSVT weiter, so kann dies als Anzeichen für das Erreichen eines ausreichenden Ausmaßes an intraserieller muskulärer Ermüdung betrachtet werden.

Die zuvor dargestellten exemplarischen Wertebereiche der Zielkorridore der RSVT wurden so gewählt, dass durch die Ausführung dieser zusätzlichen Wiederholung weder bei leistungsorientierten noch bei fitnessorientierten Kraftsportlern der Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens erreicht werden sollte.

Demzufolge wäre durch die beschriebene Vorgehensweise bei leistungsorientierten Kraftsportlern eine voraussichtliche Annäherung an das Muskelversagen von RIR1-RIR0 zum Zeitpunkt des Belastungsendes zu erwarten, während sich fitness- und gesundheitsorientierte Personen diesem Punkt bis auf RIR2-RIR1 annähern würden.

---

### 6.2.5 Zusammenfassung des Erkenntnisgewinns und Einordnung in den aktuellen Kenntnisstand

Als zentrale Schlussfolgerung dieser Untersuchung kann festgehalten werden, dass sich die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) grundsätzlich zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung eignet, da sich in allen Stichproben eine signifikante Reduktion der RSVT zwischen RIR3 und RIR1 feststellen lässt. Basierend auf der Beobachtung, dass sich die RSVT nicht in allen untersuchten Probandenstichproben klar zwischen RIR3 und RIR2 sowie zwischen RIR2 und RIR1 abgrenzen lässt, konnte der RSVT nur eine eingeschränkte Präzision zur exakten Steuerung des Ausbelastungsgrades attestiert werden (vgl. Kapitel 0).

Die Vergleiche der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten zwischen  $FKT_{\text{trainiert}}$  und  $LKT_{\text{trainiert}}$  weisen darüber hinaus auf die Notwendigkeit zur Verwendung ausrichtungsspezifischer Werte der RSVT hin. Die signifikant höheren RSVT-Werte bei RIR3, RIR2 und RIR1 der leistungsorientierten Probandenstichprobe gegenüber der fitness- und gesundheitsorientierten Personengruppe können mit der Höhe der ausrichtungsspezifischen MVT-Werte erklärt werden. Daraus lässt sich die anwendungsrelevante Erkenntnis ableiten, dass die Zuordnung von Personen, die sich beispielsweise in einer Transitionsphase von einem bislang fitnessorientierten Krafttraining zu einem eher leistungsorientierten Training befinden, anhand der gemessenen MVT erfolgen kann (vgl. Kapitel 4.2.4; Weakley et al., 2021). Eine möglichst präzise Kategorisierung der Trainingsausrichtung ist unter Berücksichtigung der hier gewonnenen Erkenntnisse von kritischer Relevanz, um individuell passende Referenzwerte der RSVT für die geschwindigkeitsbasierte Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung nach dem hier untersuchten adaptierten Ansatz zu verwenden (vgl. Kapitel 6.2.2).

Wie bereits zuvor erwähnt ist die exakte Differenzierung der Anzahl ausführbarer Wiederholungen bis zum konzentrischen Muskelversagen nur eingeschränkt anhand der RSVT-Werte möglich, da sich einerseits nicht zwischen allen betrachteten Wiederholungspaaren signifikante Unterschiede der RSVT gezeigt haben und die Regressionsanalysen andererseits keine ausreichende Erklärungskraft der betrachteten Vorhersagemodelle aufzeigen konnten. Von dem Versuch, die intraserielle muskuläre Ermüdung im Sinne einer exakten Anzahl noch ausführbarer Wiederholungen (RIR) durch die Vorgabe einer konkreten RSVT steuern zu wollen, sollte demzufolge Abstand genommen werden, bis weitere Daten erhoben wurden, mit denen eine solche Vorgehensweise legitimiert werden könnte (vgl. Kapitel 6.2.3).

Aufgrund der signifikanten Unterschiede der RSVT zwischen RIR3 und RIR1 in allen Stichproben und der starken bis sehr starken Zusammenhänge zwischen RSVT und RIR wurde die Relevanz der Geschwindigkeitsreduktion zwischen RIR3 und RIR1 zur Steuerung des Ausbelastungsgrades bekräftigt. In Anlehnung an die aktuelle trainingswissenschaftliche Evidenz (Helms et al., 2018; Krzysztolik et al., 2019; Refalo et al., 2023) kann das Erreichen eines ausrichtungsspezifischen Zielkorridors der RSVT als repräsentativ für einen adäquaten Ausbelastungsgrad angesehen und demzufolge als Zielparameter des adaptierten Ansatzes der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining mit submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten zur Vergrößerung der Skelettmuskelmasse verwendet werden (vgl. Kapitel 6.2.4).

Gegenüber etablierten Steuerungsansätzen im Widerstandstraining bietet der in diesem Promotionsprojekt entwickelte und untersuchte Ansatz zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung auf Basis der MVT bzw. anhand der RSVT potenzielle Vorteile. Besagte Vorteile beziehen sich dabei primär auf die Anwendbarkeit zur geschwindigkeitsunabhängigen Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung, was insbesondere im Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse von zentraler Bedeutung ist (Helms et al., 2017; Morán-Navarro et al., 2019; Pelland et al., 2022; Refalo et al., 2023). Um die Relevanz der MVT-basierten Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung zu veranschaulichen und eine Einordnung dieses neu entwickelten Steuerungsansatzes in den gegenwärtigen trainingswissenschaftlichen Kenntnisstand vorzunehmen, werden nachfolgend mehrere etablierte Ansätze zur Belastungssteuerung im Widerstandstraining mit besonderem Fokus auf deren Limitationen vorgestellt.

Als populärster Ansatz zur Belastungssteuerung im Widerstandstraining kann die prozentbasierte Vorgabe der Belastungsintensität (engl.: „percentage based training“; [PBT]) angesehen werden. Hierbei wird die Belastungsdauer basierend auf dem Zusammenhang zwischen der Höhe der Belastungsintensität und der Anzahl maximal realisierbarer Wiederholungen gesteuert. Die Eignung von PBT zur exakten Steuerung der realisierbaren Wiederholungszahlen bei deduzierten submaximalen Intensitäten in Relation zur Maximalkraft (% 1-RM) muss allerdings als problematisch betrachtet werden, da dieser Zusammenhang von zahlreichen Einflussgrößen abhängig ist, was sich in inter- und intraindividuellen Unterschieden äußert (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 10–11).

In diesem Kontext wurde beobachtet, dass eine vorgegebene Belastungsintensität bei der Ausführung unterschiedlicher Übungen durch die gleiche Person in unterschiedlichen Wiederholungszahlen resultiert (Fröhlich & Marschall, 1999; Iglesias et al., 2010; Nuzzo et al., 2023; Shimano et al., 2006). Neben dem übungsspezifischen Einfluss auf den Zusammenhang zwischen Belastungsintensität und -dauer wurde außerdem festgestellt, dass die Kraftleistungsfähigkeit eines Individuums zusätzlich von der Tagesform und Tageszeit beeinflusst wird (Knaier et al., 2019; Knaier et al., 2022). Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass die prozentbasierte Vorgabe einer bestimmten Belastungsintensität in Relation zum konzentrischen Kraftmaximum an unterschiedlichen Tagen und zu unterschiedlichen Tageszeiten auch in einer unterschiedlichen Anzahl maximal realisierbarer Wiederholungen resultiert. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass die individuelle Belastungsdauer auch von der Bewegungsgeschwindigkeit im Widerstandstraining beeinflusst wird (Trybulski et al., 2022; Wilk et al., 2018; Wilk et al., 2020). Zusätzlich zu den erläuterten intraindividuellen Unterschieden scheint die intensitätsspezifische Belastungsdauer auch interindividuell unterschiedlich zu sein. In einer Untersuchung von Richens und Cleather (2014) wurde neben dem Einfluss der ausgeführten Übung im Widerstandstraining beobachtet, dass Personen mit unterschiedlicher Ausrichtung des Trainings (kraft- vs. ausdauerorientiertes Training) unterschiedlich viele Wiederholungen mit der gleichen relativen Belastungsintensität ausführen können. Dabei wurde festgestellt, dass ausdauerorientiert Trainierende eine signifikant höhere Anzahl an Wiederholungen realisieren konnten als leistungsorientierte Kraftsportler. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen der Untersuchung in diesem Promotionsprojekt. Hierbei wurde hinsichtlich der Belastungsdauer festgestellt, dass leistungsorientierte Kraftsportler bei einer Belastungsintensität von 75 % 1-RM eine geringere durchschnittliche Wiederholungsanzahl realisieren konnte ( $LKT_{\text{trainiert}}: n = 7,90$ ) als die fitness- und gesundheitsorientierten Personen ( $FKT_{\text{detrainiert}}: n = 9,89$ ;  $FKT_{\text{trainiert}}: n = 9,79$ ).

Durch die zahlreichen Einflüsse auf den Zusammenhang der Belastungsintensität und der realisierbaren Wiederholungszahl kann die Belastungsdauer im Widerstandstraining nicht mit ausreichender Präzision durch eine konkrete Vorgabe der Wiederholungsanzahl bei deduzierten submaximalen Intensitäten (% 1-RM) gesteuert werden. Daraus folgt logischerweise, dass auch die Steuerung des Grades der intraserialen muskulären Ermüdung anhand des prozentbasierten Ansatzes der Belastungssteuerung nicht oder zumindest nur stark eingeschränkt möglich ist.

Die inadäquate Steuerung der muskulären Ermüdung anhand eines prozentbasierten Ansatzes kann im Rahmen des Widerstandstrainings zu ausbleibenden oder suboptimalen Anpassungseffekten sowie im schlimmsten Fall zu Überlastungserscheinungen und Verletzungen führen. Aufgrund des hohen Stellenwertes der muskulären Ermüdung für die Erzeugung von Anpassungsprozessen im Widerstandstraining, insbesondere der Steigerung Skelettmuskelmasse (vgl. Kapitel 2.2.3), müssen neue Herangehensweisen erschlossen werden, die eine Steuerung der muskulären Ermüdung ermöglichen. Hierzu haben sich mittlerweile mehrere Ansätze zur Steuerung der Annäherung an das Muskelversagen, wie beispielsweise über das subjektive Belastungsempfinden (engl.: „rating of perceived exertion“; [RPE]) oder die geschätzte Anzahl realisierbarer Wiederholungen bis zum Erreichen des Muskelversagens (engl.: „repetitions in reserve“; [RIR]), etabliert (Hackett et al., 2012). Diese Ansätze gelten zwar grundsätzlich als effektiv, unterliegen aber gleichzeitig gewissen individuellen Ungenauigkeiten bei der Steuerung der Annäherung an das Muskelversagen, da diese stark durch individuelle und subjektive Faktoren beeinflusst werden (Helms et al., 2018; Pelland et al., 2022; Zourdos et al., 2021). Insbesondere von einer rein subjektiven Belastungssteuerung ohne Verwendung objektiver Steuerungsparameter ist abzuraten, da diese eine deutlich geringere Effektivität des Widerstandstrainings erwarten lassen. Diese Aussage stützt sich insbesondere auf eine Untersuchung von Steele et al. (2022), bei der beobachtet wurde, mit welchen relativen Belastungsintensitäten Personen trainieren, wenn man sie die Lasten für eine entsprechende Wiederholungszahl selbst auswählen lässt. Dabei wurde anhand einer metaanalytischen Betrachtung der vorhandenen Primärstudien festgestellt, dass die Trainierenden für den Bereich der Belastungsdauer von 5–15 Wiederholungen nur eine durchschnittliche Belastungsintensität von 53 % 1-RM gewählt haben, was im Kontext trainingswissenschaftlicher Empfehlungen als deutlich zu niedrig angesehen werden muss, um optimale Anpassungseffekte durch das Widerstandstraining hervorrufen zu können (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 13; González-Badillo et al., 2022).

Die bislang dargelegten Äußerungen machen deutlich, dass sich die intraserielle muskuläre Ermüdung weder durch den prozentbasierten noch durch einen subjektiven Ansatz der Belastungssteuerung mit zufriedenstellender Präzision steuern lässt, weshalb nach objektiven Parametern zur Quantifizierung des Ausbelastungsgrades geforscht wurde. In diesem Kontext hat sich die Anwendung eines Ansatzes zur objektiven Steuerung der muskulären Ermüdung

auf Basis der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit als vielversprechend erwiesen (Helms et al., 2017; Morán-Navarro et al., 2019).

Aus dieser Erkenntnis hat sich der geschwindigkeitsbasierte Ansatz der Belastungssteuerung entwickelt, der primär unter der Bezeichnung Velocity Based Training bekannt ist. Im Kontext von Velocity Based Training stellt die Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung die physiologische Grundlage zur Belastungssteuerung dar (vgl. Kapitel 2.3). Gemäß der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung determiniert die Höhe des willkürlich erzeugten Krafteinsatzes, mit welcher konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit man sich gegen einen definierten Lastwiderstand bewegen kann. Im Kontext dieser Betrachtungsweise äußert sich die zunehmende muskuläre Ermüdung primär dadurch, dass die Fähigkeit zur muskulären Krafterzeugung abnimmt (Cè et al., 2020; Tornero-Aguilera et al., 2022; Zajac et al., 2015). Diese ermüdungsbedingte Reduktion der Kraftleistung innerhalb eines Trainingssatzes äußert sich, der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung folgend, als Verringerung der volitional realisierbaren konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit, weshalb die konzentrische Geschwindigkeitsreduktion als objektiver Parameter zur Quantifizierung der intraseriellen muskulären Ermüdung herangezogen werden kann (González-Badillo et al., 2017; Izquierdo et al., 2006; Morán-Navarro et al., 2019). Dementsprechend werden bei der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung nach der aktuell etablierten Vorgehensweise sogenannte Velocity Loss Thresholds (VLT in % der  $v_{max}$ ) vorgegeben, die das angestrebte Ausmaß der muskulären Ermüdung als prozentualen Geschwindigkeitsverlust in Relation zur volitional maximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit ausdrücken (Jukic, Castilla et al., 2023; Weakley et al., 2020; Weakley et al., 2021; vgl. Kapitel 2.3.2).

Obwohl die Vorgabe von Velocity Loss Thresholds zur Determinierung des Satzendes grundsätzlich als effektiv gilt (Morán-Navarro et al., 2017; Rodríguez-Rosell et al., 2020), birgt dieser Steuerungsansatz beträchtliche Limitationen der praktischen Anwendbarkeit, da die Erzeugung maximaler Krafteinsätze bzw. volitional maximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeiten für verschiedene Adressatengruppen und Zielsetzungen nicht erforderlich oder sinnvoll ist (vgl. Kapitel 2.2.4).

Bedingt durch die diesem Ansatz zugrunde liegende Voraussetzung, sich mit volitional maximalen konzentrischen Geschwindigkeiten zu bewegen, ergibt sich die anwendungsbezogene Problemstellung, dass Velocity Loss Thresholds nicht im Widerstandstraining mit volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit verwendet

werden können (Zhao et al., 2022; Zhao et al., 2023). Darüber hinaus wurden bereits in Kapitel 3.1 weitere Szenarien aufgezeigt, in denen volitional maximale Bewegungsgeschwindigkeiten sowie die Verwendung von Velocity Loss Thresholds zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung im Widerstandstraining zur Vergrößerung der Skelettmuskelmasse als suboptimal angesehen werden müssen. Beispielsweise geht aus mehreren wissenschaftlichen Untersuchungen hervor, dass die Vorgabe einer höheren VLT zur Erzeugung einer größeren intraserielle Geschwindigkeitsreduktion hinsichtlich der Erzeugung von Hypertrophieeffekten als vorteilhaft gilt (Pareja-Blanco, Alcazar, Cornejo-Daza et al., 2020; Pareja-Blanco, Alcazar, Sánchez-Valdepeñas et al., 2020; Rodiles-Guerrero et al., 2022). Darüber hinaus gelten Hypertrophieeffekte im Widerstandstraining als nahezu unabhängig von der Höhe der Belastungsintensität (>30 % 1-RM), sofern ein ausreichender Grad der intraseriellen muskulären Ermüdung sowie ein adäquates Belastungsvolumen erreicht werden (Carvalho et al., 2022; Grgic, 2020; Lacio et al., 2021; Lopez et al., 2021; Schoenfeld, Grgic et al., 2017). Gemäß der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung bedingen unterschiedlich hohe Belastungsintensitäten auch unterschiedlich hohe maximale Bewegungsgeschwindigkeiten (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). Bei kritischer Betrachtung des Steuerungsansatzes anhand der Velocity Loss Threshold ist zu erkennen, dass die Vorgaben jedoch nicht hinsichtlich der Belastungsintensität differenziert werden. Da die volitional maximale konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit als Ausgangsgröße zur Berechnung der Velocity Loss Threshold bei niedrigen Belastungsintensitäten höher ausfällt als bei hohen Lasten, müsste bei niedrigen Belastungsintensitäten folglich auch eine höhere prozentuale Geschwindigkeitsreduktion (VLT) verwendet werden, um einen ausreichenden Grad der intraseriellen muskulären Ermüdung zu erreichen. Demgegenüber resultiert die undifferenzierte Verwendung der gleichen Velocity Loss Threshold im Widerstandstraining mit unterschiedlichen Belastungsintensitäten darin, dass insbesondere bei niedrigen Intensitäten eine geringere intraserielle Ermüdung erzeugt wird als bei Anwendung der gleichen VLT auf das Widerstandstraining mit höheren Intensitäten. Anhand dieses exemplarischen Szenarios wird ersichtlich, dass der derzeit etablierte Ansatz der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung anhand der VLT dem aktuellen Kenntnisstand zur Relevanz der intensitätsspezifischen Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens im Widerstandstraining zur Vergrößerung der Skelettmuskelmasse widerspricht (González-Badillo et al., 2022; Helms et al., 2017; Krzysztolik et al., 2019; Refalo et al., 2023).

Der adaptierte Ansatz der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung auf Basis der MVT, der innerhalb der vorliegenden Dissertation entwickelt und untersucht wurde, stellt einen anwendungsorientierten Lösungsansatz für die zuvor erläuterte Problematik des VLT-basierten Steuerungsansatzes dar. Pelland et al. (2022) schlugen hinsichtlich zukünftiger Untersuchungen vor, sich mit der Entwicklung neuer Methoden zur individualisierten Quantifizierung der Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens zu befassen. Einhergehend mit dieser Forderung ist der MVT-basierte Ansatz potenziell dazu in der Lage, den erforderlichen Grad der intraseriellen muskulären Ermüdung im Widerstandstraining zur Vergrößerung der Skelettmuskelmasse, unabhängig von der Notwendigkeit zur Erzeugung volitional maximaler Bewegungsgeschwindigkeiten, zu steuern, indem ausrichtungsspezifische Zielkorridore der RSVT vorgegeben werden.

