

# Zusammenhang zwischen RPE und Blutlaktatkonzentration im Krafttraining

Niklas Brown, Benjamin Holfelder, Carolin Hauber, Michael Schilke, Dieter Bubeck, Rolf Brack, Wilfried Alt

Institut für Sport- und Bewegungswissenschaft, Universität Stuttgart

## Zusammenfassung

Die Quantifizierung der Beanspruchung im Krafttraining ist für die Trainingssteuerung essenziell, jedoch mit methodischen Schwierigkeiten verbunden. Daraus leitet sich das Ziel dieser Studie ab, die Laktatleistungsdiagnostik bei einem Hypertrophietraining zusammen mit verschiedenen Formen der RPE-Skala (rating of perceived exertion) anzuwenden. Damit sollen Aussagen über die Validität der RPE-Skala zu verschiedenen Abfragezeitpunkten getroffen werden. Hierfür wurden zwei Studien mit männlichen Probanden durchgeführt (Studie 1:  $n=10$ ,  $23.7 \pm 2.8$  Jahre; Studie 2:  $n=16$ ,  $24.9 \pm 2.0$  Jahre). In beiden Studien wurde jede Übung mit 3 Sätzen (Satzpause 3 min), einem Spannungswiderstand von 8-RM und der Zielvorgabe von 8 Wiederholungen absolviert. Blutlaktat wurde zwei Minuten nach Ende des Satzes sowie vor jeder Übung entnommen. RPE wurden sowohl zeitgleich zur Laktatmessung als auch direkt nach dem Satz in unterschiedlichen Formen abgefragt. Die Ergebnisse zeigen mittlere Zusammenhänge zwischen subjektiver Wahrnehmung mittels RPE und Laktatkonzentrationen (mittlere Korrelationen von  $r=0.55-0.71$ ). Zwischen RPE-O (gesamter Körper) direkt nach der Belastung und den Laktatwerten liegen mit mittleren Korrelationen von  $r=0.71$  die höchsten Zusammenhänge vor. Für die maximalen Laktatwerte der Probanden wurde ein Range von  $4.59-15.22$  mmol/l gemessen. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass sich die subjektive Wahrnehmung der Ermüdung durch ein Hypertrophietraining auf individueller Ebene ähnlich verhält wie die Blutlaktatkonzentration. Hierbei sind die verschiedenen Formen der RPE-Skalen isoliert zu betrachten. Die grosse Spannweite der maximalen Laktatwerte spricht für sehr unterschiedliche individuelle physiologische Reaktionen auf vergleichbare Trainingsreize, sowie eine hohe Abhängigkeit der Höhe des messbaren Laktats und der eingesetzten Muskelmasse. Daraus ergibt sich die Empfehlung, die Beanspruchungsdiagnostik im Hypertrophietraining vor allem im Längsschnitt unter möglichst konstanten Bedingungen einzusetzen. Jedoch ist eine zuverlässige Empfehlung für die Wahl eines geeigneten Diagnoseparameters zur Quantifizierung der Beanspruchung im Krafttraining nicht möglich.

## Abstract

Quantifying actual individual training intensity in resistance training is essential for athletes and trainers, but is at present only possible with methodological problems. Thus, the purpose of this article is to examine the relationship of different types of RPE (rating of perceived exertion) with blood lactate concentrations in hypertrophy training. Hereby it is possible, to deduce conclusions about the validity of the RPE-scale and different times of monitoring. In this article two studies with male subjects are presented (study 1:  $n=10$ ,  $23.7 \pm 2.8$  years; study 2:  $n=16$ ,  $24.9 \pm 2.0$  years). In both surveys, subjects had to complete 3 sets with 3 minutes of rest between sets in every exercise. Blood lactate was measured before each exercise and two minutes after the completion of each set. RPE was questioned in different forms simultaneous to lactate measurement as well as directly after each set. Results show medium correlations between subjective perception of exertion and blood lactate concentrations (mean  $r=0.55-0.71$ ). RPE for the whole body (RPE-O) directly measured after the sets, showed the highest relationship with  $r=0.71$ . Maximum lactate values ranged from  $4.59-15.22$  mmol/l between the subjects. As a result, subjective perception of exertion seems to be parallel to blood lactate concentration on an individual basis. Here, the different forms of RPE-questioning have to be regarded individually. The large range of lactate values show a high individuality of lactate response, also influenced by the amount of muscle mass used. As a conclusion, quantifying individual training intensity should be only done in an individual, longitudinal setting with highly constant surrounding conditions. Although it remains unclear, if a discrete and valid diagnostic tool exists.

## Einleitung

Im Leistungssport kann eine maximale Leistungsfähigkeit nur über eine optimale Gestaltung des Trainingsprozesses erreicht werden. Der Trainingsprozess sollte dabei durch ein optimales Verhältnis von Beanspruchung und Erholung gekennzeichnet sein. Ein wesentliches Ziel ist die Vermeidung von Übertrainingszuständen (Meeusen et al., 2006) bei gleichzeitiger Ausnutzung des Adaptationspotenzials des Athleten. Zur Erreichung dieses optimalen Verhältnisses, ist es notwendig, dass die tatsächliche Beanspruchung präzise erfasst werden kann. Nur die genaue Kenntnis über das Beanspruchungs- und Erholungsverhältnis des Sportlers ermöglicht die individuelle Anpassung von Trainingsreizen. Darauf basierend kann im Hinblick auf den Wettkampfhöhepunkt die Trainingsplanung und -periodisierung optimal erfolgen.