### 6.3 Limitationen der Untersuchung

Wie in jeder empirischen Untersuchung unterliegen auch die Forschungsergebnisse dieses Promotionsprojekts gewissen Limitationen, die deren Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit einschränken. In diesem Teil der Diskussion werden daher die Limitationen der vorliegenden Untersuchung ausführlich erläutert und deren Bedeutung hinsichtlich der Aussagekraft der gewonnenen Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen aufgezeigt.

Da die RSVT außerhalb dieser Dissertation bislang in keiner anderen bekannten Forschungsarbeit definiert oder untersucht wurde, kann der adaptierte geschwindigkeitsbasierte Steuerungsansatz auf Basis der RSVT respektive der MVT als Novum im Kontext der trainingswissenschaftlichen Forschung angesehen werden, weshalb logischerweise keine wissenschaftlichen Untersuchungen zum direkten Vergleich herangezogen werden konnten. Daher muss als übergeordnete Limitation dieser Untersuchung erwähnt werden, dass keinerlei wissenschaftliche Studien zur Interpretation und Diskussion der Ergebnisse oder zur vergleichenden Einordnung in den aktuellen Forschungsstand vorhanden sind. Daher können die gewonnenen Erkenntnisse lediglich als erstes Indiz für eine Eignung der RSVT im Rahmen des adaptierten Ansatzes zur geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining mit submaximalen Geschwindigkeiten gelten.

Aus demselben Grund kann zum jetzigen Zeitpunkt auch noch keine Aussage zur generellen Effektivität dieses neu entwickelten Steuerungsansatzes getroffen oder dessen Effektivität mit anderen geschwindigkeitsbasierten sowie traditionellen Steuerungsansätzen im Widerstandstraining verglichen werden. Es ist derzeit nicht bekannt, ob die geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung anhand der RSVT zu größeren, vergleichbaren oder geringeren Trainingseffekten führt wie ein Widerstandstraining, das nach einem bereits etablierten Ansatz gesteuert wird. Der praktischen Erprobung dieses MVT-basierten Ansatzes sowie der wissenschaftlichen Erforschung seiner Wirksamkeit sollte demnach ein besonderer Stellenwert im Kontext zukünftiger Untersuchungen beigemessen werden. Hierzu sind weitere Studien mit unterschiedlichen Zielgruppen (Trainingsausrichtungen, Trainingszustände etc.) sowie unterschiedlichen Belastungsintensitäten und Zielsetzungen dringend erforderlich.

Hinsichtlich der untersuchten Probandenstichproben muss darauf hingewiesen werden, dass es sich um sogenannte nicht-probabilistische Stichproben handelt. Da es sich dabei um Personen aus definierten Subpopulationen handelt, die sich schon allein durch ihre Bereitschaft bzw. Motivation zur Studienteilnahme in gewisser Weise von der Gesamtheit der potenziell verfügbaren leistungs- sowie fitness- und gesundheitsorientiert trainierenden Personen abheben, kann bei der Datenauswertung und -interpretation nicht von tatsächlichen Zufallsstichproben ausgegangen werden. Demzufolge dürfen die in dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse nicht unreflektiert auf die Allgemeinheit übertragen werden, sondern gelten lediglich für solche Personen, deren Eigenschaften den in Kapitel 4.1.1 definierten Probandenstichproben entsprechen (Döring & Bortz, 2015, S. 300). In diesem Kontext ist beispielsweise als Einschränkung anzumerken, dass keine Aussage zur Anwendbarkeit des MVT-basierten Steuerungsansatzes bei untrainierten Personen getroffen werden kann, da die Untersuchung zwar fitness- und gesundheitsorientierte Personen im detrainierten Zustand einschließt, welche aufgrund ihrer vor der Trainingsunterbrechung bereits erworbenen Trainingserfahrung allerdings nicht mit untrainierten Personen gleichgesetzt werden dürfen. Gleiches gilt hinsichtlich leistungsorientierter Kraftsportler im detrainierten Zustand, da ein solches Probandenkollektiv innerhalb dieser Untersuchung ebenfalls nicht betrachtet wurde. Dementsprechend können die Untersuchungsergebnisse für die betrachteten Personengruppen zwar als intern valide bezeichnet werden, jedoch gilt die externe Validität der Erkenntnisse und Schlussfolgerungen aufgrund der erläuterten Umstände derzeit als limitiert (Fröhlich et al., 2020, S. 30).

Eine weitere Limitation der vorliegenden Untersuchung findet sich bei Betrachtung der Stichprobengrößen. Kleinere Stichproben werden in der quantitativen Forschung insbesondere mit einer geringeren Repräsentativität bzw. mit einer eingeschränkten Gültigkeit der Ergebnisse in Verbindung gebracht, weshalb die Umfänge der untersuchten Personengruppen kritisch betrachtet werden müssen (Fröhlich et al., 2020, S. 35–37). Die Rekrutierung einer größeren Personenanzahl in der fitnessorientierten Stichprobe im detrainierten Zustand war unter der Berücksichtigung der definierten Ein- und Ausschlusskriterien zum Zeitpunkt der ersten Teilerhebung aufgrund der damals geltenden Umstände (COVID19-Pandemie) nicht ohne vertretbaren Aufwand möglich. Da dieselbe Probandenstichprobe in der zweiten Teilerhebung nach Wiederaufnahme des regelmäßigen Krafttrainings (FKT<sub>trainiert</sub>) erneut getestet werden sollte, war auch eine nachträgliche Rekrutierung nicht möglich, wodurch die

in Kapitel 4.1.1 erläuterten Drop-outs nicht nachträglich ausgeglichen werden konnten. Ebenso war die Rekrutierung einer größeren Anzahl leistungsorientierter Kraftsportler zum Zeitpunkt der dritten Teiluntersuchung nicht möglich, da die Grundgesamtheit der potenziell zur Verfügung stehenden Personen aufgrund der spezifischen Voraussetzungen ohnehin von geringer Größe war und sich ein nicht unbeträchtlicher Anteil dieser Personen aufgrund individueller Umstände (Wettkampfvorbereitung, Diätphasen, Unterbrechung der Trainingsgewohnheiten etc.) nicht als Probanden in dieser Untersuchung zur Verfügung stellen wollte.

Auf die Verwendung von Mehrfachwahrscheinlichkeitssimulationen, z. B. nach der Monte Carlo Methode (Janssen & Laatz, 2017, S. 693–694), zur Verbesserung der Vorhersagekraft der berechneten Regressionen wurde verzichtet, um eine höhere interne Validität zu gewährleisten. Eine statistisch-rechnerische Vergrößerung der Stichproben hätte zwar die externe Validität potenziell positiv beeinflussen können, allerdings war in dieser Untersuchung primär von Bedeutung, eine erste Einschätzung zur Eignung der RSVT als Steuerungsparameter innerhalb der betrachteten Probandenstichproben vorzunehmen, weshalb die Entscheidung zugunsten einer höheren internen Validität gefällt wurde.

Eine potenzielle Begrenzung der Untersuchung kommt zusätzlich durch die Betrachtung mischgeschlechtlicher Personengruppen in der fitness- und gesundheitsorientierten Stichprobe im Vergleich zu einer rein männlichen Personengruppe in der leistungsorientierten Stichprobe zustande. Zwar wurde im Rahmen der dritten Voruntersuchung (vgl. Kapitel 4.2.3) weder ein geschlechtsspezifischer Einfluss auf die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) noch auf die MVT festgestellt, allerdings kann dies nicht zweifelsfrei als Beleg dafür angesehen werden, dass keine geschlechtsspezifischen Einflüsse bei fitness- und gesundheitsorientierten Personen im detrainierten Zustand oder bei leistungsorientierten Personen bestehen. Da für die leistungsorientierte Probandenstichprobe ausschließlich männliche Personen in ausreichender Zahl rekrutiert werden konnten, war die Überprüfung einer möglichen Beeinflussung von RSVT und MVT durch das Geschlecht nicht möglich. Aus diesem Grund kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine zusätzliche Betrachtung von weiblichen Probanden mit leistungsorientierter Ausrichtung des Trainings zu einer anderen Beobachtung geführt hätte als in der fitness- und gesundheitsorientierten Stichprobe. Demzufolge muss der angegebene Zielkorridor der RSVT für leistungsorientierte

Personen dahingehend als limitiert betrachtet werden, dass er nicht ohne Weiteres auf das Widerstandstraining weiblicher Trainierender anwendbar ist. Darüber hinaus wäre es aufgrund der zuvor erläuterten Einschränkungen in Verbindung mit der insgesamt recht geringen Stichprobengröße als sinnvoll anzusehen, die Überprüfung von geschlechtsspezifischen Unterschieden auf die MVT und RSVT erneut mit größeren Probandenstichproben zu untersuchen, um die Geschlechtsunabhängigkeit der MVT und RSVT zu validieren und präzisere Schlussfolgerungen zur Eignung der RSVT als Steuerungsparameter bei mischgeschlechtlichen Probandenstichproben zu ermöglichen.

Bei genauerer Betrachtung des Untersuchungsablaufs (vgl. Kapitel 4.1.2) offenbaren sich weitere mögliche Limitationen der Untersuchung. Da die Probanden zur Datenerhebung neben dem Bankdrücken mit der Langhantel auch das Kreuzheben mit der Langhantel sowohl mit volitional maximaler als auch mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit ausführen sollten, wurde zur Kontrolle von möglicherweise auftretenden Reihenfolgeeffekten eine Randomisierung der Übungs- und Ausführungsreihenfolge ( $v_{sub}$  &  $v_{max}$ ) vorgenommen. Da in der ersten Voruntersuchung (vgl. Kapitel 4.2.1) eine unzureichende Messgenauigkeit der verwendeten Inertialsensoreinheit bei der Übung Kreuzheben mit der Langhantel festgestellt werden konnte, wurden die dabei erhobenen Daten von der weiteren Auswertung, Darstellung und Interpretation ausgeschlossen. Aufgrund des Ausschlusses dieser Übung wurden auch keine statistischen Verfahren zur Quantifizierung des potenziellen Einflusses der Übungsreihenfolge berechnet. Nach zwei ausbelastenden Testsätzen der Übung Kreuzheben mit der Langhantel kann allerdings ein gewisses Ausmaß der muskulären und zentralnervösen Ermüdung angenommen werden (Barnes, Miller, Reeve & Stewart, 2019; Tornero-Aguilera et al., 2022), das die Messwerte beim Bankdrücken mit der Langhantel möglicherweise verzerren könnte. Basierend auf diesen Überlegungen kann ein störender Einfluss der Übungsreihenfolge auf MVT und RSVT, insbesondere bei denjenigen Probanden, die das Bankdrücken nach dem Kreuzheben ausführen sollten, trotz Randomisierung, ausreichend langen Belastungspausen und unterschiedlichen beanspruchten Muskelgruppen bei den Testübungen nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Die erläuterten Limitationen gelten unter Berücksichtigung der in den Kapiteln 2.2.3 und 2.3.2 vorgestellten Inhalte gleichermaßen für mögliche Störeinflüsse der muskulären Ermüdung bei subsequent ausgeführten Trainingssätzen der gleichen Übung.

Daraus ergibt sich für weitere Studien der bedeutsame Forschungsbedarf, den Einfluss der durch subsequent ausgeführte Übungen und Trainingssätze hervorgerufenen Ermüdungsakkumulation auf die MVT sowie die MV zu untersuchen, um präzisere Aussagen zur übungsspezifischen Gültigkeit der RSVT und der definierten Zielkorridore zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung treffen zu können.

Eine Limitation, die für die Übertragbarkeit der in diesem Promotionsprojekt gewonnenen Erkenntnisse in die Trainingspraxis von besonderer Relevanz ist, besteht darin, dass sich die Untersuchung lediglich auf die Ausführung der Übung Bankdrücken bezog. In thematischer Verbundenheit mit den zuvor erläuterten Grenzen des Untersuchungsdesigns sowie unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.3.2 dargestellten übungsspezifischen Unterschiede der MVT (Helms et al., 2017; Sánchez-Medina et al., 2014; Weakley et al., 2021) muss davon ausgegangen werden, dass sich bei anderen Übungen möglicherweise auch unterschiedliche Werte der RSVT bei RIR3-RIR1 beobachten lassen. Diesbezüglich wurde bereits festgestellt, dass sich die MV der Übungen Kniebeuge und Bankdrücken mit der Langhantel in unterschiedlichen Raten reduziert (Izquierdo et al., 2006). Da diese Reduktionen der MV allerdings in Relation zur volitional maximalen Bewegungsgeschwindigkeit (VLT) festgestellt wurden, darf diese Beobachtung nicht unreflektiert auf den MVT-basierten Ansatz bei volitional submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten übertragen werden und stellt demzufolge auch kein klares Indiz für das Vorhandensein übungsspezifischer RSVT-Werte dar. Nichtsdestotrotz zeigen die Ergebnisse von Izquierdo et al. (2006) die Notwendigkeit zur Untersuchung der RSVT bei anderen Übungen auf.

Ein weiteres Argument hierfür ist, dass die ROM bei der untersuchten Übung Bankdrücken mit der Langhantel aufgrund der bewegungsbedingt natürlich vorgegebenen Endpunkte sehr gut standardisierbar ist, weshalb Übungen ohne natürlich vorgegebene Endpunkte der Bewegung hinsichtlich der Einhaltung des vorgegebenen Bewegungsumfangs überwacht werden müssen, damit repräsentative Werte der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit zur Steuerung der muskulären Ermüdung gemessen werden können. Dies liegt darin begründet, dass die zur Geschwindigkeitsmessung verwendete Inertialsensoreinheit sowie alle anderen gängigen

Messsysteme die Umkehrpunkte der Bewegungsrichtung als Indikator für die Endpunkte des Bewegungsumfangs verwenden. Wird während der konzentrischen Bewegungsphase die Hantel entgegen der intendierten Bewegungsrichtung abgesenkt und danach in die eigentliche Endposition weiterbewegt, so werden die Bewegungsabschnitte vor und nach dem Absenken der Hantel als eigenständige Wiederholungen erfasst, was die Messung der Bewegungsgeschwindigkeit der gesamten Wiederholung verzerrt.

Aus den genannten Gründen sollten die in dieser Untersuchung festgestellten Werte der RSVT sowie die daraus abgeleiteten Zielkorridore erst für andere Übungen erhoben und miteinander verglichen werden, bevor die in Kapitel 6.2.4 abgeleiteten ausrichtungsspezifischen Zielkorridore der RSVT zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung bei anderen Trainingsübungen als dem Bankdrücken mit der Langhantel verwendet werden. Die bislang nicht untersuchte Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Übungen muss demnach als eine der zentralen Limitationen der Untersuchung angesehen werden und zeigt ein wichtiges Forschungsdesiderat auf, das in zukünftigen Studien adressiert werden sollte, bevor der adaptierte Ansatz der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung auf Basis der MVT in der Trainingspraxis sinnvoll angewendet werden kann.

Im Kontext der Limitationen dieser Untersuchung muss neben den zuvor genannten Aspekten kritisch hinterfragt werden, inwiefern sich die gewonnenen Erkenntnisse zum MVT-basierten Steuerungsansatz auf das Widerstandstraining mit unterschiedlichen Intensitäten übertragen lassen. Aus einer Studie von Izquierdo et al. (2006) geht hervor, dass die individuelle MVT einer Person bei der Ausführung einer bestimmten Übung auch bei Verwendung unterschiedlicher Belastungsintensitäten keine Unterschiede aufweist, was durch die Ergebnisse einer aktuelleren Untersuchung von Rodríguez-Rosell et al. (2020) repliziert werden konnte. Demzufolge ist die MVT einer bestimmten Übung als unabhängig davon anzusehen, ob diese Übung mit maximaler Intensität (100% 1-RM) oder einer deduzierten submaximalen Intensität (% 1-RM) ausgeführt wird. Obwohl sich die MVT-Werte unterschiedlicher Belastungsintensitäten nicht signifikant voneinander unterscheiden, muss die RSVT dadurch allerdings nicht zwingend auch intensitätsunabhängig sein, da unterschiedliche Ermüdungsursachen zumindest in der Theorie auch unterschiedliche Einflüsse auf die MV haben könnten (vgl. Kapitel 2.2.3). Unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.3 erläuterten Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung sowie den bisherigen Erkenntnissen zur

geschwindigkeitsbasierten Steuerung der muskulären Ermüdung aus Kapitel 2.3.2 kann allerdings davon ausgegangen werden, dass sich die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit unabhängig von der verwendeten Belastungsintensität ab einer bestimmten Nähe zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens aufgrund der fortschreitenden Ermüdung nicht mehr willkürlich steuern lässt, auch wenn die initiale Bewegungsgeschwindigkeit innerhalb eines Trainingssatzes nicht volitional maximal ist (Gentil et al., 2018). Hinsichtlich dieses potenziellen Einflusses der Belastungsintensität auf die RSVT kann basierend auf den vorliegenden Untersuchungsergebnissen allerdings keine genauere Aussage getroffen werden, da ausschließlich die Belastungsintensität von 75 % 1-RM untersucht wurde. Aus diesem Grund sollten sich weitere Untersuchungen mit der Fragestellung befassen, ob die MV im Widerstandstraining mit volitional submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Belastungsintensitäten auch erst bei unterschiedlich starker Annäherung an den Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens unwillkürlich absinkt. Dies könnte dazu beitragen, herauszufinden, ob der Verlauf der intraseriellen Geschwindigkeitsreduktion bis zur MVT bei verschiedenen Intensitäten unterschiedlich steil ist und ob dementsprechend unterschiedliche RSVT-Werte zur intensitätsabhängigen Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung erforderlich wären. Auf Grundlage der zuvor dargestellten Überlegungen kann eine Einflussnahme der Belastungsintensität auf die RSVT jedoch als eher unwahrscheinlich angesehen werden, auch wenn diese potenzielle Limitation aufgrund der insuffizienten Studienlage hierzu nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann.

Als übergeordnete Limitation dieser Untersuchung kann festgehalten werden, dass die Erkenntnisse zum MVT-basierten Steuerungsansatz sowie zu den ausrichtungsspezifischen RSVT-Zielkorridoren bislang nur für die Übung Bankdrücken mit der Langhantel im Widerstandstraining mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit und einer Belastungsintensität von 75 % 1-RM gültig sind. Zur Ausweitung des Gültigkeitsbereichs der gewonnenen Erkenntnisse sowie zur Erforschung der Effektivität dieses neuen Steuerungsansatzes sind weitere Untersuchungen erforderlich.