Im Krafttraining ist die Quantifizierung der Beanspruchung bisher nur näherungsweise möglich, da physiologische Faktoren entweder nur aufwändig über invasive Verfahren messbar sind oder in anderen Bereichen etablierte Messverfahren, wie die Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahmen, keinen direkten Zusammenhang zur Trainingsbeanspruchung zeigen (Wirtz, Buitrago, Kleinöder, & Mester, 2009). Als relativ einfache Methode zur objektiven Beanspruchungserfassung kann die Laktatleistungsdiagnostik genannt werden. Obwohl Laktatparameter hinsichtlich der Stabilität, Aussagekraft und Interpretierbarkeit diskutiert werden, wird die Laktatleistungsdiagnostik in ausdauerdeterminierten Sportarten als Goldstandard bezeichnet (Di Michele et al., 2012; Pyne, Lee, & Swanwick, 2001), die auch im Krafttraining häufig Anwendung findet (Buitrago, Wirtz, Yue, Kleinöder, & Mester, 2011; Wirtz, Buitrago, Kleinöder, & Mester, 2010; Wirtz, Kleinöder, Baucsek, & Mester, 2012). Es ist bekannt, dass Faktoren wie der Trainingszustand, insbesondere der Übertrainingszustand (Bosquet, Léger, & Legros, 2001), die Ernährung vor dem Laktattest (Crewther, Cronin, & Keogh, 2006) und die beanspruchten Muskelfasertypen (Brooks, 2009; Philp, Macdonald, & Watt, 2005) die individuelle Laktatkinetik beeinflussen. Wenngleich die vollständige Erforschung des Laktatmoleküls noch aussteht (Bruce Gladden, 2008; Olbrecht, 2011), ist die Rolle des Laktatmoleküls als Energiequelle, glukoneogenetischer Vorläufer und Signalmolekül anerkannt (Brooks, Brooks, & Brooks, 2008; Philp et al., 2005; van Hall, 2010; Wahl, Bloch, Mester, 2009). Das Verständnis der Laktat-Shuttle-Mechanismen (Brooks, 2009; Brooks et al., 2008; Gladden, 2008; Hashimoto & Brooks, 2008) verdeutlicht, dass es sich bei der im kapillaren Blut gemessenen Laktatkonzentration um die Bilanz aus Produktion und Elimination handelt und nicht um die tatsächliche Laktatproduktion in der Muskulatur (Buitrago et al., 2011; Wirtz et al., 2012). Dennoch wird diese Vorgehensweise von Crewther et al. (2006) als hinreichend geeignet für die Leistungsdiagnostik eingestuft. Auch Westerblad, Bruton, und Katz (2010, S. 3093–3099) bestätigen diese Ansicht durch nachfolgendes Zitat:

*«Despite the fact that acidosis is not a major cause of fatigue, blood lactate is easy to measure and can serve as a good indicator of the extent of anaerobic metabolism used by muscles during exercise.»*

Jedoch können diese Formen der Beanspruchungsbestimmung kaum ökonomisch und ethisch vertretbar in den Trainingsalltag integriert werden, weshalb die Belastung beispielsweise mittels der bewegten Gewichte, häufig in Abhängigkeit zum 1-Wiederholungsmaximum (1-RM), ange-

geben werden. Weitere klassische Quantifizierungsfaktoren sind: die Wiederholungszahl, die Anzahl der Sätze, die Pausendauer und Anzahl der Trainingseinheiten sowie die Dauer der Trainingsperiode (Toigo, 2006). Um dennoch näherungsweise die Beanspruchung auf individueller Ebene zu bestimmen, verwenden viele aktuelle Studien den RPE (rating of perceived exertion) (Farah et al., 2012; Farinatti, da Silva, & Monteiro, 2013; Hardee et al., 2012; Lodo et al., 2012), in Anlehnung an die für den Ausdauerbereich entwickelte Borg-Skala (Borg, 1970). Wie im Folgenden gezeigt wird, ist dabei die Validität des Parameters RPE im Krafttraining nicht gesichert. Zudem gestaltet sich aber auch die physiologische Beanspruchungsdiagnostik als schwierig. Ziel des Artikels ist, Aussagen über den Zusammenhang zwischen physiologischer Reaktion in Form des Blutlaktats und verschiedenen Formen des RPE treffen zu können, um eine zuverlässigere Form der Beanspruchungsdiagnostik im Krafttraining zu ermöglichen.