---

VII  
FAZIT

---

Velocity Based Training ist ein moderner Ansatz zur Belastungssteuerung im Widerstandstraining, der die volitional maximale konzentrische Durchschnittsgeschwindigkeit gegen einen bestimmten Lastwiderstand zur Steuerung der Belastungsintensität sowie das Ausmaß der intraseriellen konzentrischen Geschwindigkeitsreduktion zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung verwendet (Weakley et al., 2021). Dieser geschwindigkeitsbasierte Steuerungsansatz bietet deutliche Vorteile gegenüber dem traditionellen last- bzw. prozentbasierten Ansatz, bei dem einerseits die Belastungsintensität über die relative Höhe der Last definiert wird und andererseits die Belastungsdauer über die Anzahl der Wiederholungen vorgegeben wird. Die Eignung dieses prozentbasierten Ansatzes gilt hinsichtlich seiner Fähigkeit zur Steuerung des Grades der muskulären Ermüdung als sehr ungenau, da der Zusammenhang zwischen der realisierbaren Wiederholungszahl und vorgegebenen Lasthöhe zahlreiche inter- und intraindividuelle Unterschiede aufweist (Fröhlich & Kemmler, 2020, S. 10–11).

Demgegenüber ermöglicht die Verwendung der konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit als zentraler Steuerungsparameter eine autoregulative Anpassung der Trainingsbelastung an tagesformabhängige Schwankungen der Leistungsfähigkeit sowie die Quantifizierung der intraseriellen muskulären Ermüdung. Demzufolge gilt Velocity Based Training nach aktuellem Kenntnisstand als einziger Ansatz, der eine objektive Steuerung der Beanspruchung im Widerstandstraining möglich macht. Die exakte Steuerung des Grades der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes ist deshalb von Bedeutung, da im Widerstandstraining einerseits ein gewisses Ausmaß der neuromuskulären sowie zellulären Beanspruchung erforderlich ist, um spezifische Anpassungsprozesse auszulösen, andererseits eine zu starke Beanspruchung aber auch negative Auswirkungen auf den Regenerationsbedarf, das Ausmaß der Trainingseffekte, die Trainingsadhärenz und die Verletzungsgefahr haben kann (Krzysztofik et al., 2019; Refalo et al., 2022; Refalo et al., 2023).

Um den Grad der intraseriellen muskulären Ermüdung zu steuern, wird nach dem aktuell etablierten Ansatz der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining das gewünschte Ausmaß der prozentualen konzentrischen Geschwindigkeitsreduktion (Velocity Loss Threshold; [VLT]) in Relation zur volitional maximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit als Referenzgröße ausgedrückt (González-Badillo et al., 2017; Morán-Navarro et al., 2019). Die diesem Ansatz inhärente Grundvoraussetzung, sich mit volitional maximalen konzentrischen Geschwindigkeiten zu bewegen, führt jedoch dazu, dass

die Steuerung der muskulären Ermüdung auf Basis der relativen Geschwindigkeitsreduktion nicht umsetzbar ist, wenn man sich im Widerstandstraining mit volitional submaximaler Geschwindigkeit bewegt (Zhao et al., 2022; Zhao et al., 2023).

Da maximale Bewegungsgeschwindigkeiten sowohl zur Auslösung von Hypertrophieeffekten als auch für Personen mit geringer Trainingserfahrung oder gesundheitsorientierter Trainingsausrichtung als suboptimal angesehen werden können, muss die Sinnhaftigkeit von Velocity Based Training im Sinne des derzeit etablierten Ansatzes für die genannten Anwendungsfälle kritisch betrachtet werden.

Die Minimum Velocity Threshold (MVT) beschreibt die durchschnittliche konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der letzten vollständig ausführbaren Wiederholung eines ausbelastenden Trainingssatzes (Caven et al., 2020; Fernandes et al., 2021).

Da die MVT als lastunabhängige, übungsspezifische Kenngröße der maximalen muskulären Ermüdung gilt und außerdem nicht von der Erzeugung volitional maximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeiten abhängig ist, besitzt sie das Potenzial, als zentraler Parameter zur last- und geschwindigkeitsunabhängigen Steuerung des muskulären Ermüdungsgrades verwendet werden zu können (Izquierdo et al., 2006; Rodríguez-Rosell et al., 2020; Sánchez-Medina et al., 2014).

Aus den genannten Gründen befasste sich dieses Promotionsprojekt mit der übergeordneten Forschungsfrage, ob sich ein adaptierter Ansatz der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung im Widerstandstraining auf Basis der MVT, der eine „Relative Stopping Velocity Threshold“ ([RSVT], berechnet als Vielfaches der MVT in Prozent) zur objektiven Autoregulation der Belastungsdauer verwendet, dazu eignet, den Grad der muskulären Ermüdung innerhalb eines Trainingssatzes mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit zu steuern.

Zur Beantwortung dieser übergeordneten Forschungsfrage wurde eine explanative, prospektive Untersuchung im quasiexperimentellen Design mit nicht-probabilistischer Stichprobenziehung durchgeführt. Dabei wurde für alle Probanden an einem ersten Termin die individuelle dynamische Maximalkraftleistung (1-RM) für die Langhantelübungen Bankdrücken und Kreuzheben ermittelt und an einem zweiten Termin die eigentliche Testung durchgeführt. An diesem zweiten Testtermin wurde pro Übung jeweils ein Testsatz mit volitional maximaler und ein Testsatz mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit bei

einer standardisierten Belastungsintensität von 75 % 1-RM ausgeführt, während die konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit der einzelnen Wiederholungen mittels einer Inertialsensoreinheit erfasst wurde, um die ermüdungsbedingte Geschwindigkeitsreduktion der Wiederholungen am Ende eines ausbelastenden Testsatzes (RIR3-1 sowie RIR0 bzw. MVT) zu untersuchen. Sowohl die Reihenfolge der Übungsausführung als auch die Reihenfolge der verwendeten volitionalen Bewegungsgeschwindigkeiten wurde balanciert randomisiert.

Um den Einfluss der Trainingsausrichtung auf die beobachteten Geschwindigkeitsverläufe feststellen zu können, wurden in der einen Gruppe Personen mit allgemein fitness- und gesundheitsorientierter Ausrichtung (FKT) und in der anderen Gruppe Personen mit leistungsorientierter Ausrichtung (LKT) des Krafttrainings rekrutiert. Darüber hinaus wurde die fitnessorientierte Probandengruppe (FKT) zunächst im detrainierten Zustand nach einer mindestens dreimonatigen Einschränkung des Krafttrainings (FKT<sub>detrainiert</sub>) und in einer zweiten Erhebungswelle nach mindestens sechsmonatiger Wiederaufnahme des regelmäßigen Krafttrainings (FKT<sub>trainiert</sub>) getestet, um den Einfluss des Trainingszustandes auf die beobachteten Geschwindigkeitsverläufe zu untersuchen. Die Testung der leistungsorientierten Personen fand demgegenüber ausschließlich im trainierten Zustand (LKT<sub>trainiert</sub>) statt.

Als Antwort auf die übergeordnete Forschungsfrage dieser Untersuchung kann festgehalten werden, dass sich die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit (RSVT) grundsätzlich zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung im Widerstandstraining mit volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit eignet, da in allen Stichproben eine signifikante Reduktion der RSVT zwischen RIR3 und RIR1 festgestellt wurde.

Eine differenzierte Betrachtung der RIR-spezifischen RSVT-Werte zeigte allerdings, dass sich die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit nicht in allen untersuchten Probandenstichproben eindeutig zwischen RIR3 und RIR2 sowie zwischen RIR2 und RIR1 abgrenzen lässt. Gemeinsam mit den Erkenntnissen aus den Korrelations- und Regressionsanalysen kann hinsichtlich der Eignung des MVT-basierten Ansatzes zur Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung geschlussfolgert werden, dass durch die uneindeutige Abgrenzung der RSVT-Bereiche zwischen RIR3, RIR2 und RIR1 sowie der zu geringen Erklärungskraft der berechneten Regressionsmodelle keine klare Vorhersage der RSVT möglich ist. Demzufolge kann diesem adaptierten Ansatz der geschwindigkeitsbasierten

Belastungssteuerung anhand der RSVT auch keine ausreichende Präzision bei der Steuerung des Ausbelastungsgrades im Sinne einer konkreten Anzahl verbleibender Wiederholungen bis zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens attestiert werden.

Die Vergleiche der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten zwischen  $FKT_{\text{trainiert}}$  und  $LKT_{\text{trainiert}}$  weisen auf die Notwendigkeit zur Verwendung ausrichtungsspezifischer Werte der RSVT hin, da die RSVT-Werte bei RIR3, RIR2 und RIR1 in der leistungsorientierten Probandenstichprobe signifikant höher waren als in der fitness- und gesundheitsorientierten Personengruppe, was möglicherweise auf die Höhe der ausrichtungsspezifischen MVT-Werte zurückzuführen ist. Eine möglichst präzise Kategorisierung der Trainingsausrichtung ist unter Berücksichtigung der hier gewonnenen Erkenntnisse von kritischer Relevanz, um individuell passende Referenzwerte der RSVT für die geschwindigkeitsbasierte Steuerung der intraseriellen muskulären Ermüdung nach dem hier untersuchten adaptierten Ansatz zu verwenden. Ein Einfluss des Trainingszustandes konnte bei der vergleichenden Betrachtung der RSVT-Werte in der fitness- und gesundheitsorientierten Stichprobe im trainierten und detrainierten Zustand nicht festgestellt werden. Die relative konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit kann demzufolge zwar einerseits als ausrichtungsspezifisch, jedoch andererseits als unabhängig vom Trainingszustand angesehen werden.

Wie bereits zuvor geschlussfolgert wurde, ist die exakte Differenzierung der Anzahl ausführbarer Wiederholungen bis zum konzentrischen Muskelversagen nur eingeschränkt anhand der RSVT-Werte möglich, da sich einerseits nicht zwischen allen betrachteten Wiederholungspaaren signifikante Unterschiede der RSVT gezeigt haben und die Regressionsanalysen andererseits keine ausreichende Erklärungskraft der betrachteten Vorhersagemodelle aufzeigen konnten. Von dem Versuch, die intraserielle muskuläre Ermüdung im Sinne einer exakten Anzahl noch ausführbarer Wiederholungen (RIR) durch die Vorgabe einer konkreten RSVT steuern zu wollen, sollte daher Abstand genommen werden, bis weitere Daten erhoben wurden, anhand denen eine solche Vorgehensweise möglicherweise legitimiert werden könnte.

Auch wenn eine exakte Steuerung der Annäherung an das Muskelversagen anhand der RSVT bislang nicht möglich zu sein scheint, wurde die RSVT-Reduktion im Annäherungsbereich von RIR3 bis RIR1 aufgrund der starken bis sehr starken Zusammenhänge zwischen RSVT und RIR

als grundsätzlich zur Steuerung des Ausbelastungsgrades geeignet bewertet. Die nicht zufriedenstellende Differenzierbarkeit der RIR-spezifischen RSVT-Mittelwerte macht allerdings alternative Betrachtungsweisen erforderlich, weshalb die Konfidenzintervalle der RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1 als Datengrundlage herangezogen wurden, um ausrichtungsspezifische Zielkorridore statt exakter Zielwerte der RSVT zur Steuerung eines adressatenspezifisch angemessenen Ausbelastungsgrades abzuleiten.

Anhand der 95 %-Konfidenzintervalle der RSVT bei RIR3, RIR2 und RIR1 wurde für fitness- und gesundheitsorientierte Personen ein RSVT-Zielkorridor abgeleitet, der einer relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit von RSVT = 171,4 - 186,6 % MVT entspricht. Führt man einen Satz Bankdrücken mit der Langhantel mit einer Belastungsintensität von 75 % 1-RM und volitional submaximaler konzentrischer Bewegungsgeschwindigkeit so lange aus, bis die durchschnittliche konzentrische Bewegungsgeschwindigkeit einer Wiederholung (MV) ermüdungsbedingt in diesen Zielkorridor absinkt, sollten noch zwei bis drei weitere Wiederholungen ausführbar sein, bevor der Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens erreicht wird. Aufgrund der nicht feststellbaren Einflüsse des Trainingszustandes auf die RSVT und MVT ist der hier dargestellte Zielkorridor übergeordnet für fitness- und gesundheitsorientierte Personen im detrainierten oder untrainierten Zustand anwendbar.

Auf Grundlage der 95 %-Konfidenzintervalle der RIR-spezifischen RSVT-Werte wurde für leistungsorientierte Personen im trainierten Zustand ein RSVT-Zielkorridor von RSVT = 183,8 - 211,3 % MVT abgeleitet. Sinkt die gemessene MV einer Wiederholung ermüdungsbedingt in diesen Zielkorridor, kann mit vertretbarer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass noch eine bis zwei weitere Wiederholungen bis zum Punkt des momentanen konzentrischen Muskelversagens ausgeführt werden können.

Die Grenzwerte der erläuterten Zielkorridore wurden auf Grundlage der evidenzbasierten Empfehlungen für einen adressatenspezifischen Ausbelastungsgrad im Widerstandstraining zur Optimierung von Muskelaufbaueffekten ausgewählt. Da eine intraserielle Annäherung von mindestens drei bis vier Wiederholungen an das Muskelversagen zur Auslösung von Hypertrophieeffekten empfohlen wird (Helms et al., 2018; Krzysztofik et al., 2019) und leistungsorientierte Personen laut aktuellem Kenntnisstand einen höheren Ausbelastungsgrad

zur Optimierung der Anpassungsreaktionen benötigen als fitness- und gesundheitsorientierte Personen (Refalo et al., 2023), wurden bei der Festlegung der ausrichtungsspezifischen RSVT-Zielkorridore unterschiedliche Ausbelastungsgrade angestrebt.

Entsprechend der zentralen Erkenntnisse dieser Dissertation können für die praktische Anwendung des MVT-basierten Steuerungsansatzes im Muskelaufbautraining mit volitional submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten folgende Handlungsempfehlungen formuliert werden (Abb. 62), wobei die Verwendung eines geeigneten Messsystems zur Erfassung der konzentrischen Durchschnittsgeschwindigkeit (MV) als obligatorisch angesehen werden:

- Vor der ersten Trainingseinheit sollte die MVT jeder im Trainingsplan enthaltenen Übung durch einen ausbelastenden Testsatz mit beliebiger Belastungsintensität ermittelt werden. Die Gültigkeit der MVT kann durch weitere Testsätze mit gleicher oder unterschiedlicher Belastungsintensität überprüft werden.
- Anhand der Höhe des ermittelten MVT-Wertes sowie der individuellen Erfahrung mit der Realisierung maximaler oder zumindest annähernd maximaler Ausbelastungsgrade kann ein ausrichtungsspezifischer Zielkorridor der RSVT ausgewählt werden.
- In einem Trainingssatz sollten so viele Wiederholungen ausgeführt werden, bis die erfasste MV ermüdungsbedingt bzw. nicht volitional steuerbar in den Zielkorridor der RSVT absinkt. Mit einer weiteren Wiederholung sollte geprüft werden, ob die MV tatsächlich ermüdungsbedingt den RSVT-Zielkorridor erreicht hat.
- Liegt die MV dieser Wiederholung wieder außerhalb des Zielkorridors, kann angenommen werden, dass die MV nicht ermüdungsbedingt, sondern motivationsbedingt zustande kam. In diesem Fall werden weitere Wiederholungen ausgeführt, bis die MV erneut in den Korridor absinkt.
- Sinkt die MV dieser Wiederholung weiter ab, so wird dies als Abbruchsignal verwendet. Dadurch kann ein ausreichendes Maß der intraserialen muskulären Ermüdung sichergestellt und gleichzeitig das konzentrische Muskelversagen vermieden werden.



Abb. 62: Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen zum MVT-basierten Steuerungsansatz

Der innerhalb dieses Promotionsprojektes entwickelte und untersuchte adaptierte Ansatz der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung ermöglicht eine Steuerung des Grades der intraseriellen muskulären Ermüdung durch die Vorgabe eines Zielkorridors der relativen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit. Dadurch, dass dieser Zielkorridor der RSVT nicht auf Grundlage der volitional maximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeit berechnet, sondern in Relation zur Minimum Velocity Threshold ausgedrückt wird, ermöglicht dieser adaptierte Ansatz auch eine Anwendung im Widerstandstraining mit volitional submaximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten.

Die vorliegende Dissertation liefert durch diese Weiterentwicklung des Velocity Based Training einen adaptierten Steuerungsansatz, mit dem es erstmals möglich wird, die geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung im Widerstandstraining mit volitional submaximalen konzentrischen Bewegungsgeschwindigkeiten sinnvoll anzuwenden. Die gewonnenen Erkenntnisse können demzufolge als sinnstiftende Erweiterung des aktuellen trainingswissenschaftlichen Kenntnisstandes im Kontext von Velocity Based Training angesehen werden und bieten durch den neu entwickelten Steuerungsansatz sowie die abgeleiteten Handlungsempfehlungen zur praktischen Umsetzung sowohl aus trainingswissenschaftlicher als auch anwendungsorientierter Sicht einen Mehrwert.

Aufgrund der aufgezeigten Limitationen der Untersuchung sind jedoch weitere wissenschaftliche Studien erforderlich, um die Gültigkeit, die Übertragbarkeit sowie die Effektivität des MVT-basierten Steuerungsansatzes weiter zu erforschen. Zukünftige Studien sollten sich sowohl mit der Erforschung der RSVT bei unterschiedlichen Trainingsübungen und Belastungsintensitäten als auch mit den Einflüssen von Ermüdungs- und Reihenfolgeeffekten auf die RSVT befassen. Darüber hinaus sollten die gewonnenen Erkenntnisse durch Replikationsstudien mit größeren Probandenstichproben validiert und bei Bedarf präzisiert werden. Auch die Anwendung der RSVT auf das Widerstandstraining bei untrainierten Personen erscheint wünschenswert, um dessen potenzielle Anwendungsgebiete auszuweiten. Aufgrund neuer technischer Entwicklungen könnte Velocity Based Training zukünftig beispielsweise auch mit Smartwatches umgesetzt werden (Achermann, Oberhofer, Ferguson & Lorenzetti, 2023), weshalb auch andere Geräte zur Geschwindigkeitserfassung untersucht werden müssen, um eine Verbreitung von Velocity Based Training in unterschiedlichen Settings zu unterstützen.

Schlussendlich sollte dieser adaptierte Ansatz der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung praktisch erprobt sowie durch empirische Trainingsstudien hinsichtlich seiner Effektivität untersucht und mit anderen Steuerungsansätzen verglichen werden.

Auch unter Berücksichtigung der aufgezeigten Limitationen sowie des zukünftigen Forschungsbedarfs stellt der hier vorgestellte Steuerungsansatz eine vielversprechende Neuerung zur Belastungssteuerung im Widerstandstraining dar, der durch die theoretisch und empirisch aufgezeigten Eigenschaften potenzielle Vorteile für die Trainingspraxis besitzt und neue Ansatzpunkte für die trainingswissenschaftliche Forschung liefert.