## Laktat und Krafttraining

In der Studie von Wirtz et al. (2010), in der die Laktatkonzentrationen bei vier verschiedenen Krafttrainingsmethoden ( $n=10$  männlichen Probanden,  $\bar{X} 27.3 \pm 3.2$  Jahre) untersucht wurden, konnten die grössten Laktatkonzentrationen bei ausbelastenden Kraftbelastungen mit submaximalen Zusatzlasten, also einem Hypertrophietraining, gemessen werden (Wirtz et al., 2012). Die Frage, inwieweit im Rahmen eines Hypertrophietrainings mit Hilfe von Laktatkonzentrationen physiologisch begründbare und methodisch zuverlässige Aussagen über die Beanspruchung erfolgen können, ist derzeit ungeklärt. In der Übersichtsarbeit von Schoenfeld (2013) werden potenzielle Hypertrophiemechanismen als Reaktion auf Krafttraining diskutiert. Es bleibt offen, ob vorwiegend die mechanische Belastung, die damit einhergehenden metabolischen Veränderungen oder eine Kombination aus beiden Faktoren zur Muskelhypertrophie führen. In diesem Zusammenhang ist auch die Rolle des Laktatmoleküls als Signalmolekül (Brooks, 2009) nicht klar. Es wird berichtet, dass die belastungsbedingte Zunahme der Laktatkonzentration und/oder von  $H^+$  und die damit verbundene pH-Wert-Abnahme zu einer vermehrten Ausschüttung von Wachstumshormonen (GH) führt (Loenneke, Wilson, & Wilson, 2010; Schoenfeld, 2010; Viru, Jansson, Viru, & Sundberg, 1998). Nach Velloso (2008) verstärken GH die Ausschüttung von IGF-1 (insulin-like growth factor 1), wobei zwischen IGF-1 und Muskelhypertrophie von einem kausalen Zusammenhang berichtet wurde (Haddad & Adams, 2004) und IGF-1 physiologisch als ein primärer Regulator der Muskelmasse diskutiert wird (Stewart & Pell, 2010). Auch weitere diskutierte Hypertrophiemechanismen wie das «Cell Swelling» werden mit der Laktatakkumulation in Verbindung gebracht (Schoenfeld, 2013). Als Reaktion auf muskuläre Belastung liefert die glykolysebedingte Zunahme der Laktatkonzentration einen wesentlichen Beitrag zu osmotischen Veränderungen in der Skelettmuskulatur (Frigeri, Nicchia, Verbavatz, Valenti, & Svelto, 1998; Sjøgaard, Adams, & Saltin, 1985). Dadurch werden volumenregulierende Mechanismen getriggert (Lang et al., 1998), d.h. das Laktatmolekül fungiert als Signalmolekül. Insbesondere FT-Fasern (fast twitch Fasern) reagieren sensibel auf osmotische Veränderungen (Schoenfeld, 2013) und weisen das grösste Hypertrophiepotenzial auf (Kosek, Kim,

Petrella, Cross, & Bamman, 2006). Des Weiteren agieren Skelettmuskelfasern des Typ IIA in aktivem Zustand als Laktathauptproduzenten (Billat, Sirvent, Py, Koralsztein, & Mercier, 2003; Gladden, 2004; Philp et al., 2005), hingegen verfügen oxidative Fasern über eine grössere Kapazität anfallendes Laktat zu verstoffwechseln (Donovan & Pagliasotti, 2000; Gladden, 2008). Als weiterer potenzieller Hypertrophiemechanismus wird von Schoenfeld (2010) der Einfluss lokaler Hypoxie in der beanspruchten Muskulatur diskutiert, die kurz nach Belastungsbeginn entsteht (Richardson, Noyszewski, Kendrick, Leigh, & Wagner, 1995). Sauerstoffmangel und Laktatbildung führen zur Stabilisierung und Akkumulation des Hypoxie induzierten Faktors-1 $\alpha$  (HIF-1 $\alpha$ ; Koulmann & Bigard, 2006; Lu et al., 2005), sodass bei weiter fallendem Sauerstoffpartialdruck transkriptionelle Co-Faktoren rekrutiert und über 70 Effektorgene im Zellkern aktiviert werden (Toigo, 2006; Wenger, Stiehl, & Camenisch, 2005). Über HIF-Effektorgene werden beispielsweise der Zellmetabolismus, die Sauerstoffversorgung, die Angiogenese und das Zellwachstum reguliert (Wahl et al., 2009; Wenger et al., 2005), die sich auf die Eigenschaften des Muskelfasertyps auswirken. In der Studie von Takarada et al. (2000) wird Hypoxie als Ursache für eine vermehrte Laktatakkumulation und einen verminderten Laktatabbau genannt. Hingegen wird seit einigen Jahren die Meinung vertreten, dass eine unzureichende Sauerstoffversorgung nicht die direkte Ursache für eine vermehrte Laktatbildung ist (Wahl et al., 2009). Vielmehr scheint die Veränderung der Laktatkonzentration zusammen mit beispielsweise der Veränderung des Sauerstoffpartialdrucks oder des ATP/AMP-Verhältnisses eine Reaktion auf belastungsinduzierte chemische Veränderungen zu sein und nicht die Ursache (ebd.).

## RPE im Krafttraining

Im Krafttrainingsbereich wird aktuell vornehmlich die 10-stufige RPE-Skala verwendet, und in Kombination mit grafischen Interpretationsstützen als OMNI-Res-Skala zur Verwendung empfohlen (Gearhart, Lagally, Riechman, Andrews, & Robertson, 2009; Lagally & Robertson, 2006). Während im Ausdauerbereich ein hoher Zusammenhang zwischen physiologischen Beanspruchungsparametern und der Wahrnehmung festgestellt werden konnte (Scherr et al., 2012) ist im Krafttraining unklar, welche Form der Ermüdung durch den RPE repräsentiert wird. Das Geschlecht ist offensichtlich für die Wahrnehmung der Ermüdung mittels RPE nur bei exzentrischen Kontraktionen relevant (Pincivero, Polen, & Byrd, 2010). Allerdings wurde in mehreren Untersuchungen kein klarer Einfluss der Kontraktionsform auf den RPE festgestellt (Hollander et al., 2008; Hollander et al., 2003; Miller et al., 2009). Auch das Alter scheint die subjektive Wahrnehmung hinsichtlich des RPE im Krafttraining nicht zu beeinflussen (Pincivero, Timmons, & Elsing, 2010). Allerdings beeinflusst der aktuelle Trainingsstatus (Testa, Noakes, & Desgorces, 2011; Tiggemann et al., 2010) und die Dauer des Trainings die Bewertung mittels RPE (Springer & Pincivero, 2010). Es hat sich gezeigt, dass der RPE mit der Anzahl an Sätzen, aber unabhängig von der Pause zwischen den Sätzen, zunimmt (Farah et al., 2012; Hardee et al., 2012; Senna et al., 2011). Zudem konnte ein negativer Zusammenhang zwischen der Länge der Pause und dem RPE festgestellt werden, d.h. mit kürzeren Pausen

geht eine Steigerung des RPE einher (Farah et al., 2012; Hardee et al., 2012; Kraemer, Noble, Clark, & Culver, 1987; Senna et al., 2011). Insgesamt ist unklar, welche Skalenausprägung im Krafttraining die grösste Validität aufweist und den höchsten Zusammenhang mit der physiologischen Ermüdung zeigt. Zu dieser Forschungsfrage liegen bisher nur wenige gesicherte Ergebnisse vor. Sousa, Bertucci und Souza (2012) fanden mittlere bis hohe signifikante Korrelationen zwischen der Blutlaktatkonzentration und der OMNI-Res-, bzw. der 6–20-Borgskala. Allerdings wurden hier ausschliesslich submaximale Kontraktionen an nur einer Übung getestet. Ähnliche Studien mit Training bis zum Wiederholungsmaximum oder in denen weitere Übungen einbezogen wurden, konnten nicht identifiziert werden. Im Folgenden werden im Rahmen einer Hypertrophietrainingsmethode verschiedene Formen der RPE-Skala mit dem physiologischen Parameter Laktat kontrolliert, um daraus Aussagen über die Validität der RPE-Skala treffen zu können. Zudem sollen für die Verwendung der RPE-Skala Empfehlungen für den Abfragezeitpunkt und die Form der einzusetzenden Skala abgeleitet werden.

## Material und Methoden

### a) Versuchspersonen

In Studie 1 wurden zehn männliche Probanden ( $23.7 \pm 2.8$  Jahre;  $181.1 \pm 9.1$  cm;  $74.5 \pm 6.1$  kg) einbezogen. Sieben der zehn Probanden gaben an, regelmässig und mindestens einmal wöchentlich Krafttraining zu absolvieren.

Die zweite Studie wurde mit 16 männlichen Probanden ( $24.9 \pm 2.0$  Jahre;  $186.9 \pm 8.3$  cm;  $83.0 \pm 9.5$  kg) durchgeführt. Diese wiesen im Mittel  $4.7 \pm 2.2$  Jahre Krafttrainingserfahrung mit  $2.6 \pm 1.1$  Trainingseinheiten pro Woche auf.

### b) Geräte und Apparaturen

In beiden Studien wurde die RPE-Skala mit Skalenbereich von 0–10 verwendet. Es wurden an jedem Messzeitpunkt zwei Formen des RPE abgefragt. Zum einen der RPE-O (overall), der die Gesamterschöpfung abfragt (Colado et al., 2012), zum anderen der RPE-AM (active muscle), der die Ermüdung des trainierten Muskels erhebt (ebd.). Die RPE-AM- und RPE-O-Werte direkt nach dem Trainingssatz werden im weiteren Verlauf mit RPE-AM<sub>0</sub> und RPE-O<sub>0</sub> beschrieben. Die RPE-Abfragen zwei Minuten nach Ende des Satzes, parallel zur Laktatabnahme, werden im Folgenden mit RPE-AM<sub>2</sub> und RPE-O<sub>2</sub> bezeichnet. Die Werte zwei Minuten nach Ende des Satzes wurden nur in Studie 2 gemessen. Zudem erfolgte 30 Minuten nach Ende der Trainingseinheit die Abfrage des Session-RPE (Day, McGuigan, Brice, & Foster, 2004).

Die Laktatentnahme erfolgte vor der jeweiligen Übung und nach jedem Satz am Ohrläppchen. Dieses wurde vorab mit Finalgon-CPD-Wärmecreme (Boehringer Ingelheim) behandelt, um den Blutfluss zu erhöhen und somit die zeitkritischen Abnahmezeitpunkte realisieren zu können. Zu jedem Messzeitpunkt wurden 20 $\mu$ l Blut mit einer Glaspipette entnommen, anschliessend in 1ml Glukose/Laktathämolyselösung eingelegt und bis zur Analyse gekühlt. Die Laktatkonzentration wurde mittels Biosen S-Line (EKF Diagnostics Holdings, Penarth, Wales) analysiert. Bei dieser Bestimmungsmethode sind Werte unterhalb 0,5 mmol/l

nicht messbar und werden in der statistischen Auswertung als 0,5 mmol/l berücksichtigt. In Studie 1 wurden 80 Laktatproben (40 im Vortest, 40 im Haupttest), in Studie 2 insgesamt 256 Laktatproben entnommen (64 im Vortest, 192 im Haupttest).