## Literaturverzeichnis

- Achermann, B., Oberhofer, K., Ferguson, S. J. & Lorenzetti, S. R. (2023). Velocity-Based Strength Training: The Validity and Personal Monitoring of Barbell Velocity with the Apple Watch. *Sports (Basel, Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/sports11070125>
- Adams, G. R. (2006). Satellite cell proliferation and skeletal muscle hypertrophy. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme*, 31(6), 782–790. <https://doi.org/10.1139/h06-053>
- Aidar, F. J., Brito, C. J., Matos, D. G. de, Oliveira, L. A. S. de, Souza, R. F. de, Almeida-Neto, P. F. de et al. (2022). Force-velocity relationship in Paralympic powerlifting: two or multiple-point methods to determine a maximum repetition. *BMC Sports Science, Medicine & Rehabilitation*, 14(1), 159. <https://doi.org/10.1186/s13102-022-00552-9>
- Alcazar, J., Csapo, R., Ara, I. & Alegre, L. M. [Luis 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>
- Alizadeh, S., Daneshjoo, A., Zahiri, A., Anvar, S. H., Goudini, R., Hicks, J. P. et al. (2023). Resistance Training Induces Improvements in Range of Motion: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 53(3), 707–722. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01804-x>
- Allen, D. G., Lamb, G. D. & Westerblad, H. (2008). Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiological Reviews*, 88(1), 287–332. <https://doi.org/10.1152/physrev.00015.2007>
- Alt, W. & Gollhofer, A. (2023). Mechanik, Belastbarkeit, Struktur und Funktionen biologischer Materialien – Sehnen, Bänder, Knochen, Knorpel und Muskeln. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Sport* (S. 183–197). Berlin, Heidelberg: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-64695-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-64695-3_6)
- Appinio (Statista, Hrsg.). (2019). *Was nutzt Du in Deinem Fitnessstudio?* Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1136093/umfrage/genutzte-angebote-im-fitnessstudio/>

- Arbeitgeberverband Deutscher Fitness- und Gesundheits-Anlagen, Deloitte & Deutsche Hochschule für Prävention und Gesundheitsmanagement. (2020). *Eckdaten der deutschen Fitness-Wirtschaft 2020*. Hamburg: DSSV.
- Arbeitgeberverband Deutscher Fitness- und Gesundheits-Anlagen, Deloitte & Deutsche Hochschule für Prävention und Gesundheitsmanagement. (2023). *Eckdaten der deutschen Fitness-Wirtschaft 2023*. Hamburg: DSSV.
- Armstrong, R. A. (2017). Recommendations for analysis of repeated-measures designs: testing and correcting for sphericity and use of manova and mixed model analysis. *Ophthalmic & Physiological Optics : the Journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 37(5), 585–593. <https://doi.org/10.1111/opo.12399>
- Baechle, T. R. (2008). *Essentials of strength training and conditioning* (3rd ed.). Champaign, Ill: Human Kinetics.
- Baena-Marín, M., Rojas-Jaramillo, A., González-Santamaría, J., Rodríguez-Rosell, D. [David], Petro, J. L., Kreider, R. B. et al. (2022). Velocity-Based Resistance Training on 1-RM, Jump and Sprint Performance: A Systematic Review of Clinical Trials. *Sports (Basel, Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/sports10010008>
- Bagley, J. R., Denes, L. T., McCarthy, J. J., Wang, E. T. & Murach, K. A. (2023). The myonuclear domain in adult skeletal muscle fibres: past, present and future. *The Journal of Physiology*, 601(4), 723–741. <https://doi.org/10.1113/JP283658>
- Balsalobre-Fernández, C., Kuzdub, M., Poveda-Ortiz, P. & Del Campo-Vecino, J. (2016). Validity and Reliability of the PUSH Wearable Device to Measure Movement Velocity During the Back Squat Exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(7), 1968–1974. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001284>
- Balsalobre-Fernández, C., Marchante, D., Baz-Valle, E., Alonso-Molero, I., Jiménez, S. L. & Muñoz-López, M. (2017). Analysis of Wearable and Smartphone-Based Technologies for the Measurement of Barbell Velocity in Different Resistance Training Exercises. *Frontiers in Physiology*, 8, 649. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00649>
- Banyard, H. G., Tufano, J. J., Delgado, J., Thompson, S. W. & Nosaka, K. (2019). Comparison of the Effects of Velocity-Based Training Methods and Traditional 1RM-Percent-Based Training Prescription on Acute Kinetic and Kinematic Variables. *International Journal of*

- Sports Physiology and Performance*, 14(2), 246–255. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2018-0147>
- Barnes, M. J., Miller, A., Reeve, D. & Stewart, R. J. C. (2019). Acute Neuromuscular and Endocrine Responses to Two Different Compound Exercises: Squat vs. Deadlift. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(9), 2381–2387.  
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002140>
- Baylor, S. M. & Hollingworth, S. (2012). Intracellular calcium movements during excitation-contraction coupling in mammalian slow-twitch and fast-twitch muscle fibers. *The Journal of General Physiology*, 139(4), 261–272. <https://doi.org/10.1085/jgp.201210773>
- Benavides Damm, T. & Egli, M. (2014). Calcium's role in mechanotransduction during muscle development. *Cellular Physiology and Biochemistry : International Journal of Experimental Cellular Physiology, Biochemistry, and Pharmacology*, 33(2), 249–272.  
<https://doi.org/10.1159/000356667>
- Bennett, H., Arnold, J. & Davison, K. (2021). Exercising to Improve Movement Quality: Why and How. *ACSM'S Health & Fitness Journal*, 25(3), 20–27.  
<https://doi.org/10.1249/FIT.0000000000000669>
- Bernárdez-Vázquez, R., Raya-González, J., Castillo, D. & Beato, M. (2022). Resistance Training Variables for Optimization of Muscle Hypertrophy: An Umbrella Review. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4, 949021. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.949021>
- Blanca, M. J., Alarcón, R., Arnau, J., Bono, R. & Bendayan, R. (2017). Non-normal data: Is ANOVA still a valid option? *Psicothema*, 29(4), 552–557.  
<https://doi.org/10.7334/psicothema2016.383>
- Blanca, M. J., Alarcón, R., Arnau, J., Bono, R. & Bendayan, R. (2018). Effect of variance ratio on ANOVA robustness: Might 1.5 be the limit? *Behavior Research Methods*, 50(3), 937–962.  
<https://doi.org/10.3758/s13428-017-0918-2>
- Bland, J. M. & Altman, D. G. (2007). Agreement between methods of measurement with multiple observations per individual. *Journal of Biopharmaceutical Statistics*, 17(4), 571–582. <https://doi.org/10.1080/10543400701329422>
- BM Sports Technology GmbH. (2022a). *Enode Pro*. Verfügbar unter: <https://enode.ai/>

- BM Sports Technology GmbH. (2022b). *Enode Sensor*. Verfügbar unter:  
<https://enode.ai/shop/enode-sensor/>
- Borg, G. (2004). Anstrengungsempfinden und körperliche Aktivität. *Deutsches Ärzteblatt*, 101(15), A1016-1021.
- Brigatto, F. A., Lima, L. E. d. M., Germano, M. D., Aoki, M. S., Braz, T. V. & Lopes, C. R. (2022). High Resistance-Training Volume Enhances Muscle Thickness in Resistance-Trained Men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(1), 22–30.  
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003413>
- Brown, W. & Clancy, S. (2008). Translation: DNA to mRNA to Protein. *Nature Education*, 1(1), 101.
- Brumitt, J. & Cuddeford, T. (2015). Current Concepts of Muscle and Tendon Adaptation to Strength and Conditioning. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 10(6), 748–759.
- Calderón, J. C., Bolaños, P. & Caputo, C. (2014). The excitation-contraction coupling mechanism in skeletal muscle. *Biophysical Reviews*, 6(1), 133–160.  
<https://doi.org/10.1007/s12551-013-0135-x>
- Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S. & Vannozzi, G. (2018). Trends Supporting the In-Field Use of Wearable Inertial Sensors for Sport Performance Evaluation: A Systematic Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18(3). <https://doi.org/10.3390/s18030873>
- Campos, G. E., Luecke, T. J., Wendelin, H. K., Toma, K., Hagerman, F. C., Murray, T. F. et al. (2002). Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimes: specificity of repetition maximum training zones. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 88(1-2), 50–60.
- Carvalho, L., Junior, R. M., Barreira, J., Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Orazem, J. & Barroso, R. (2022). Muscle hypertrophy and strength gains after resistance training with different volume-matched loads: a systematic review and meta-analysis. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 47(4), 357–368. <https://doi.org/10.1139/apnm-2021-0515>
- Caven, E. J. G., Bryan, T. J. E., Dingley, A. F., Drury, B., Garcia-Ramos, A., Perez-Castilla, A. et al. (2020). Group versus Individualised Minimum Velocity Thresholds in the Prediction of

- Maximal Strength in Trained Female Athletes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21). <https://doi.org/10.3390/ijerph17217811>
- Cè, E., Longo, S., Limonta, E., Coratella, G., Rampichini, S. & Esposito, F. (2020). Peripheral fatigue: new mechanistic insights from recent technologies. *European Journal of Applied Physiology*, 120(1), 17–39. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04264-w>
- Çetin, O., Akyildiz, Z., Demirtaş, B., Sungur, Y., Clemente, F. M., Cazan, F. et al. (2022). Reliability and validity of the multi-point method and the 2-point method's variations of estimating the one-repetition maximum for deadlift and back squat exercises. *PeerJ*, 10, e13013. <https://doi.org/10.7717/peerj.13013>
- Chaillou, T., Kirby, T. J. & McCarthy, J. J. (2014). Ribosome biogenesis: emerging evidence for a central role in the regulation of skeletal muscle mass. *Journal of Cellular Physiology*, 229(11), 1584–1594. <https://doi.org/10.1002/jcp.24604>
- Clafin, D. R. [Dennis R.], Larkin, L. M., Cederna, P. S., Horowitz, J. F., Alexander, N. B., Cole, N. M. et al. (2011). Effects of high- and low-velocity resistance training on the contractile properties of skeletal muscle fibers from young and older humans. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 111(4), 1021–1030. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01119.2010>
- Clark, D. R., Lambert, M. I. & Hunter, A. M. (2012). Muscle activation in the loaded free barbell squat: a brief review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(4), 1169–1178. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31822d533d>
- Clemente, F. M., Akyildiz, Z., Pino-Ortega, J. & Rico-González, M. (2021). Validity and Reliability of the Inertial Measurement Unit for Barbell Velocity Assessments: A Systematic Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(7). <https://doi.org/10.3390/s21072511>
- Colquhoun, R. J., Gai, C. M., Aguilar, D., Bove, D., Dolan, J., Vargas, A. et al. (2018). Training Volume, Not Frequency, Indicative of Maximal Strength Adaptations to Resistance Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(5), 1207–1213. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002414>
- Conceição, M. S., Vechin, F. C., Lixandrão, M., Damas, F., Libardi, C. A., Tricoli, V. et al. (2018). Muscle Fiber Hypertrophy and Myonuclei Addition: A Systematic Review and Meta-

- analysis. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 50(7), 1385–1393.  
<https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001593>
- Cortes, N., Onate, J. & Morrison, S. (2014). Differential effects of fatigue on movement variability. *Gait & Posture*, 39(3), 888–893. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.11.020>
- Cronin, J. B. [J. B.], McNair, P. J. & Marshall, R. N. (2002). Is velocity-specific strength training important in improving functional performance? *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 42(3), 267–273.
- Cuevas-Aburto, J., Ulloa-Díaz, D., Barboza-González, P., Chirisa-Ríos, L. J. & García-Ramos, A. (2018). The addition of very light loads into the routine testing of the bench press increases the reliability of the force-velocity relationship. *PeerJ*, 6, e5835.  
<https://doi.org/10.7717/peerj.5835>
- Damas, F., Libardi, C. A. & Ugrinowitsch, C. (2018). The development of skeletal muscle hypertrophy through resistance training: the role of muscle damage and muscle protein synthesis. *European Journal of Applied Physiology*, 118(3), 485–500.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-017-3792-9>
- Dankel, S. J., Jessee, M. B., Mattocks, K. T., Mouser, J. G., Counts, B. R., Buckner, S. L. et al. (2017). Training to Fatigue: The Answer for Standardization When Assessing Muscle Hypertrophy? *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 47(6), 1021–1027.  
<https://doi.org/10.1007/s40279-016-0633-7>
- Davies, T. B., Kuang, K., Orr, R., Halaki, M. & Hackett, D. (2017). Effect of Movement Velocity During Resistance Training on Dynamic Muscular Strength: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 47(8), 1603–1617.  
<https://doi.org/10.1007/s40279-017-0676-4>
- Döring, N. & Bortz, J. (2015). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (Springer-Lehrbuch, 5 Aufl.). Berlin Heidelberg: Springer.
- Egan, B. & Zierath, J. R. (2013). Exercise metabolism and the molecular regulation of skeletal muscle adaptation. *Cell Metabolism*, 17(2), 162–184.  
<https://doi.org/10.1016/j.cmet.2012.12.012>
- Esbenshade, T. A. & Duzic, E. (2006). Overview of signal transduction. *Current Protocols in Pharmacology, Chapter 2*, Unit2.1. <https://doi.org/10.1002/0471141755.ph0201s31>

- Fernandes, J. F. T., Dingley, A. F., Garcia-Ramos, A., Perez-Castilla, A., Tufano, J. J. & Twist, C. (2021). Prediction of One Repetition Maximum Using Reference Minimum Velocity Threshold Values in Young and Middle-Aged Resistance-Trained Males. *Behavioral Sciences (Basel, Switzerland)*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/bs11050071>
- Feuerbacher, J. F., Jacobs, M. W., Dragutinovic, B., Goldmann, J.-P., Cheng, S. & Schumann, M. (2023). Validity and Test-Retest Reliability of the Vmaxpro Sensor for Evaluation of Movement Velocity in the Deep Squat. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 37(1), 35–40. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004207>
- Feuerlein, R., Näpfel, H. & Schäflein, H. (1998). *bsv Physik* (1. Aufl.). München: Bayerischer Schulbuch-Verl.
- Freitas, M. C. de, Gerosa-Neto, J., Zanchi, N. E., Lira, F. S. & Rossi, F. E. (2017). Role of metabolic stress for enhancing muscle adaptations: Practical applications. *World Journal of Methodology*, 7(2), 46–54. <https://doi.org/10.5662/wjm.v7.i2.46>
- Fritschi, R., Seiler, J. & Gross, M. (2021). Validity and Effects of Placement of Velocity-Based Training Devices. *Sports (Basel, Switzerland)*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/sports9090123>
- Fröhlich, M. (2011). Methodik des Krafttrainings - Stand der Dinge. *Die Säule*, 4, 22–24.
- Fröhlich, M. & Kemmler, W. (2020). Kraft und Krafttraining im Sport. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit* (S. 1–20). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-53386-4\\_46-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53386-4_46-1)
- Fröhlich, M. & Marschall, F. (1999). Überprüfung des Zusammenhangs von Maximalkraft und maximaler Wiederholungszahl bei deduzierten submaximalen Intensitäten. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 50(10), 311–315.
- Fröhlich, M., Mayerl, J., Pieter, A. & Kemmler, W. (2020). *Einführung in die Methoden, Methodologie und Statistik im Sport*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61039-8>
- Fröhlich, M., Schmidtbleicher, D. [D.] & Emrich, E. (2002). Belastungssteuerung im Muskelaufbautraining. Belastungsnormativ Intensität versus Wiederholungszahl. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 53(3), 79–83.
- Fukada, S.-I., Akimoto, T. & Sotiropoulos, A. (2020). Role of damage and management in muscle hypertrophy: Different behaviors of muscle stem cells in regeneration and

- hypertrophy. *Biochimica Et Biophysica Acta. Molecular Cell Research*, 1867(9), 118742.  
<https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2020.118742>
- Fukada, S.-I., Higashimoto, T. & Kaneshige, A. (2022). Differences in muscle satellite cell dynamics during muscle hypertrophy and regeneration. *Skeletal Muscle*, 12(1), 17.  
<https://doi.org/10.1186/s13395-022-00300-0>
- Fünten, K. aus der, Faude, O., Hecksteden, A., Such, U., Hornberger, W. & Meyer, T. (2023). Anatomie und Physiologie von Körper und Bewegung. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Sport* (S. 57–118). Berlin, Heidelberg: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-64695-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-64695-3_4)
- Fünten, K. aus der, Faude, O., Skorski, S. & Meyer, T. (2023). Sportmedizin. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Sport* (S. 199–245). Berlin, Heidelberg: Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-662-64695-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-64695-3_7)
- García-Ramos, A., Haff, G. G. [Guy Gregory], Pestaña-Melero, F. L. [Francisco Luis], Pérez-Castilla, A., Rojas, F. J. [Francisco Javier], Balsalobre-Fernández, C. et al. (2018). Feasibility of the 2-Point Method for Determining the 1-Repetition Maximum in the Bench Press Exercise. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(4), 474–481.  
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0374>
- García-Ramos, A., Pestaña-Melero, F. L. [Francisco L.], Pérez-Castilla, A., Rojas, F. J. [Francisco J.] & Gregory Haff, G. (2018). Mean Velocity vs. Mean Propulsive Velocity vs. Peak Velocity: Which Variable Determines Bench Press Relative Load With Higher Reliability? *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(5), 1273–1279.  
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001998>
- García-Ramos, A., Suzovic, D. & Pérez-Castilla, A. (2021). The load-velocity profiles of three upper-body pushing exercises in men and women. *Sports Biomechanics*, 20(6), 693–705.  
<https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1597155>
- Gentil, P., Marques, V. A., Neto, J. P. P., Santos, A. C. G., Steele, J., Fisher, J. et al. (2018). Using velocity loss for monitoring resistance training effort in a real-world setting. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme*, 43(8), 833–837. <https://doi.org/10.1139/apnm-2018-0011>

- Ghasemi, A. & Zahediasl, S. (2012). Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10(2), 486–489. <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>
- Giavarina, D. (2015). Understanding Bland Altman analysis. *Biochemia Medica*, 25(2), 141–151. <https://doi.org/10.11613/BM.2015.015>
- Gissel, H. (2000). Ca<sup>2+</sup> accumulation and cell damage in skeletal muscle during low frequency stimulation. *European Journal of Applied Physiology*, 83(2-3), 175–180. <https://doi.org/10.1007/s004210000276>
- Gissel, H. (2005). The role of Ca<sup>2+</sup> in muscle cell damage. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1066, 166–180. <https://doi.org/10.1196/annals.1363.013>
- Gissel, H. & Clausen, T. (2001). Excitation-induced Ca<sup>2+</sup> influx and skeletal muscle cell damage. *Acta Physiologica Scandinavica*, 171(3), 327–334. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201x.2001.00835.x>
- Gomes, G. K., Franco, C. M., Nunes, P. R. P. & Orsatti, F. L. (2019). High-Frequency Resistance Training Is Not More Effective Than Low-Frequency Resistance Training in Increasing Muscle Mass and Strength in Well-Trained Men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33 Suppl 1, S130-S139. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002559>
- Gonzalez, A. M., Ghigiarelli, J. J., Sell, K. M., Shone, E. W., Kelly, C. F. & Mangine, G. T. (2017). Muscle activation during resistance exercise at 70% and 90% 1-repetition maximum in resistance-trained men. *Muscle & Nerve*, 56(3), 505–509. <https://doi.org/10.1002/mus.25509>
- González-Badillo, J. J. [J. J.] & Sánchez-Medina, L. [L.]. (2010). Movement velocity as a measure of loading intensity in resistance training. *International Journal of Sports Medicine*, 31(5), 347–352. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1248333>
- González-Badillo, J. J. [J. J.], Sánchez-Medina, L. [Luis], Ribas-Serna, J. & Rodríguez-Rosell, D. [David]. (2022). Toward a New Paradigm in Resistance Training by Means of Velocity Monitoring: A Critical and Challenging Narrative. *Sports Medicine - Open*, 8(1), 118. <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00513-z>
- González-Badillo, J. J. [J. J.], Yañez-García, J. M., Mora-Custodio, R. & Rodríguez-Rosell, D. [David]. (2017). Velocity Loss as a Variable for Monitoring Resistance Exercise.

- International Journal of Sports Medicine*, 38(3), 217–225. <https://doi.org/10.1055/s-0042-120324>
- Greig, L., Stephens Hemingway, B. H., Aspe, R. R., Cooper, K., Comfort, P. & Swinton, P. A. (2020). Autoregulation in Resistance Training: Addressing the Inconsistencies. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 50(11), 1873–1887. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01330-8>
- Grgic, J. (2020). The Effects of Low-Load Vs. High-Load Resistance Training on Muscle Fiber Hypertrophy: A Meta-Analysis. *Journal of Human Kinetics*, 74, 51–58. <https://doi.org/10.2478/hukin-2020-0013>
- Grgic, J., Lazinica, B., Mikulic, P., Krieger, J. W. & Schoenfeld, B. J. [Brad Jon]. (2017). The effects of short versus long inter-set rest intervals in resistance training on measures of muscle hypertrophy: A systematic review. *European Journal of Sport Science*, 17(8), 983–993. <https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1340524>
- Grgic, J., Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Davies, T. B., Lazinica, B., Krieger, J. W. & Pedisic, Z. (2018). Effect of Resistance Training Frequency on Gains in Muscular Strength: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 48(5), 1207–1220. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0872-x>
- Grgic, J., Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Orazem, J. & Sabol, F. (2022). Effects of resistance training performed to repetition failure or non-failure on muscular strength and hypertrophy: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Sport and Health Science*, 11(2), 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2021.01.007>
- Gruber, M. & Giboin, L.-S. (2020). Die Motorische Einheit. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit* (S. 1–19). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-53386-4\\_58-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53386-4_58-1)
- Guerriero, A., Varalda, C. & Piacentini, M. F. (2018). The Role of Velocity Based Training in the Strength Periodization for Modern Athletes. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 3(4). <https://doi.org/10.3390/jfmk3040055>
- Hackett, D. A., Johnson, N. A., Halaki, M. & Chow, C.-M. (2012). A novel scale to assess resistance-exercise effort. *Journal of Sports Sciences*, 30(13), 1405–1413. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.710757>

- Hajj-Boutros, G., Karelis, A. D., Cefis, M., Morais, J. A., Casgrain, J., Gouspillou, G. et al. (2022). Potential mechanisms involved in regulating muscle protein turnover after acute exercise: A brief review. *Frontiers in Physiology*, *13*, 1106425.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1106425>
- Hansson, K.-A., Solbrå, A. V., Gundersen, K. & Bruusgaard, J. C. (2020). Computational Assessment of Transport Distances in Living Skeletal Muscle Fibers Studied In Situ. *Biophysical Journal*, *119*(11), 2166–2178. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2020.10.016>
- Haun, C. T., Vann, C. G., Roberts, B. M., Vigotsky, A. D., Schoenfeld, B. J. [Brad J.] & Roberts, M. D. (2019). A Critical Evaluation of the Biological Construct Skeletal Muscle Hypertrophy: Size Matters but So Does the Measurement. *Frontiers in Physiology*, *10*, 247.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00247>
- Heiss, R., Lutter, C., Freiwald, J., Hoppe, M. W. [Matthias W.], Grim, C., Poettgen, K. et al. (2019). Delayed Onset Muscle Soreness – Teil II: Therapie und Prävention. *Sportverletzung Sportschaden : Organ Der Gesellschaft Fur Orthopadisch-Traumatologische Sportmedizin*, *33*(1), 21–29. <https://doi.org/10.1055/a-0810-3516>
- Held, S., Rappelt, L., Deutsch, J.-P. & Donath, L. (2021). Valid and Reliable Barbell Velocity Estimation Using an Inertial Measurement Unit. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(17). <https://doi.org/10.3390/ijerph18179170>
- Held, S., Speer, K., Rappelt, L., Wicker, P. & Donath, L. (2022). The effectiveness of traditional vs. velocity-based strength training on explosive and maximal strength performance: A network meta-analysis. *Frontiers in Physiology*, *13*, 926972.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2022.926972>
- Helms, E. R., Byrnes, R. K., Cooke, D. M., Haischer, M. H., Carzoli, J. P., Johnson, T. K. et al. (2018). RPE vs. Percentage 1RM Loading in Periodized Programs Matched for Sets and Repetitions. *Frontiers in Physiology*, *9*, 247. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00247>
- Helms, E. R., Cronin, J., Storey, A. & Zourdos, M. C. (2016). Application of the Repetitions in Reserve-Based Rating of Perceived Exertion Scale for Resistance Training. *Strength & Conditioning Journal*, *38*(4), 42–49. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000218>
- Helms, E. R., Storey, A., Cross, M. R. [Matt R.], Brown, S. R., Lenetsky, S., Ramsay, H. et al. (2017). RPE and Velocity Relationships for the Back Squat, Bench Press, and Deadlift in

- Powerlifters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(2), 292–297.  
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001517>
- Henneman, E. (1957). Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge. *Science (New York, N.Y.)*, 126(3287), 1345–1347.  
<https://doi.org/10.1126/science.126.3287.1345>
- Henneman, E. & Olson, C. B. (1965). Relations between Structure and Function in the Design of Skeletal Muscle. *Journal of Neurophysiology*, 28, 581–598.  
<https://doi.org/10.1152/jn.1965.28.3.581>
- Henselmans, M. & Schoenfeld, B. J. [Brad J.]. (2014). The effect of inter-set rest intervals on resistance exercise-induced muscle hypertrophy. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 44(12), 1635–1643. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0228-0>
- Herda, T. J. (2022). Resistance exercise training and the motor unit. *European Journal of Applied Physiology*, 122(9), 2019–2035. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-04983-7>
- Hickmott, L. M., Chilibeck, P. D., Shaw, K. A. & Butcher, S. J. (2022). The Effect of Load and Volume Autoregulation on Muscular Strength and Hypertrophy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine - Open*, 8(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s40798-021-00404-9>
- Hill, A. H. (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>
- Hirvonen, J., Nummela, A., Rusko, H., Rehunen, S. & Härkönen, M. (1992). Fatigue and changes of ATP, creatine phosphate, and lactate during the 400-m sprint. *Canadian Journal of Sport Sciences = Journal Canadien Des Sciences Du Sport*, 17(2), 141–144.
- Hotfiel, T., Freiwald, J., Hoppe, M. W. [Matthias Wilhelm], Lutter, C., Forst, R., Grim, C. et al. (2018). Delayed Onset Muscle Soreness – Teil I: Pathogenese und Diagnostik. *Sportverletzung Sportschaden : Organ Der Gesellschaft Fur Orthopadisch-Traumatologische Sportmedizin*, 32(4), 243–250. <https://doi.org/10.1055/a-0753-1884>
- Hottenrott, K., Hoos, O., Stoll, O. & Blazek, I. (2023). Sportmotorische Fähigkeiten und sportliche Leistungen – Trainingswissenschaft. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Sport* (S. 563–634). Berlin, Heidelberg: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-64695-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-662-64695-3_15)

- Hughes, L. J., Banyard, H. G., Dempsey, A. R., Peiffer, J. J. & Scott, B. R. (2019). Using Load-Velocity Relationships to Quantify Training-Induced Fatigue. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(3), 762–773. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003007>
- IBM Corporation. (2021). *Nicht lineare Regression*. Verfügbar unter: [https://www.ibm.com/docs/de/spss-statistics/25.0.0?topic=SSLVMB\\_25.0.0/spss/regression/idh\\_nlre.htm](https://www.ibm.com/docs/de/spss-statistics/25.0.0?topic=SSLVMB_25.0.0/spss/regression/idh_nlre.htm)
- Iglesias, E., Boullosa, D. A., Dopico, X. & Carballeira, E. (2010). Analysis of factors that influence the maximum number of repetitions in two upper-body resistance exercises: curl biceps and bench press. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(6), 1566–1572. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181d8eabe>
- Impellizzeri, F. M., Marcora, S. M. & Coutts, A. J. (2019). Internal and External Training Load: 15 Years On. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(2), 270–273. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0935>
- International Powerlifting Federation. (2023). *Technical Rules Book 2023*. Verfügbar unter: <https://www.powerlifting.sport/rules/codes/info/technical-rules>
- Iversen, V. M., Norum, M., Schoenfeld, B. J. [Brad J.] & Fimland, M. S. (2021). No Time to Lift? Designing Time-Efficient Training Programs for Strength and Hypertrophy: A Narrative Review. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 51(10), 2079–2095. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01490-1>
- Izquierdo, M. [M.], González-Badillo, J. J. [J. J.], Häkkinen, K. [K.], Ibáñez, J., Kraemer, W. J. [W. J.], Altadill, A. et al. (2006). Effect of loading on unintentional lifting velocity declines during single sets of repetitions to failure during upper and lower extremity muscle actions. *International Journal of Sports Medicine*, 27(9), 718–724. <https://doi.org/10.1055/s-2005-872825>
- Janssen, J. & Laatz, W. (2017). *Statistische Datenanalyse mit SPSS*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53477-9>
- Jaric, S. [S.]. (2015). Force-velocity Relationship of Muscles Performing Multi-joint Maximum Performance Tasks. *International Journal of Sports Medicine*, 36(9), 699–704. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1547283>

- Jenkins, N. D. M., Miramonti, A. A., Hill, E. C., Smith, C. M., Cochrane-Snyman, K. C., Housh, T. J. et al. (2017). Greater Neural Adaptations following High- vs. Low-Load Resistance Training. *Frontiers in Physiology*, *8*, 331.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00331>
- Joachim Herz Stiftung. (2023). 2. Newtonsches Gesetz (Aktionsprinzip). Verfügbar unter:  
<https://www.leifiphysik.de/mechanik/kraft-und-bewegungsänderung/grundwissen/2-newtonsches-gesetz-aktionsprinzip>
- Jorgenson, K. W., Phillips, S. M. [Stuart M.] & Hornberger, T. A. (2020). Identifying the Structural Adaptations that Drive the Mechanical Load-Induced Growth of Skeletal Muscle: A Scoping Review. *Cells*, *9*(7). <https://doi.org/10.3390/cells9071658>
- Jukic, I., Castilla, A. P., Ramos, A. G., van Hooren, B., McGuigan, M. R. & Helms, E. R. (2023). The Acute and Chronic Effects of Implementing Velocity Loss Thresholds During Resistance Training: A Systematic Review, Meta-Analysis, and Critical Evaluation of the Literature. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *53*(1), 177–214. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01754-4>
- Jukic, I., King, A., Sousa, C. A., Prnjak, K. & McGuigan, M. R. (2023). Implementing a velocity-based approach to resistance training: the reproducibility and sensitivity of different velocity monitoring technologies. *Scientific Reports*, *13*(1), 7152.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-34416-0>
- Knaier, R., Infanger, D., Cajochen, C., Schmidt-Trucksäss, A., Faude, O. & Roth, R. (2019). Diurnal and day-to-day variations in isometric and isokinetic strength. *Chronobiology International*, *36*(11), 1537–1549. <https://doi.org/10.1080/07420528.2019.1658596>
- Knaier, R., Qian, J., Roth, R., Infanger, D., Notter, T., Wang, W. et al. (2022). Diurnal Variation in Maximum Endurance and Maximum Strength Performance: A Systematic Review and Meta-analysis. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *54*(1), 169–180.  
<https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002773>
- Koźlenia, D. & Domaradzki, J. (2021). Prediction and injury risk based on movement patterns and flexibility in a 6-month prospective study among physically active adults. *PeerJ*, *9*, e11399. <https://doi.org/10.7717/peerj.11399>

- Kruse, A., Rivas, C., Weide, G., Tilp, M. & Jaspers, R. T. (2021). Stimuli for Adaptations in Muscle Length and the Length Range of Active Force Exertion-A Narrative Review. *Frontiers in Physiology*, 12, 742034. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.742034>
- Krzysztofik, M. [Michał], Matykievicz, P., Filip-Stachnik, A., Humińska-Lisowska, K., Rzeszutko-Bełzowska, A. & Wilk, M. [Michał]. (2021). Range of motion of resistance exercise affects the number of performed repetitions but not a time under tension. *Scientific Reports*, 11(1), 14847. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94338-7>
- Krzysztofik, M. [Michał], Wilk, M. [Michał], Wojdała, G. & Gołaś, A. (2019). Maximizing Muscle Hypertrophy: A Systematic Review of Advanced Resistance Training Techniques and Methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24). <https://doi.org/10.3390/ijerph16244897>
- Kumar, V., Atherton, P., Smith, K. & Rennie, M. J. (2009). Human muscle protein synthesis and breakdown during and after exercise. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 106(6), 2026–2039. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.91481.2008>
- Lacio, M., Vieira, J. G., Trybulski, R., Campos, Y., Santana, D., Filho, J. E. et al. (2021). Effects of Resistance Training Performed with Different Loads in Untrained and Trained Male Adult Individuals on Maximal Strength and Muscle Hypertrophy: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21). <https://doi.org/10.3390/ijerph182111237>
- Lang, F., Busch, G. L., Ritter, M., Völk, H., Waldegger, S., Gulbins, E. et al. (1998). Functional significance of cell volume regulatory mechanisms. *Physiological Reviews*, 78(1), 247–306. <https://doi.org/10.1152/physrev.1998.78.1.247>
- Larsen, S., Kristiansen, E. & van den Tillaar, R. (2021). Effects of subjective and objective autoregulation methods for intensity and volume on enhancing maximal strength during resistance-training interventions: a systematic review. *PeerJ*, 9, e10663. <https://doi.org/10.7717/peerj.10663>
- Lasevicius, T., Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Silva-Batista, C., Barros, T. d. S., Aihara, A. Y., Brendon, H. et al. (2022). Muscle Failure Promotes Greater Muscle Hypertrophy in Low-Load but Not in High-Load Resistance Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(2), 346–351. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003454>

- Lauersen, J. B., Andersen, T. E. & Andersen, L. B. (2018). Strength training as superior, dose-dependent and safe prevention of acute and overuse sports injuries: a systematic review, qualitative analysis and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 52(24), 1557–1563. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099078>
- Lawson, D., Vann, C., Schoenfeld, B. J. [Brad J.] & Haun, C. (2022). Beyond Mechanical Tension: A Review of Resistance Exercise-Induced Lactate Responses & Muscle Hypertrophy. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/jfmk7040081>
- Liao, K.-F., Wang, X.-X., Han, M.-Y., Li, L.-L., Nassis, G. P. & Li, Y.-M. (2021). Effects of velocity based training vs. traditional 1RM percentage-based training on improving strength, jump, linear sprint and change of direction speed performance: A Systematic review with meta-analysis. *PLoS One*, 16(11), e0259790. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259790>
- Lim, C., Nunes, E. A., Currier, B. S., McLeod, J. C., Thomas, A. C. Q. & Phillips, S. M. [Stuart M.]. (2022). An Evidence-Based Narrative Review of Mechanisms of Resistance Exercise-Induced Human Skeletal Muscle Hypertrophy. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 54(9), 1546–1559. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002929>
- Lin, D. C. (2009). Force–Velocity Relationship of Skeletal Muscle. In M. D. Binder, N. Hirokawa & U. Windhorst (Hrsg.), *Encyclopedia of Neuroscience* (S. 1611–1615). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-29678-2\\_1819](https://doi.org/10.1007/978-3-540-29678-2_1819)
- Linnecke, T. (2022). “Vmax” is now Enode. Verfügbar unter: <https://enode.ai/vmaxpro-is-now-enode/>
- List, R., Gülay, T., Stoop, M. & Lorenzetti, S. (2013). Kinematics of the trunk and the lower extremities during restricted and unrestricted squats. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(6), 1529–1538. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182736034>
- Longo, A. R., Silva-Batista, C., Pedroso, K., Salles Painelli, V. de, Lasevicius, T., Schoenfeld, B. J. [Brad Jon] et al. (2022). Volume Load Rather Than Resting Interval Influences Muscle Hypertrophy During High-Intensity Resistance Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(6), 1554–1559. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003668>
- Lopez, P., Radaelli, R., Taaffe, D. R., Newton, R. U., Galvão, D. A., Trajano, G. S. et al. (2021). Resistance Training Load Effects on Muscle Hypertrophy and Strength Gain: Systematic