c) *Versuchsplan*

In beiden Studien erhielten die Probanden die Anweisung, 96 h vor der Messung kohlenhydratreiche Ernährung zu sich zu nehmen. Zudem wurde ein Ernährungsprotokoll angefertigt, um die Einhaltung der Vorgabe zu kontrollieren. Die Probanden absolvierten zwei Tage vor dem Haupttest einen Vortest, in dem die RPE-Skala mit entsprechenden Ankerpunkten erklärt wurde. Zudem erfolgte die Messung des individuellen Ruhelaktats, die individuelle Variabilität des Ruhelaktats und des RPE bei vier Messungen in Ruhelage. Das

Protokoll der Ruhemessung entsprach den zeitlichen Abständen für die Laktatentnahmen im Haupttest. Zudem wurde im Vortest für jede Übung das 8-RM (RM = repetition maximum) bestimmt. Hierfür erfolgte für jeden Proband die Ermittlung eines Trainingsgewichtes, mit dem i.d.R. im Hypertrophiebereich (8–12 Wiederholungen) trainiert wird. Mit diesem Gewicht wurde bis zum Wiederholungsmaximum trainiert, anschliessend mit der Formel nach Brzycki (1993) das 1-RM errechnet und hieraus das 8-RM bestimmt.

In Studie 1 erwärmten sich die Probanden fünf Minuten auf einem Crosstrainer. Anschliessend wurde eine Krafttrainingsübung (Bizepscurl, DAVID) mit drei Sätzen und drei Minuten Satzpause durchgeführt. Die Probanden trainierten mit dem im Vortest ermittelten 8-RM-Gewicht bis zum Wiederholungsmaximum bei vollem Bewegungsumfang. Wurde die Vorgabe von acht Wiederholungen über- oder unterschritten, fand eine Anpassung des Gewichts durch den Versuchsleiter statt.

**Tabelle 1:** Mechano-biologische Deskriptoren des Krafttrainingsreizes in beiden Studien, nach Vorgabe von Toigo & Boutilier (2006). RM = Wiederholungsmaximum; ROM = range of motion (Bewegungsumfang).

Mechano-biologischer Deskriptor	Studie 1	Studie 2
Höhe des Spannungswiderstands	8-RM	8-RM
Anzahl Wiederholungen	Zielvorgabe 8 Wiederholungen	Zielvorgabe 8 Wiederholungen
Anzahl Sätze	3	3
Pause zwischen den Sätzen	3 min	3 min
Anzahl Trainingseinheiten	1	1
Verteilung d. Kontraktionsarten (CON:ISO:ECC) in Sekunden	2:1:2	2:1:2
Pause zwischen interm. Wiederholungen	0	0
Bewegungsumfang	100% ROM	100% ROM für Bankdrücken und Lat-Zug, Beinpresse 90° Kniewinkel bis max. 180°
Erholungszeit zwischen den Trainingseinheiten	–	–
Anatomisch Definition der Übungsausführung	Biceps-Curl auf der Scott-Curl Bank mit SZ-Stange, Übungsausführung ohne heben der Schultern	Bankdrücken: liegend, ca. schulterbreiter Griff; Lat-Zug: sitzend, ca. schulterbreiter Griff; Beinpresse: liegend, Hüftbreite Fussposition, Hände fixiert

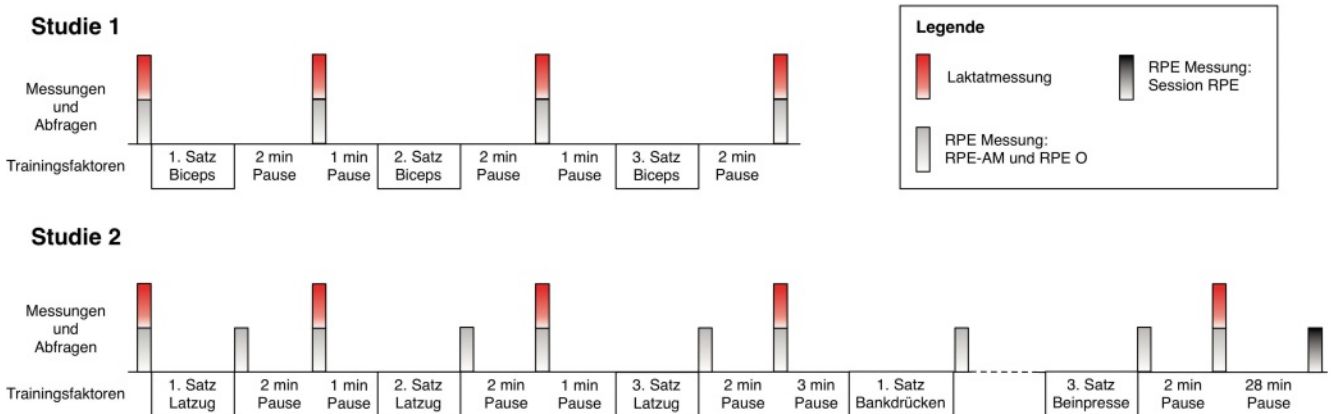


Abbildung 1: Versuchsplan beider Studien. Laktatmessungen sind rot gekennzeichnet, RPE-Messungen bedeuten immer eine Abfrage beider RPE-Werte (RPE-AM und RPE-O).