- Review and Network Meta-analysis. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 53(6), 1206–1216. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002585>
- Loturco, I., Kobal, R., Moraes, J. E., Kitamura, K., Cal Abad, C. C., Pereira, L. A. et al. (2017). Predicting the Maximum Dynamic Strength in Bench Press: The High Precision of the Bar Velocity Approach. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(4), 1127–1131. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001670>
- Mann, J. B. & Kazadi, K. (2016). *Developing explosive athletes. Use of velocity based training in athletes* (3rd edition). Muskegon Heights, Michigan: Ultimate Athlete Concepts.
- Mann, J. B., Thyfault, J. P., Ivey, P. A. & Sayers, S. P. (2010). The effect of autoregulatory progressive resistance exercise vs. linear periodization on strength improvement in college athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(7), 1718–1723. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181def4a6>
- Mansournia, M. A., Waters, R., Nazemipour, M., Bland, M. & Altman, D. G. (2021). Bland-Altman methods for comparing methods of measurement and response to criticisms. *Global Epidemiology*, 3, 100045. <https://doi.org/10.1016/j.gloepi.2020.100045>
- Marées, H. de. (2003). *Sportphysiologie* (korr. Nachdr. der 9., vollst., überarb. u. erw. Aufl.). Köln: Sportverlag Strauss.
- Martínez-Cava, A., Hernández-Belmonte, A., Courel-Ibáñez, J., Morán-Navarro, R., González-Badillo, J. J. [Juan José] & Pallarés, J. G. [Jesús G.]. (2020). Reliability of technologies to measure the barbell velocity: Implications for monitoring resistance training. *PloS One*, 15(6), e0232465. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232465>
- Martins-Costa, H. C., Lacerda, L. T., Diniz, R. C. R., Lima, F. V., Andrade, A. G. P., Peixoto, G. H. et al. (2022). Equalization of Training Protocols by Time Under Tension Determines the Magnitude of Changes in Strength and Muscular Hypertrophy. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(7), 1770–1780. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004004>
- Mausehund, L. & Krosshaug, T. (2023). Understanding Bench Press Biomechanics-Training Expertise and Sex Affect Lifting Technique and Net Joint Moments. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 37(1), 9–17. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004191>
- Mc Dermott, E. J., Balshaw, T. G., Brooke-Wavell, K., Maden-Wilkinson, T. M. & Folland, J. P. (2022). Fast and ballistic contractions involve greater neuromuscular power production in

- older adults during resistance exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 122(7), 1639–1655. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-04947-x>
- McGlory, C., Devries, M. C. & Phillips, S. M. [Stuart M.]. (2017). Skeletal muscle and resistance exercise training; the role of protein synthesis in recovery and remodeling. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 122(3), 541–548. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00613.2016>
- McHugh, M. P. (2003). Recent advances in the understanding of the repeated bout effect: the protective effect against muscle damage from a single bout of eccentric exercise. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 13(2), 88–97. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2003.02477.x>
- McKendry, J., Pérez-López, A., McLeod, M., Luo, D., Dent, J. R., Smeuninx, B. et al. (2016). Short inter-set rest blunts resistance exercise-induced increases in myofibrillar protein synthesis and intracellular signalling in young males. *Experimental Physiology*, 101(7), 866–882. <https://doi.org/10.1113/EP085647>
- Menrad, T. & Edelman-Nusser, J. (2021). Validation of Velocity Measuring Devices in Velocity Based Strength Training. *International Journal of Computer Science in Sport*, 20(1), 106–118. <https://doi.org/10.2478/ijcss-2021-0007>
- Mittag, H.-J. (2017a). Grundzüge der Varianzanalyse. In H.-J. Mittag (Hrsg.), *Statistik* (Springer-Lehrbuch, S. 269–280). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-55321-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55321-3_17)
- Mittag, H.-J. (2017b). Kenngrößen empirischer Verteilungen. In H.-J. Mittag (Hrsg.), *Statistik* (Springer-Lehrbuch, S. 61–78). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-55321-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55321-3_5)
- Mittag, H.-J. (2017c). Das lineare Regressionsmodell. In H.-J. Mittag (Hrsg.), *Statistik* (Springer-Lehrbuch, S. 249–268). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-55321-3\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55321-3_16)
- Morales-Alamo, D. & Calbet, J. A. L. (2014). Free radicals and sprint exercise in humans. *Free Radical Research*, 48(1), 30–42. <https://doi.org/10.3109/10715762.2013.825043>
- Morán-Navarro, R., Martínez-Cava, A., Sánchez-Medina, L. [Luis], Mora-Rodríguez, R., González-Badillo, J. J. [Juan José] & Pallarés, J. G. [Jesús G.]. (2019). Movement Velocity as

- a Measure of Level of Effort During Resistance Exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(6), 1496–1504. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002017>
- Morán-Navarro, R., Pérez, C. E. [Carlos E.], Mora-Rodríguez, R., La Cruz-Sánchez, E. de, González-Badillo, J. J. [Juan José], Sánchez-Medina, L. [Luis] et al. (2017). Time course of recovery following resistance training leading or not to failure. *European Journal of Applied Physiology*, 117(12), 2387–2399. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3725-7>
- Morgan, D. L., Claflin, D. R. [D. R.] & Julian, F. J. (1991). Tension as a function of sarcomere length and velocity of shortening in single skeletal muscle fibres of the frog. *The Journal of Physiology*, 441, 719–732. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1991.sp018775>
- Morris, S. J., Oliver, J. L., Pedley, J. S., Haff, G. G. [G. Gregory] & Lloyd, R. S. (2022). Comparison of Weightlifting, Traditional Resistance Training and Plyometrics on Strength, Power and Speed: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 52(7), 1533–1554. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01627-2>
- Morton, R. W., Murphy, K. T., McKellar, S. R., Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Henselmans, M., Helms, E. et al. (2018). A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the effect of protein supplementation on resistance training-induced gains in muscle mass and strength in healthy adults. *British Journal of Sports Medicine*, 52(6), 376–384. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-097608>
- Myrholt, R. B., Solberg, P., Pettersen, H., Seynnes, O. & Paulsen, G. (2023). Effects of Low-Versus High-Velocity-Loss Thresholds With Similar Training Volume on Maximal Strength and Hypertrophy in Highly Trained Individuals. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 18(4), 368–377. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2022-0161>
- Nicholson, G., Mcloughlin, G., Bissas, A. & Ispoglou, T. (2014). Do the acute biochemical and neuromuscular responses justify the classification of strength- and hypertrophy-type resistance exercise? *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(11), 3188–3199. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000519>
- Nishimura, A., Sugita, M., Kato, K., Fukuda, A., Sudo, A. & Uchida, A. (2010). Hypoxia increases muscle hypertrophy induced by resistance training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(4), 497–508. <https://doi.org/10.1123/ijsp.5.4.497>

- Nuzzo, J. L., Pinto, M. D., Nosaka, K. & Steele, J. (2023). Maximal Number of Repetitions at Percentages of the One Repetition Maximum: A Meta-Regression and Moderator Analysis of Sex, Age, Training Status, and Exercise. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*.  
<https://doi.org/10.1007/s40279-023-01937-7>
- Orange, S. T., Metcalfe, J. W., Liefieith, A., Marshall, P., Madden, L. A., Fewster, C. R. et al. (2019). Validity and Reliability of a Wearable Inertial Sensor to Measure Velocity and Power in the Back Squat and Bench Press. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(9), 2398–2408. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002574>
- Pallarés, J. G. [Jesús G.], Sánchez-Medina, L. [Luis], Pérez, C. E. [Carlos Esteban], La Cruz-Sánchez, E. de & Mora-Rodríguez, R. (2014). Imposing a pause between the eccentric and concentric phases increases the reliability of isoinertial strength assessments. *Journal of Sports Sciences*, 32(12), 1165–1175. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.889844>
- Pareja-Blanco, F. [F.], Alcazar, J., Cornejo-Daza, P. J. [Pedro J.], Sánchez-Valdepeñas, J., Rodríguez-Lopez, C., Hidalgo-de Mora, J. et al. (2020). Effects of velocity loss in the bench press exercise on strength gains, neuromuscular adaptations, and muscle hypertrophy. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 30(11), 2154–2166.  
<https://doi.org/10.1111/sms.13775>
- Pareja-Blanco, F. [F.], Alcazar, J., Sánchez-Valdepeñas, J., Cornejo-Daza, P. J. [Pedro J.], Piqueras-Sanchiz, F., Mora-Vela, R. et al. (2020). Velocity Loss as a Critical Variable Determining the Adaptations to Strength Training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 52(8), 1752–1762. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002295>
- Pareja-Blanco, F. [F.], Rodríguez-Rosell, D. [D.], Sánchez-Medina, L. [L.], Gorostiaga, E. M. & González-Badillo, J. J. [J. J.]. (2014). Effect of movement velocity during resistance training on neuromuscular performance. *International Journal of Sports Medicine*, 35(11), 916–924.  
<https://doi.org/10.1055/s-0033-1363985>
- Passos, J., Lopes, S. I., Clemente, F. M., Moreira, P. M., Rico-González, M., Bezerra, P. et al. (2021). Wearables and Internet of Things (IoT) Technologies for Fitness Assessment: A Systematic Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(16).  
<https://doi.org/10.3390/s21165418>

- Pearson, D., Faigenbaum, A., Conley, M. & Kraemer, W. J. [William J.]. (2000). The National Strength and Conditioning Association's Basic Guidelines for the Resistance Training of Athletes. *Strength & Conditioning Journal*, 22(4), 14. [https://doi.org/10.1519/1533-4295\(2000\)022<0014:TNSACA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4295(2000)022<0014:TNSACA>2.0.CO;2)
- Pearson, M., García-Ramos, A., Morrison, M., Ramirez-Lopez, C., Dalton-Barron, N. [Nicholas] & Weakley, J. (2020). Velocity Loss Thresholds Reliably Control Kinetic and Kinematic Outputs during Free Weight Resistance Training. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18). <https://doi.org/10.3390/ijerph17186509>
- Pearson, S. J. & Hussain, S. R. (2015). A review on the mechanisms of blood-flow restriction resistance training-induced muscle hypertrophy. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 45(2), 187–200. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0264-9>
- Pelland, J. C., Robinson, Z. P., Remmert, J. F., Cerminaro, R. M., Benitez, B., John, T. A. et al. (2022). Methods for Controlling and Reporting Resistance Training Proximity to Failure: Current Issues and Future Directions. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 52(7), 1461–1472. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01667-2>
- Pereira, M. I. R. & Gomes, P. S. C. (2003). Movement velocity in resistance training. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 33(6), 427–438. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333060-00004>
- Pérez-Castilla, A., Jaric, S. [Slobodan], Feriche, B., Padial, P. & García-Ramos, A. (2018). Evaluation of Muscle Mechanical Capacities Through the Two-Load Method: Optimization of the Load Selection. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(5), 1245–1253. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001969>
- Phillips, S. M. [S. M.]. (2014). A brief review of critical processes in exercise-induced muscular hypertrophy. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 44 Suppl 1(Suppl 1), S71-7. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0152-3>
- Phillips, S. M. [S. M.], Tipton, K. D., Aarsland, A., Wolf, S. E. & Wolfe, R. R. (1997). Mixed muscle protein synthesis and breakdown after resistance exercise in humans. *The American Journal of Physiology*, 273(1 Pt 1), E99-107. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1997.273.1.E99>

- Piazzesi, G., Reconditi, M., Linari, M., Lucii, L., Bianco, P., Brunello, E. et al. (2007). Skeletal muscle performance determined by modulation of number of myosin motors rather than motor force or stroke size. *Cell*, *131*(4), 784–795.  
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.09.045>
- Picerno, P., Iannetta, D., Comotto, S., Donati, M., Pecoraro, F., Zok, M. et al. (2016). 1RM prediction: a novel methodology based on the force-velocity and load-velocity relationships. *European Journal of Applied Physiology*, *116*(10), 2035–2043.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-016-3457-0>
- Pizzo, A. D., Baker, B. J., Jones, G. J. & Funk, D. C. (2021). Sport Experience Design: Wearable Fitness Technology in the Health and Fitness Industry. *Journal of Sport Management*, *35*(2), 130–143. <https://doi.org/10.1123/jsm.2020-0150>
- Pürzel, A. (2022). *Kniebeuge, Bankdrücken, Kreuzheben. Mit funktioneller Bewegungsanalyse zur Peak Performance* (Originalausgabe, 1. Auflage). München: riva.
- Ralston, G. W., Kilgore, L., Wyatt, F. B. & Baker, J. S. (2017). The Effect of Weekly Set Volume on Strength Gain: A Meta-Analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *47*(12), 2585–2601.  
<https://doi.org/10.1007/s40279-017-0762-7>
- Refalo, M. C., Helms, E. R., Hamilton, D. L. & Fyfe, J. J. (2022). Towards an improved understanding of proximity-to-failure in resistance training and its influence on skeletal muscle hypertrophy, neuromuscular fatigue, muscle damage, and perceived discomfort: A scoping review. *Journal of Sports Sciences*, *40*(12), 1369–1391.  
<https://doi.org/10.1080/02640414.2022.2080165>
- Refalo, M. C., Helms, E. R., Trexler, E. T., Hamilton, D. L. & Fyfe, J. J. (2023). Influence of Resistance Training Proximity-to-Failure on Skeletal Muscle Hypertrophy: A Systematic Review with Meta-analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *53*(3), 649–665.  
<https://doi.org/10.1007/s40279-022-01784-y>
- Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau. (2023). *Labor I: Biomechanik*. Verfügbar unter: <https://sowi.rptu.de/fgs/fg-sport/forschung/lehrstuhl-bewegungs-und-trainingswissenschaft/labor-i>
- Ribeiro, A. S., Nunes, J. P. & Schoenfeld, B. J. [Brad J.]. (2019). Should Competitive Bodybuilders Ingest More Protein than Current Evidence-Based Recommendations? *Sports*

- Medicine (Auckland, N.Z.)*, 49(10), 1481–1485. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01111-y>
- Richens, B. & Cleather, D. J. (2014). The relationship between the number of repetitions performed at given intensities is different in endurance and strength trained athletes. *Biology of Sport*, 31(2), 157–161. <https://doi.org/10.5604/20831862.1099047>
- Riscart-López, J., Rendeiro-Pinho, G., Mil-Homens, P., Soares-daCosta, R., Loturco, I., Pareja-Blanco, F. [Fernando] et al. (2021). Effects of Four Different Velocity-Based Training Programming Models on Strength Gains and Physical Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(3), 596–603. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003934>
- Robert Bosch GmbH. (2023). *Inertialsensoreinheit*. Verfügbar unter: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/sensoren/inertialsensoreinheit/>
- Roberts, M. D., Haun, C. T., Vann, C. G., Osburn, S. C. & Young, K. C. (2020). Sarcoplasmic Hypertrophy in Skeletal Muscle: A Scientific "Unicorn" or Resistance Training Adaptation? *Frontiers in Physiology*, 11, 816. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00816>
- Rodiles-Guerrero, L., Cornejo-Daza, P. J. [Pedro Jesús], Sánchez-Valdepeñas, J., Alcazar, J., Rodriguez-López, C., Sánchez-Moreno, M. et al. (2022). Specific Adaptations to 0%, 15%, 25%, and 50% Velocity-Loss Thresholds During Bench Press Training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(8), 1231–1241. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0481>
- Rodríguez-Rosell, D. [David], Yáñez-García, J. M., Sánchez-Medina, L. [Luis], Mora-Custodio, R. & González-Badillo, J. J. [Juan José]. (2020). Relationship Between Velocity Loss and Repetitions in Reserve in the Bench Press and Back Squat Exercises. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(9), 2537–2547. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002881>
- Russell, B., Motlagh, D. & Ashley, W. W. (2000). Form follows function: how muscle shape is regulated by work. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 88(3), 1127–1132. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.3.1127>
- Sale, D. & MacDougall, D. (1981). Specificity in strength training: a review for the coach and athlete. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences. Journal Canadien Des Sciences Appliquees Au Sport*, 6(2), 87–92.

- Sánchez-Medina, L. [L.] & González-Badillo, J. J. [Juan José]. (2011). Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(9), 1725–1734. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318213f880>
- Sánchez-Medina, L. [L.], González-Badillo, J. J. [J. J.], Pérez, C. E. [C. E.] & Pallarés, J. G. [J. G.]. (2014). Velocity- and power-load relationships of the bench pull vs. bench press exercises. *International Journal of Sports Medicine*, 35(3), 209–216. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1351252>
- Sandow, A. (1952). Excitation-Contraction Coupling in Muscular Response. *The Yale Journal of Biology and Medicine*, 25(3), 176–201.
- 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, 849275. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.849275>
- Schäfer, T. (2016). *Methodenlehre und Statistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-11936-2>
- Schiaffino, S., Reggiani, C., Akimoto, T. & Blaauw, B. (2021). Molecular Mechanisms of Skeletal Muscle Hypertrophy. *Journal of Neuromuscular Diseases*, 8(2), 169–183. <https://doi.org/10.3233/JND-200568>
- Schmidtbleicher, D. [D.] (1992). Krafttraining (Strength training). In P. Röthig, H. Becker, K. Carl, D. Kayser & R. Prohl (Hrsg.), *Sportwissenschaftliches Lexikon* (6. Aufl., S. 263–264). Schorndorf: Hofmann.
- Schnabel, G., Harre, H.-D. & Krug, J. (Hrsg.). (2014). *Trainingslehre - Trainingswissenschaft. Leistung - Training - Wettkampf* (3., aktualisierte Aufl.). Aachen: Meyer & Meyer.
- Schoenfeld, B. J. [Brad J.]. (2010). The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(10), 2857–2872. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181e840f3>
- Schoenfeld, B. J. [Brad J.]. (2012). Does exercise-induced muscle damage play a role in skeletal muscle hypertrophy? *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(5), 1441–1453. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31824f207e>

- Schoenfeld, B. J. [Brad J.]. (2013). Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 43(3), 179–194. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0017-1>
- Schoenfeld, B. J. [Brad J.]. (2021). *Science and development of muscle hypertrophy* (Second edition). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Contreras, B., Krieger, J., Grgic, J., Delcastillo, K., Belliard, R. et al. (2019). Resistance Training Volume Enhances Muscle Hypertrophy but Not Strength in Trained Men. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 51(1), 94–103. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001764>
- Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Grgic, J. & Krieger, J. (2019). How many times per week should a muscle be trained to maximize muscle hypertrophy? A systematic review and meta-analysis of studies examining the effects of resistance training frequency. *Journal of Sports Sciences*, 37(11), 1286–1295. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1555906>
- Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Grgic, J., Ogborn, D. & Krieger, J. W. (2017). Strength and Hypertrophy Adaptations Between Low- vs. High-Load Resistance Training: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(12), 3508–3523. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002200>
- Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Grgic, J., van Every, D. W. & Plotkin, D. L. (2021). Loading Recommendations for Muscle Strength, Hypertrophy, and Local Endurance: A Re-Examination of the Repetition Continuum. *Sports (Basel, Switzerland)*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/sports9020032>
- Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Ogborn, D. I. & Krieger, J. W. (2015). Effect of repetition duration during resistance training on muscle hypertrophy: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 45(4), 577–585. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0304-0>
- Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Ogborn, D. & Krieger, J. W. (2017). Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Sports Sciences*, 35(11), 1073–1082. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1210197>