In Studie 2 fand ebenfalls eine fünfminütige Aufwärmphase auf einem Crosstrainer statt. Danach wurden die drei Übungen Latissimus-Zug (DAVID), Bankdrücken (DAVID), Beinpresse (Phoenix) in dieser Reihenfolge, mit jeweils drei Sätzen, drei Minuten Satzpause und fünf Minuten Pause zwischen den Übungen durchgeführt. Die detaillierten mechanobiologischen Deskriptoren des Krafttrainingsreizes in Studie 2 befinden sich in *Tab. 1*. Auch hier wurden die Gewichtsvorgaben aus dem Vortest übernommen. Es wurde ebenfalls mit vollem Bewegungsumfang bis zum Wiederholungsmaximum trainiert, mit dem Ziel, das 8-RM zu erreichen. Die Blutprobenentnahme und Auswertung der Laktatwerte erfolgte exakt wie in Studie 1. Die genauen Abfragezeitpunkte der RPE-Skala, sowie die Blutentnahmen für beide Studien sind in *Abb. 1* dargestellt.

#### d) Datenauswertung und statistische Methoden

Beide Studien wurden mit IBM SPSS Statistics 20 für Windows sowie Microsoft Excel 2011 für Macintosh ausgewertet. Studie 1 wird im Folgenden, aufgrund der geringen Stichprobengröße, nur deskriptiv betrachtet. In Studie 2 wurden die individuellen Zusammenhänge zwischen RPE-Daten und Laktatwerten mit der Spearman Rangkorrelation überprüft. Die einzelnen Korrelationswerte von jedem Probanden wurden Fisher-Z-transformiert, anschliessend gemittelt und wieder rücktransformiert. Um Aussagen über die allgemeinen Zusammenhänge zwischen RPE-Werten und den Blutlaktatkonzentrationen zu generieren, wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt.

## Resultate

### Studie 1:

Die Laktatwerte im Vortest wiesen einen niedrigen Grundlaktatwert mit geringer Variabilität auf ( $0.56 \pm 0.16$  mmol/l). Zudem blieben die Laktatwerte konstant. Im Haupttest war der durchschnittliche Laktatwert auffällig höher ( $2.60 \pm 1.38$  mmol/l). Hier war ein deutlicher Anstieg des Laktatwertes nach den Sätzen zu beobachten. Es wurden im letzten Satz die durchschnittlich höchsten Laktatwerte von  $3.93 \pm 0.75$  mmol/l (Range 2.78–5.20 mmol/l) erreicht (s. *Abb. 2*). Im Bezug auf die RPE-Werte waren im Vortest nur geringe Werte sowohl im RPE-O<sub>0</sub> ( $0.6 \pm 1.03$ ) als auch dem RPE-AM<sub>0</sub> ( $0.73 \pm 0.99$ ) zu erkennen. Im Haupttest waren auch die RPE-Werte deutlich erhöht, mit einer zu beobachtenden Steigerung nach jedem absolvierten Satz. Der RPE-O<sub>0</sub>-Wert war nach dem dritten Satz am höchsten ( $4.0 \pm 1.49$ ), auch der RPE-AM<sub>0</sub>-Wert wurde durchschnittlich nach dem dritten Satz am höchsten bewertet ( $7.80 \pm 1.48$ ). In beiden RPE-Werten sowie im Laktatverlauf ist eine Steigerung des Wertes mit der Anzahl der Sätze zu beobachten (s. *Abb. 2*).

### Studie 2:

Auch hier zeigten sich im Vortest keine auffälligen Änderungen der Ruhelaktatwerte ( $0.61 \pm 0.21$  mmol/l). Im Haupttest war der durchschnittliche Laktatwert deutlich höher ( $6.20 \pm 2.80$  mmol/l). Hier wurden nach dem letzten Satz der Übung «Beinpresse» die durchschnittlich und absolut höchsten Laktatwerte erreicht ( $8.81 \pm 2.68$  mmol/l, Range 4.59–15.22 mmol/l). Ebenso wie in Studie 1, zeigten sich in Studie 2 keine nennenswerten Varianzen in den Ruhe-RPE-Werten im

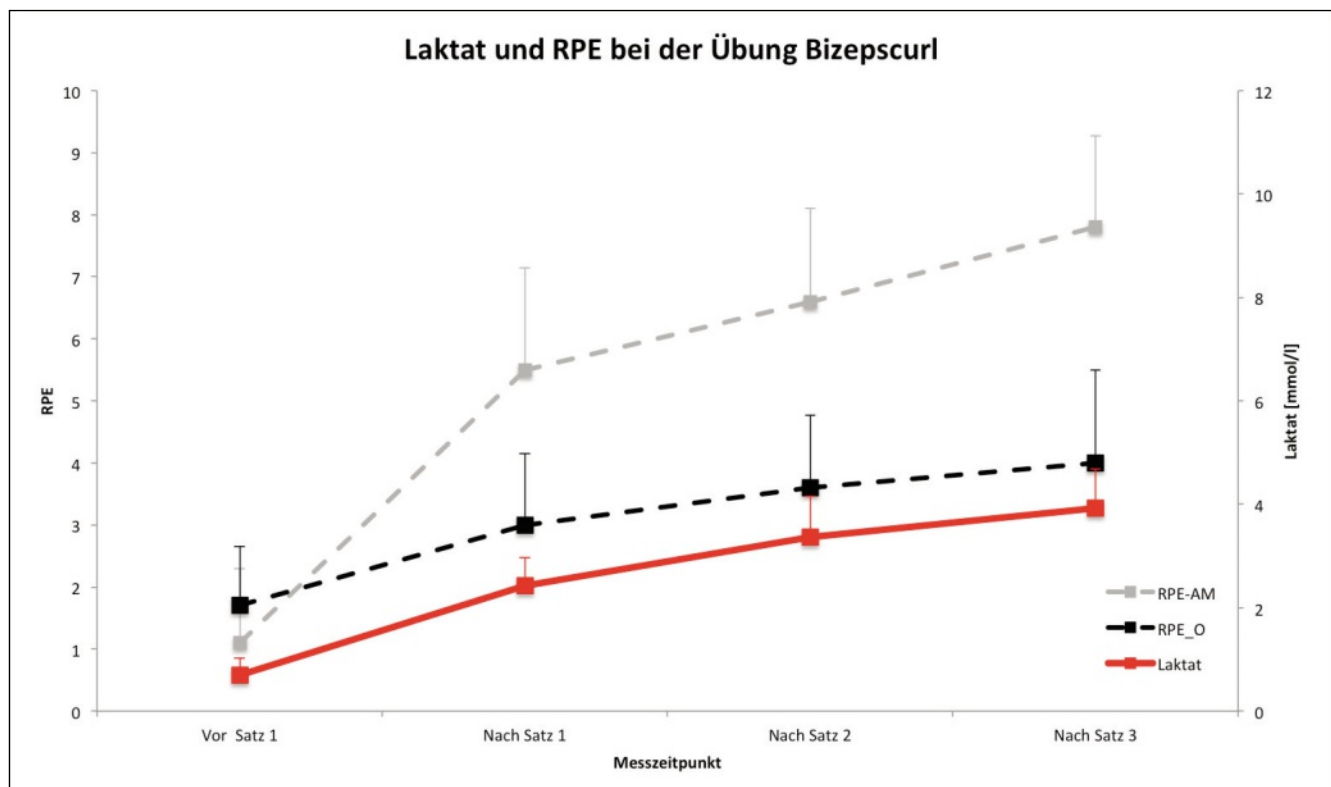


Abbildung 2: Verlauf der Blutlaktatkonzentration und RPE-Werte in Studie 1. Angaben sind Mittelwerte und Standardabweichungen.

Vortest. Hier wurde ein durchschnittlicher RPE-AM<sub>0</sub> von  $0,85 \pm 1,27$  angegeben, der RPE-O<sub>0</sub> wurde im Mittel mit  $0,70 \pm 1,05$  bewertet. Die RPE-Werte im Haupttest waren wiederum deutlich erhöht. Hier gaben die Probanden durchschnittlich  $6,21 \pm 2,83$  für den RPE-AM<sub>0</sub>,  $5,11 \pm 2,01$  für den RPE-O<sub>0</sub>,  $5,38 \pm 1,48$  für den RPE-AM<sub>2</sub> und  $4,31 \pm 1,27$  für den RPE-O<sub>2</sub> an. Die Trainingseinheit wurde anhand des Ses-

sion RPE mit durchschnittlich  $6,69 \pm 1,54$  bewertet. Über die 12 Messzeitpunkte ist eine Steigerung der Laktat- und RPE-Werte zwischen den Sätzen zu beobachten. Die Werte fallen nach dem Wechsel der Übung geringfügig. Die Verläufe sind in *Abb. 3* und *Abb. 4* dargestellt.

Die Regressionsanalyse ergab für die RPE-Werte direkt nach der Belastung die höchsten Bestimmtheitsmasse. So