- Schroeder, S., Jaeger, S., Schwer, J., Seitz, A. M., Hamann, I., Werner, M. et al. (2022). Accuracy measurement of different marker based motion analysis systems for biomechanical applications: A round robin study. *PLoS One*, 17(7), e0271349. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271349>
- Schwameder, H. & Stein, T. (2023). Struktur sportlicher Bewegung – Grundlagen der Sportmechanik. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Sport* (S. 119–182). Berlin, Heidelberg: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-64695-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-64695-3_5)
- Scott, B. R., Slattery, K. M., Sculley, D. V. & Dascombe, B. J. (2014). Hypoxia and resistance exercise: a comparison of localized and systemic methods. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 44(8), 1037–1054. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0177-7>
- Shimano, T., Kraemer, W. J. [William J.], Spiering, B. A., Volek, J. S., Hatfield, D. L., Silvestre, R. et al. (2006). Relationship between the number of repetitions and selected percentages of one repetition maximum in free weight exercises in trained and untrained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(4), 819–823. <https://doi.org/10.1519/R-18195.1>
- Shishmarev, D. (2020). Excitation-contraction coupling in skeletal muscle: recent progress and unanswered questions. *Biophysical Reviews*, 12(1), 143–153. <https://doi.org/10.1007/s12551-020-00610-x>
- Statista. (2016). *Gründe für den Besuch von Fitnessstudios in Deutschland*. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/597157/umfrage/gruende-besuch-fitnessstudios-in-deutschland/>
- Steele, J., Fisher, J., Giessing, J. & Gentil, P. (2017). Clarity in reporting terminology and definitions of set endpoints in resistance training. *Muscle & Nerve*, 56(3), 368–374. <https://doi.org/10.1002/mus.25557>
- Steele, J., Malleron, T., Har-Nir, I., Androulakis-Korakakis, P., Wolf, M., Fisher, J. P. et al. (2022). Are Trainees Lifting Heavy Enough? Self-Selected Loads in Resistance Exercise: A Scoping Review and Exploratory Meta-analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 52(12), 2909–2923. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01717-9>.
- Stone, M. H., Hornsby, W. G., Suarez, D. G., Duca, M. & Pierce, K. C. (2022). Training Specificity for Athletes: Emphasis on Strength-Power Training: A Narrative Review. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/jfmk7040102>

- Suchomel, T. J., Nimphius, S., Bellon, C. R. & Stone, M. H. (2018). The Importance of Muscular Strength: Training Considerations. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 48(4), 765–785.  
<https://doi.org/10.1007/s40279-018-0862-z>
- Taber, C. B., Vigotsky, A., Nuckols, G. & Haun, C. T. (2019). Exercise-Induced Myofibrillar Hypertrophy is a Contributory Cause of Gains in Muscle Strength. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 49(7), 993–997. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01107-8>
- Tavares, V. D. d. O., Agrícola, P. M. D., Nascimento, P. H. D., Nidas de Oliveira Neto, L., Elsangedy, H. M. & Da Machado, D. G. S. (2020). The Effect of Resistance Exercise Movement Tempo on Psychophysiological Responses in Novice Men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(5), 1264–1273.  
<https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003510>
- Thompson, W. R. (2021). Worldwide Survey of Fitness Trends for 2021. *ACSM'S Health & Fitness Journal*, 25(1), 10–19. <https://doi.org/10.1249/FIT.0000000000000631>
- Thompson, W. R. (2022). Worldwide Survey of Fitness Trends for 2022. *ACSM'S Health & Fitness Journal*, 26(1), 11–20. <https://doi.org/10.1249/FIT.0000000000000732>
- Thompson, W. R. (2023). Worldwide Survey of Fitness Trends for 2023. *ACSM'S Health & Fitness Journal*, 27(1), 9–18. <https://doi.org/10.1249/FIT.0000000000000834>
- Toigo, M. & Boutellier, U. (2006). New fundamental resistance exercise determinants of molecular and cellular muscle adaptations. *European Journal of Applied Physiology*, 97(6), 643–663. <https://doi.org/10.1007/s00421-006-0238-1>
- Tomasevicz, C. L., Hasenkamp, R. M., Ridenour, D. T. & Bach, C. W. (2020). Validity and reliability assessment of 3-D camera-based capture barbell velocity tracking device. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 23(1), 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2019.07.014>
- Tornero-Aguilera, J. F., Jimenez-Morcillo, J., Rubio-Zarapuz, A. & Clemente-Suárez, V. J. (2022). Central and Peripheral Fatigue in Physical Exercise Explained: A Narrative Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7).  
<https://doi.org/10.3390/ijerph19073909>
- Torrejón, A., Balsalobre-Fernández, C., Haff, G. G. [G. Gregory] & García-Ramos, A. (2019). The load-velocity profile differs more between men and women than between individuals with

- different strength levels. *Sports Biomechanics*, 18(3), 245–255.  
<https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1433872>
- Trybulski, R., Gepfert, M., Gawel, D., Bichowska, M., Fostiak, K., Wojdala, G. et al. (2022). Impact of movement tempo on bar velocity and time under tension in resistance exercises with different external loads. *Biology of Sport*, 39(3), 547–554.  
<https://doi.org/10.5114/biolsport.2022.106160>
- Van der Kruk, E. & Reijne, M. M. (2018). Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review. *European Journal of Sport Science*, 18(6), 806–819.  
<https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1463397>
- Vieira, A. F., Umpierre, D., Teodoro, J. L., Lisboa, S. C., Baroni, B. M., Izquierdo, M. [Mikel] et al. (2021). Effects of Resistance Training Performed to Failure or Not to Failure on Muscle Strength, Hypertrophy, and Power Output: A Systematic Review With Meta-Analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(4), 1165–1175.  
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003936>
- Vieira, J. G., Sardeli, A. V., Dias, M. R., Filho, J. E., Campos, Y., Sant'Ana, L. et al. (2022). Effects of Resistance Training to Muscle Failure on Acute Fatigue: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 52(5), 1103–1125.  
<https://doi.org/10.1007/s40279-021-01602-x>
- Vox, J. P., Weber, A., Wolf, K. I., Izdebski, K., Schüler, T., König, P. et al. (2021). An Evaluation of Motion Trackers with Virtual Reality Sensor Technology in Comparison to a Marker-Based Motion Capture System Based on Joint Angles for Ergonomic Risk Assessment. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(9). <https://doi.org/10.3390/s21093145>
- Wackerhage, H. & Ratkevicius, A. (2008). Signal transduction pathways that regulate muscle growth. *Essays in Biochemistry*, 44, 99–108. <https://doi.org/10.1042/BSE0440099>
- Wackerhage, H., Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Hamilton, D. L., Lehti, M. & Hulmi, J. J. (2019). Stimuli and sensors that initiate skeletal muscle hypertrophy following resistance exercise. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 126(1), 30–43.  
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00685.2018>

- Walden, F. von. (2019). Ribosome biogenesis in skeletal muscle: coordination of transcription and translation. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, *127*(2), 591–598. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00963.2018>
- Watt, K. I., Goodman, C. A., Hornberger, T. A. & Gregorevic, P. (2018). The Hippo Signaling Pathway in the Regulation of Skeletal Muscle Mass and Function. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *46*(2), 92–96. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000142>
- Weakley, J., Mann, B., Banyard, H., McLaren, S., Scott, T. & Garcia-Ramos, A. (2021). Velocity-Based Training: From Theory to Application. *Strength & Conditioning Journal*, *43*(2), 31–49. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000560>
- Weakley, J., McLaren, S., Ramirez-Lopez, C., García-Ramos, A., Dalton-Barron, N. [Nick], Banyard, H. et al. (2020). Application of velocity loss thresholds during free-weight resistance training: Responses and reproducibility of perceptual, metabolic, and neuromuscular outcomes. *Journal of Sports Sciences*, *38*(5), 477–485. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1706831>
- Weakley, J., Schoenfeld, B. J. [Brad J.], Ljungberg, J., Halson, S. L. & Phillips, S. M. [Stuart M.]. (2023). Physiological Responses and Adaptations to Lower Load Resistance Training: Implications for Health and Performance. *Sports Medicine - Open*, *9*(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s40798-023-00578-4>
- Wen, Y., Alimov, A. P. & McCarthy, J. J. (2016). Ribosome Biogenesis is Necessary for Skeletal Muscle Hypertrophy. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *44*(3), 110–115. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000082>
- Wilk, M. [Michał], Golas, A., Krzysztofik, M. [Michał], Nawrocka, M. & Zajac, A. (2019). The Effects of Eccentric Cadence on Power and Velocity of the Bar during the Concentric Phase of the Bench Press Movement. *Journal of Sports Science & Medicine*, *18*(2), 191–197.
- Wilk, M. [Michał], Golas, A., Stastny, P., Nawrocka, M., Krzysztofik, M. [Michał] & Zajac, A. (2018). Does Tempo of Resistance Exercise Impact Training Volume? *Journal of Human Kinetics*, *62*, 241–250. <https://doi.org/10.2478/hukin-2018-0034>
- Wilk, M. [Michał], Tufano, J. J. & Zajac, A. (2020). The Influence of Movement Tempo on Acute Neuromuscular, Hormonal, and Mechanical Responses to Resistance Exercise-A Mini

- Review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(8), 2369–2383.  
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003636>
- Wilk, M. [Michal], Zajac, A. & Tufano, J. J. (2021). The Influence of Movement Tempo During Resistance Training on Muscular Strength and Hypertrophy Responses: A Review. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 51(8), 1629–1650. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01465-2>
- Włodarczyk, M., Adamus, P., Zieliński, J. & Kantanista, A. (2021). Effects of Velocity-Based Training on Strength and Power in Elite Athletes-A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10).  
<https://doi.org/10.3390/ijerph18105257>
- World Health Organisation. (2020). *WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour*. Genf: World Health Organisation.
- Xenophon & Güthling, O. (1883). *Xenophon's Erinnerungen an Sokrates*. Übersetzt von Otto Güthling. Verfügbar unter: <https://www.projekt-gutenberg.org/xenophon/erinneru/chap030.html>
- Zajac, A., Chalimoniuk, M., Maszczyk, A., Gołaś, A. & Lngfort, J. (2015). Central and Peripheral Fatigue During Resistance Exercise - A Critical Review. *Journal of Human Kinetics*, 49, 159–169. <https://doi.org/10.1515/hukin-2015-0118>
- Zhao, H., Nishioka, T. & Okada, J. (2022). Validity of using perceived exertion to assess muscle fatigue during resistance exercises. *PeerJ*, 10, e13019.  
<https://doi.org/10.7717/peerj.13019>
- Zhao, H., Seo, D. & Okada, J. (2023). Validity of using perceived exertion to assess muscle fatigue during back squat exercise. *BMC Sports Science, Medicine & Rehabilitation*, 15(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s13102-023-00620-8>
- Zhou, X., Naguro, I., Ichijo, H. & Watanabe, K. (2016). Mitogen-activated protein kinases as key players in osmotic stress signaling. *Biochimica Et Biophysica Acta*, 1860(9), 2037–2052.  
<https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2016.05.032>
- Zourdos, M. C., Goldsmith, J. A., Helms, E. R., Trepeck, C., Halle, J. L., Mendez, K. M. et al. (2021). Proximity to Failure and Total Repetitions Performed in a Set Influences Accuracy of Intrasets Repetitions in Reserve-Based Rating of Perceived Exertion. *Journal of Strength*

*and Conditioning Research*, 35(Suppl 1), S158-S165.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002995>

Zourdos, M. C., Klemp, A., Dolan, C., Quiles, J. M., Schau, K. A., Jo, E. et al. (2016). Novel Resistance Training-Specific Rating of Perceived Exertion Scale Measuring Repetitions in Reserve. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(1), 267–275.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001049>

## CURRICULUM VITAE

### PERSÖNLICHE DATEN

NAME

Patrick Berndt



### SCHULISCHE, BERUFLICHE & AKADEMISCHE AUSBILDUNG

1995 - 2008

Grundschule & Gymnasium mit abgeschlossenem Abitur

2008 - 2011

Abgeschlossene Berufsausbildung zum Mechatroniker bei ThyssenKrupp Gerlach GmbH, Homburg

2011 - 2015

Bachelor of Arts in Sportwissenschaft an der Universität des Saarlandes, Saarbrücken

2015 - 2017

Master of Science in Sportwissenschaft an der Universität des Saarlandes, Saarbrücken

2021 - 2024

Nebenberufliche Promotion (Dr. rer. nat.) am Lehrstuhl Bewegungs- und Trainingswissenschaft der RPTU Kaiserslautern.

Promotionsthema:

*Velocity Based Training:*

*Adaption der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining mit submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit*

**SPEAKER-, EXPERTEN- & AUTORENTÄTIGKEITEN**

- 06.10.2018 Speaker beim „Aufstiegskongress 2018“ in Mannheim zum Thema:  
*Concurrent Training – Kraft- und Ausdauertraining sinnvoll kombinieren*
- 26.10.2019 Speaker beim „Aufstiegskongress 2019“ in Mannheim zum Thema:  
*Anpassungsprozesse im Krafttraining – Angewandte Muskelphysiologie im Personal Training*
- 09.10.2021 Speaker beim „Aufstiegskongress 2021“ (online) zum Thema:  
*Myokine: Training für das Immunsystem*
- 08.-09.04.2022 Speaker beim „FIBO Congress 2022“ in Köln zu den Themen:  
*Effekte unterschiedlicher Periodisierungsmodelle im Fitnesskrafttraining*  
&  
*Velocity Based Training & Autoregulated Training - Moderne Ansätze zur flexiblen Intensitätssteuerung im Krafttraining*
- 08.10.2022 Speaker beim „Aufstiegskongress 2022“ in Mannheim zum Thema:  
*Emerging Strategies im Personal Training - Werkzeuge und Strategien zur flexiblen und individualisierten Trainingsgestaltung in der 1:1-Betreuung*
13. – 14.04.2023 Speaker beim „FIBO Congress 2023“ in Köln zu den Themen:  
*Der Stellenwert des Krafttrainings in Individual- und Mannschaftssportarten*  
&  
*Zielspezifische Übungsauswahl im Krafttraining - Spezifität vs. Variabilität zur Steigerung von Kraftleistung und Muskelmasse*

- 23.06.2023 Speaker beim Sports, Medicine and Health Summit 2023 zum Thema:  
*Effekte von Trainingszustand, Belastungsintensität und initialer Bewegungsgeschwindigkeit auf die Minimum Velocity Threshold bei der Übung Langhantelbankdrücken*
- 07.10.2023 Speaker beim „Aufstiegskongress 2023“ in Mannheim zum Thema:  
*Train to failure or not to failure? - Wie wichtig ist die muskuläre Ausbelastung?*
- 21.10.2023 Speaker beim „Sportkongress Stuttgart 2023“ des STB in Stuttgart zum Thema:  
*Einfluss von Maximal- und Schnellkrafttraining auf die Sprint- und Sprungleistung*
- 2017 - 2024 Autor zahlreicher Fachartikel in populärwissenschaftlichen Fachzeitschriften der Sport-, Fitness- und Gesundheitsbranche sowie Expertentätigkeit für (Auszug):  
fitness MANAGEMENT international, medical fitness and healthcare, Fitness Tribune, dpa, Fit for Fun-Magazin, DSSV, gym80 international GmbH, Alfred Kärcher SE & Co. KG, DIE ZEIT u. v. a.

# Anhang

## Anhang 1 – Anamnese VBTH1



Datum: ...../...../.....	PROBAND/IN NR:	
	INITIALEN (Nachname, Vorname):	

### Anamnese zur Teilnahme an der wissenschaftlichen Studie

#### Adaption der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse (VBTH1-Studie)

Geburtsdatum	:	_____	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><b>1-RM<sub>max</sub></b></td> <td style="text-align: center;"><b>1-RM<sub>neu</sub></b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">DL: _____ kg</td> <td style="text-align: center;">_____ kg</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">BP: _____ kg</td> <td style="text-align: center;">_____ kg</td> </tr> </table>	<b>1-RM<sub>max</sub></b>	<b>1-RM<sub>neu</sub></b>	DL: _____ kg	_____ kg	BP: _____ kg	_____ kg
<b>1-RM<sub>max</sub></b>	<b>1-RM<sub>neu</sub></b>								
DL: _____ kg	_____ kg								
BP: _____ kg	_____ kg								
Größe	:	_____							
Gewicht	:	_____							
Geschlecht	:	_____							
Primärspportart	:	_____, seit _____ Jahren							
Krafttraining seit (vor Nov. 2020)	:	seit _____ Jahren							
Erfahrung mit LH-Kreuzheben (DL) und LH-Bankdrücken (BP)	:	<input type="checkbox"/> < 6 Monate <input type="checkbox"/> ≥ 6 Monate <input type="checkbox"/> > 12 Monate <input type="checkbox"/> > 3 Jahre							
Internistische Erkrankungen	:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, welche? : _____							
Orthopädische Erkrankungen	:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, welche? : _____							
OP in den letzten 12 Monaten	:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, was und wann? : _____							
Medikamenteneinnahme	:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, welche? : _____							
Sonstige Beschwerden	:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, welche? : _____							

Sollten bei mir im Laufe der Studie unerwartete Beschwerden auftreten oder sich etwas an meinem Gesundheitszustand ändern, werde ich den Studienleiter unmittelbar davon unterrichten.

Ort, Datum, Unterschrift des Probanden: .....

Anhang 2 – Anamnese VBTH2



Datum: ...../...../.....	PROBAND/IN NR:	
	INITIALEN (Nachname, Vorname):	

**Anamnese zur Teilnahme an der wissenschaftlichen Studie**

**Adaption der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse (VBTH2-Studie)**

Geburtsdatum	:	_____	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td style="width: 10%;"><b>10-RM<sub>max</sub></b></td> <td style="width: 10%;"><b>10-RM<sub>test</sub></b></td> </tr> <tr> <td><b>DL:</b></td> <td>_____ kg</td> <td>_____ kg</td> </tr> <tr> <td><b>BP:</b></td> <td>_____ kg</td> <td>_____ kg</td> </tr> </table>		<b>10-RM<sub>max</sub></b>	<b>10-RM<sub>test</sub></b>	<b>DL:</b>	_____ kg	_____ kg	<b>BP:</b>	_____ kg	_____ kg
	<b>10-RM<sub>max</sub></b>	<b>10-RM<sub>test</sub></b>										
<b>DL:</b>	_____ kg	_____ kg										
<b>BP:</b>	_____ kg	_____ kg										
Größe	:	_____										
Gewicht	:	_____										
Geschlecht	:	_____										
Primärspportart	:	_____, seit _____ Jahren										
Krafttraining seit (vor Nov. 2020)	:	seit _____ Jahren										
Erfahrung mit LH-Kreuzheben (DL)	:	<input type="checkbox"/> < 6 Monate <input type="checkbox"/> ≥ 6 Monate <input type="checkbox"/> > 12 Monate <input type="checkbox"/> > 3 Jahre										
Internistische Erkrankungen	:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein										
Wenn ja, welche?	:	_____										
Orthopädische Erkrankungen	:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein										
Wenn ja, welche?	:	_____										
OP in den letzten 12 Monaten	:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein										
Wenn ja, was und wann?	:	_____										
Medikamenteneinnahme	:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein										
Wenn ja, welche?	:	_____										
Sonstige Beschwerden	:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein										
Wenn ja, welche?	:	_____										

Sollten bei mir im Laufe der Studie unerwartete Beschwerden auftreten oder sich etwas an meinem Gesundheitszustand ändern, werde ich den Studienleiter unmittelbar davon unterrichten.

Ort, Datum, Unterschrift des Probanden: .....

Anhang 3 – Anamnese VBTH3



Datum: ...../ ...../ .....	PROBAND/IN NR:
INITIALEN (Nachname, Vorname):	_____

**Anamnese zur Teilnahme an der wissenschaftlichen Studie**

**Adaption der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse (VBTH3-Studie)**

Geburtsdatum	:	_____			
Größe	:	_____			
Gewicht	:	_____			
Geschlecht	:	_____			
Regelmäßiges Krafttraining seit der VBTH1-Studie	:	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein		
Wenn nein, weshalb?	:	_____			
Training von DL und BP seit der VBTH1-Studie	:	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein		
Wenn nein, weshalb?	:	_____			
Internistische Erkrankungen	:	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein		
Wenn ja, welche?	:	_____			
Orthopädische Erkrankungen	:	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein		
Wenn ja, welche?	:	_____			
OP in den letzten 12 Monaten	:	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein		
Wenn ja, was und wann?	:	_____			
Medikamenteneinnahme	:	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein		
Wenn ja, welche?	:	_____			
Sonstige Beschwerden	:	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein		
Wenn ja, welche?	:	_____			

	<b>1-RM<sub>alt</sub></b>	<b>1-RM<sub>neu</sub></b>
<b>DL:</b>	_____ kg	_____ kg
<b>BP:</b>	_____ kg	_____ kg

Sollten bei mir im Laufe der Studie unerwartete Beschwerden auftreten oder sich etwas an meinem Gesundheitszustand ändern, werde ich den Studienleiter unmittelbar davon unterrichten.

Ort, Datum, Unterschrift des Probanden: .....

Anhang 4 – Anamnese VBTH4



Datum: ...../...../.....	PROBAND/IN NR:
INITIALEN (Nachname, Vorname):	

**Anamnese zur Teilnahme an der wissenschaftlichen Studie**

**Adaption der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining zur Steigerung der Skelettmuskelmasse (VBTH4-Studie)**

Geburtsdatum	:	_____	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;"><b>1-RM<sub>alt</sub></b></td> <td style="text-align: center;"><b>1-RM<sub>neu</sub></b></td> </tr> <tr> <td><b>DL:</b></td> <td style="text-align: center;">_____ kg</td> <td style="text-align: center;">_____ kg</td> </tr> <tr> <td><b>BP:</b></td> <td style="text-align: center;">_____ kg</td> <td style="text-align: center;">_____ kg</td> </tr> </table>		<b>1-RM<sub>alt</sub></b>	<b>1-RM<sub>neu</sub></b>	<b>DL:</b>	_____ kg	_____ kg	<b>BP:</b>	_____ kg	_____ kg
	<b>1-RM<sub>alt</sub></b>	<b>1-RM<sub>neu</sub></b>										
<b>DL:</b>	_____ kg	_____ kg										
<b>BP:</b>	_____ kg	_____ kg										
Größe	:	_____										
Gewicht	:	_____										
Geschlecht	:	_____										
Leistungsorientiertes Krafttraining zur Maximierung der Maximalkraft oder Muskelmasse seit ≥ 3 Jahren : <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein												
Belastungsintensität bei DL & BP regelmäßig über 85% 1-RM : <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein												
Internistische Erkrankungen : <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, welche? : _____												
Orthopädische Erkrankungen : <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, welche? : _____												
OP in den letzten 12 Monaten : <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, was und wann? : _____												
Medikamenteneinnahme : <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, welche? : _____												
Sonstige Beschwerden : <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, welche? : _____												

Sollten bei mir im Laufe der Studie unerwartete Beschwerden auftreten oder sich etwas an meinem Gesundheitszustand ändern, werde ich den Studienleiter unmittelbar davon unterrichten.

Ort, Datum, Unterschrift des Probanden: .....

## Anhang 5 – Einwilligungserklärung



Datum: ...../...../.....	PROBAND/IN NR:
	INITIALEN (Nachname, Vorname):

### **Einwilligungserklärung zur Teilnahme an der wissenschaftlichen Studie**

#### **Adaption der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining mit submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit**

Ich wurde ausführlich mündlich über den Ablauf der Studie „Adaption der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining mit submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit“ informiert. Des Weiteren hatte ich die Möglichkeit, zusätzliche Fragen in einem Aufklärungsgespräch mit dem Studienleiter zu klären. Insbesondere erkläre ich Folgendes:

1. Über Wesen, Bedeutung und Tragweite dieser Untersuchung bin ich aufgeklärt worden.
2. Sollten bei mir im Laufe der Studie unerwartete Beschwerden auftreten, werde ich den Studienleiter unmittelbar davon unterrichten.
3. Ich bestätige hiermit, dass keine akuten oder chronischen Gesundheitsbeschwerden vorliegen, die gegen eine Teilnahme an der Studie sprechen. Bei diesbezüglichen Unsicherheiten verpflichte ich mich, die eigene Sporttauglichkeit von einem Arzt bestätigen zu lassen. Für Schäden und Verletzungen an mir selbst, die durch Verschweigen aktueller und zurückliegender Gesundheitsprobleme oder Überschätzung der eigenen konditionellen und koordinativen Fähigkeiten entstehen, hafte ich selbst.
4. **Im Rahmen dieser Studie werden Daten, die mit meiner Person zusammenhängen, gemäß den aktuell gültigen Datenschutzregularien erfasst. Die Verschlüsselung der Probandendaten erfolgt durch Nummern- und Buchstabencodes. Beim Studienleiter ist eine Liste hinterlegt auf der die Namen den Nummern- und Buchstabencodes zugeordnet sind. Diese Liste unterliegt Maßnahmen, die gewährleisten, dass die personenbezogenen Daten dem Probanden nicht durch unbefugte Personen zugeordnet werden können. Eine Entschlüsselung erfolgt nur wenn dies zur Sicherheit des Probanden beiträgt.**
5. Die Teilnahme an dieser Studie ist freiwillig und mit einem jederzeitigen Rücktrittsrecht ohne Angabe von Gründen verbunden.

Ich willige ein, dass ich über die oben genannten Punkte informiert wurde. Den Inhalt dieser Einverständniserklärung habe ich verstanden. Ich willige ein, dass ich mit dem geplanten Verlauf der Studie „Adaption der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining mit submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit“ einverstanden bin und den Anordnungen des Studienleiters folgen werde, die für die Durchführung der Studie erforderlich sind.

Ort, Datum: .....

Unterschrift des Probanden (in Druckbuchstaben): .....

Unterschrift des Probanden: .....

Unterschrift des Studienleiters: .....

## Anhang 6 – Datenschutzerklärung



Datum: ...../ ...../ .....	PROBAND/IN NR:
INITIALEN (Nachname, Vorname):	

### Datenschutzerklärung

#### **Adaption der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining mit submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit**

Hiermit willige ich ein, dass bei dieser trainingswissenschaftlichen Studie personenbezogene Daten, Daten zum Gesundheitszustand sowie sportmotorische Befunde über mich erhoben, gespeichert und ausgewertet werden. Ohne meine ausdrückliche Einwilligung dürfen keine personenbezogenen Daten an Dritte übermittelt werden. Hiervon ausgenommen sind die Deutsche Hochschule für Prävention und Gesundheitsmanagement (im Folgenden mit DHfPG abgekürzt) sowie die Technische Universität Kaiserslautern, an die die personenbezogenen Daten zur Datenauswertung übermittelt werden.

Die Verwendung der personenbezogenen Daten erfolgt nach gesetzlichen Bestimmungen und setzt vor der Teilnahme an dieser Studie folgende freiwillig abgegebene Einwilligungserklärung voraus, d. h. ohne die nachfolgende Einwilligung kann ich nicht an dieser Studie teilnehmen. Die Teilnahme an dieser Studie erfolgt freiwillig. Mir ist bewusst, dass ich dieser Einwilligung jederzeit, ohne Angabe von Gründen und über alle möglichen Kommunikationswege widerrufen kann, ohne dass für mich Nachteile entstehen.

#### **Einwilligungserklärung zum Datenschutz:**

1. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass im Rahmen dieser Studie erhobene Daten in Papierform und auf elektronischen Datenträgern bei der Deutschen Hochschule für Prävention und Gesundheitsmanagement (DHfPG) sowie die Technische Universität Kaiserslautern aufgezeichnet werden.
2. Außerdem erkläre ich mich damit einverstanden, dass autorisierte und zur Verschwiegenheit verpflichtete Beauftragte der DHfPG sowie der Technischen Universität Kaiserslautern in meine personenbezogenen Daten Einsicht nehmen, soweit dies für die Überprüfung der ordnungsgemäßen Durchführung der Studie notwendig ist.
3. Ich bin bereits darüber aufgeklärt worden, dass ich jederzeit die Teilnahme an der Studie beenden kann. Im Falle eines solchen Widerrufs meiner Einwilligung, an der Studie teilzunehmen, erkläre ich mich damit einverstanden, dass die bis zu diesem Zeitpunkt gespeicherten Daten ohne Namensnennung weiterhin verwendet werden dürfen, soweit dies erforderlich ist, um
  - a. die Wirkungen der zu prüfenden Maßnahme festzustellen,
  - b. sicherzustellen, dass meine schutzwürdigen Interessen nicht beeinträchtigt werden,
  - c. der Pflicht zur Vorlage vollständiger Zulassungsunterlagen zu genügen.



4. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Daten nach Beendigung oder Abbruch der Studie temporär aufbewahrt werden. Danach werden meine personenbezogenen Daten gelöscht, soweit nicht gesetzliche Aufbewahrungsfristen entgegenstehen.
5. Ich bin über folgende gesetzliche Regelung informiert: Falls ich meine Einwilligung zur Teilnahme an der Studie widerrufe, müssen alle Stellen, die meine personenbezogenen Daten, insbesondere Gesundheitsdaten gespeichert haben, unverzüglich prüfen, inwieweit die gespeicherten Daten für die in Nr. 3 a) bis c) genannten Zwecke noch erforderlich sind. Nicht mehr benötigte Daten sind unverzüglich zu löschen.

Ihnen stehen unter Berücksichtigung des Art. 89 DSGVO folgende Rechte zu:

Das Recht auf Auskunft, ein Berichtigungsrecht, das Recht auf Löschung, das Recht auf Einschränkung der Verarbeitung sowie das Recht, gespeicherte Daten heraus zu verlangen, um sie bei einem anderen Verantwortlichen speichern zu lassen (Recht auf Datenübertragbarkeit). Sie haben bei unrechtmäßiger Datenverarbeitung das Recht, Widerspruch einzulegen. Der Verantwortliche verarbeitet die personenbezogenen Daten dann nicht mehr, es sei denn, er kann zwingende schutzwürdige Gründe für die Verarbeitung nachweisen, die die Interessen, Rechte und Freiheiten der betroffenen Person überwiegen, oder die Verarbeitung dient der Geltendmachung, Ausübung oder Verteidigung von Rechtsansprüchen.

Der für die Datenverarbeitung Verantwortliche ist:

Patrick Berndt, Hermann-Neuberger-Sportschule 3, 66123 Saarbrücken

Ihnen steht ein Beschwerderecht bei der zuständigen Datenschutzbehörde zu.

\_\_\_\_\_  
Vorname, Name

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

---

## Anhang 7 – Teilnehmerinformation



### Teilnehmerinformation zur wissenschaftlichen Studie

#### **Adaption der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining mit submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit**

Sie nehmen an einer wissenschaftlichen Krafttrainingsstudie teil. Diese Studie wird im Rahmen eines Forschungsprojektes der Deutschen Hochschule für Prävention und Gesundheitsmanagement durchgeführt, das Bestandteil der Promotion des Studienleiters an der Technischen Universität Kaiserslautern ist. Wir möchten uns bereits an dieser Stelle für Ihr Interesse und Ihre Bereitschaft zur Mitarbeit an dem Projekt bedanken.

Im Kontext der Krafttrainingsstudie führen wir verschiedene standardisierte Krafttests durch, in denen das maximale Gewicht (1-RM) sowie die maximal mögliche Wiederholungszahl bei submaximalen Lasten für unterschiedliche Krafttrainingsübungen getestet wird. Da die registrierten Werte sehr stark von Ihrer Motivation und von Ihrer Bereitschaft, sich anzustrengen, abhängig sind, möchten wir Sie bitten, bei den Krafttests die individuell höchstmögliche Kraft aufzubringen, sodass die Ergebnisse der Krafttrainingsstudie repräsentativ sind.

Im Folgenden informieren wir Sie über wichtige Aspekte zur Krafttrainingsstudie.

#### **Titel der Studie**

Adaption der geschwindigkeitsbasierten Belastungssteuerung für das Widerstandstraining mit submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit

#### **Hintergrund der Studie**

Velocity Based Training etabliert sich in den letzten Jahren zunehmend als Ansatz zur Belastungssteuerung im leistungsorientierten Kraftsport. Die Bewegungsgeschwindigkeit des Widerstands (in der Regel eine Langhantel) wird hierbei über lineare Positionsgeber oder Sensoren zur Lage- und Geschwindigkeitserfassung ermittelt (Weakley et al., 2020).

Dabei können einerseits die Belastungsintensität, über die maximal realisierbare Bewegungsgeschwindigkeit gegen einen bestimmten Widerstand, und andererseits die Belastungsdauer sowie der Grad der Ausbelastung, über den Geschwindigkeitsverlust innerhalb eines oder über mehrere Trainingssätze hinweg, gesteuert werden (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; González-Badillo, Yañez-García, Mora-Custodio & Rodríguez-Rosell, 2017; Hughes, Banyard, Dempsey, Peiffer & Scott, 2019; Izquierdo et al., 2006; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011).

Dies bietet gegenüber starren Steuerungsansätzen auf Basis von Ein- und Mehrwiederholungsmaxima einen Vorteil zur Individualisierung der Belastungssteuerung, da die maximal realisierbaren Kraftleistungen, Kontraktionsgeschwindigkeiten und Wiederholungszahlen gegen einen bestimmten Widerstand tagesform- bzw. regenerationsabhängigen Schwankungen unterworfen sind (Scott, Duthie, Thornton & Dascombe, 2016; Thompson, Rogerson, Ruddock & Barnes, 2020; Weakley et al., 2020).



Velocity Based Training kombiniert dadurch die Vorzüge von deduktiven und induktiven Ansätzen der Trainingssteuerung, da tagesformabhängige Veränderungen der Leistungsfähigkeit und die Annäherung an das Muskelversagen über die Bewegungsgeschwindigkeit messbar gemacht werden (Weakley et al., 2020). Durch die Möglichkeit zur Bewertung der tagesformabhängigen Belastbarkeit sowie zur Steuerung des Ausbelastungsgrades ermöglicht Velocity Based Training eine objektive Autoregulation des Krafttrainings (Greig et al., 2020).

Geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung, wie in der Übersichtsarbeit von Weakley et al. (2020) ausführlich dargestellt, ist allerdings vornehmlich für die spezifische Anwendung im Maximal- und Schnellkrafttraining und nur begrenzt zum Muskelaufbautraining geeignet, da die inhärenten Eigenschaften dieses Konzepts sowie die Anforderungen eines hypertrophiespezifischen Belastungsgefüges teilweise inkompatibel sind.

Durch die vorliegende Studie sollen repräsentative Daten gesammelt werden, auf deren Basis die geschwindigkeitsbasierte Belastungssteuerung für das Widerstandstraining mit submaximaler Bewegungsgeschwindigkeit adaptiert werden kann.

#### Dauer und Umfang der Studie

Zwei Testungen innerhalb von zwei Wochen.

#### Ablauf der Studie

1. Voraussetzungen: Die Teilnahme setzt voraus, dass keine manifesten Erkrankungen des Herz-Kreislauf-, Atmungs- oder muskuloskelettalen Systems vorliegen und somit keine Einschränkungen zur Teilnahme an der Studie bestehen. Diesbezüglich findet vor Beginn der Studie eine Befragung zum Gesundheitsstatus statt.
2. Termin 1: Am ersten Termin wird daher das Einwiederholungsmaximum (1-RM) bei den Krafttrainingsübungen Langhantel-Kreuzheben und Langhantel-Bankdrücken ermittelt, um eine interindividuell vergleichbare Intensitätssteuerung während der X-RM-Tests an Termin 2 zu gewährleisten.
3. Termin 2: Auf der Basis der 1-RM-Testung an Termin 1 werden an Termin 2 die Übungen Langhantel-Kreuzheben und Langhantel-Bankdrücken mit 75% 1-RM mit maximal realisierbarer Wiederholungszahl bis zum Punkt des momentanen Muskelversagens ausgeführt (X-RM-Tests). Jede der beiden Übungen wird einmal mit maximaler ( $v_{max} = 2/0/X/0s$ ) und einmal mit einer submaximalen Bewegungsgeschwindigkeit ( $v_{sub} = 2/0/2/0s$ ) absolviert. Die Reihenfolge der Übungsausführung wird randomisiert, wobei die Pause nach jedem Satz mindestens fünf Minuten lang sein muss.

#### Risiko der Untersuchung

Die Durchführung von Krafttests gelten für krafttrainingserfahrene Personen bei entsprechender Bewegungsvorbereitung als risikoarme sportliche Betätigungen. Ein gesundheitliches Risiko kann bei der vorliegenden Studie als minimal angesehen werden.

**Nutzen der Teilnahme**

Fitnessstraining zur Erreichung der persönlichen optisch-ästhetischen Ideale sowie der Steigerung des Kraftpotenzials durch Vergrößerung der Muskelmasse stellt einen der meistgenannten Gründe für den Besuch von Fitness- und Gesundheitsstudios dar (Statista, 2016).

Daher erscheinen Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Velocity Based Training im Widerstandstraining mit submaximalen Bewegungsgeschwindigkeiten zur Steigerung der Skelettmuskelmasse als sinnvoll und notwendig, um die Vorzüge dieses Ansatzes zur Belastungssteuerung auch außerhalb des leistungsorientierten Kraftsports für die ästhetischen Ziele von Fitnesssportlern nutzbar zu machen.

**Datenschutz**

Die für die Studie erforderlichen persönlichen medizinischen und sportmotorischen Daten werden verschlüsselt und gemäß den gesetzlichen Bestimmungen des Datenschutzes ausgewertet (ergänzend hierzu: Datenschutzerklärung).

**Kontakt bei Fragen**

Sollten Sie noch offenen Fragen haben, können Sie die Deutsche Hochschule für Prävention und Gesundheitsmanagement wie folgt erreichen:

Patrick Berndt, M. Sc. (Studienleiter)      Tel.: 0681 – 68 55 – 0