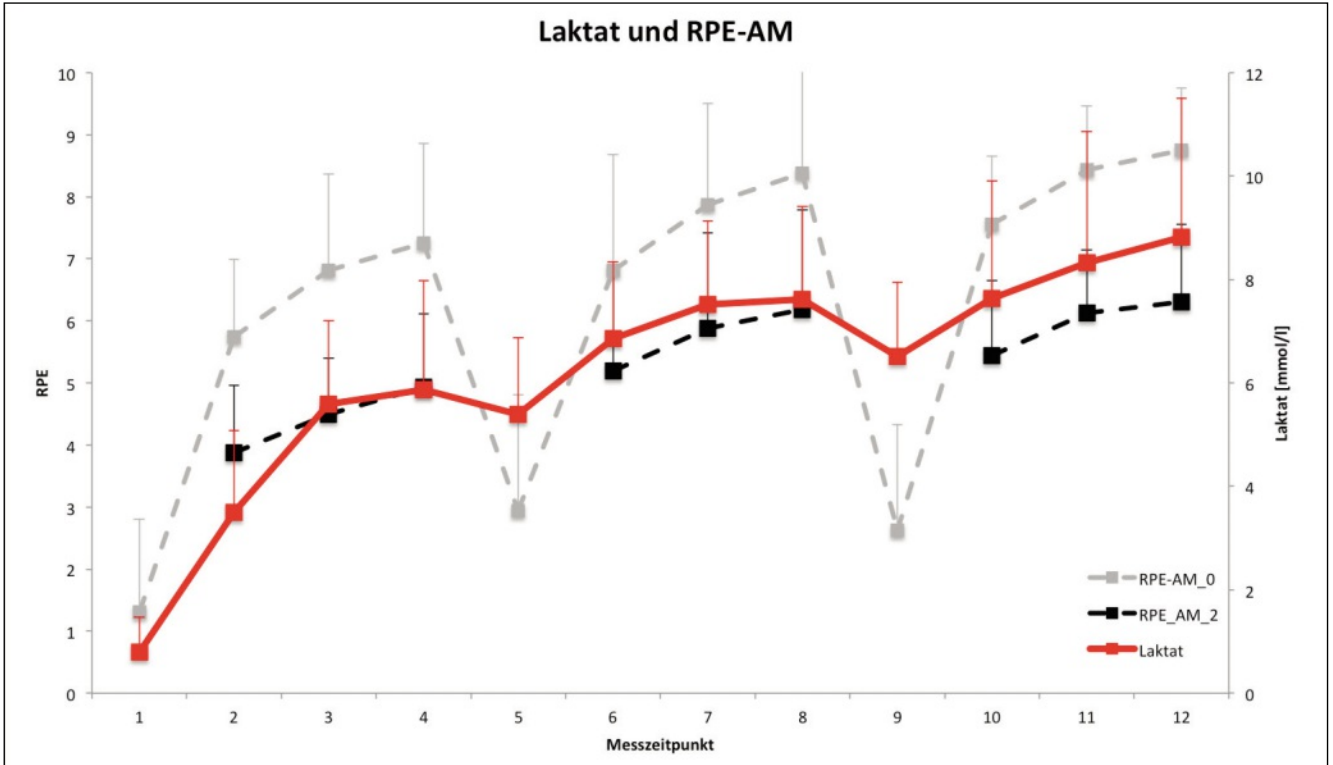


Abbildung 3: Verlauf der Blutlaktatkonzentration und RPE-AM über 12 Messzeitpunkte in Studie 2. Da vor der Übung kein RPE-AM<sub>2</sub> gemessen werden kann, fehlt dieser Wert in der Grafik.

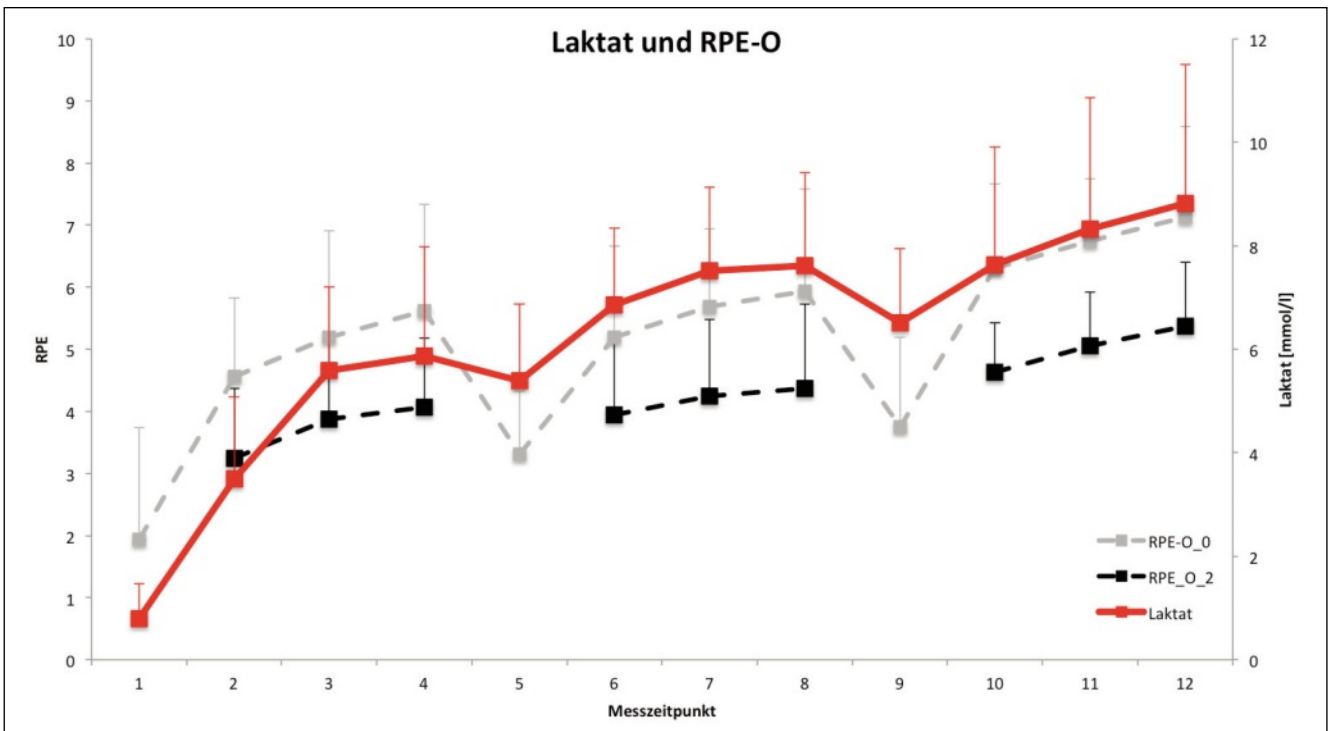


Abbildung 4: Verlauf der Blutlaktatkonzentration und RPE-O über 12 Messzeitpunkte in Studie 2. Da vor der Übung kein RPE-O<sub>2</sub> gemessen werden kann, fehlt dieser Wert in der Grafik.

wurde für den RPE-AM<sub>0</sub> ein Bestimmtheitsmass von R<sup>2</sup>=0.23 festgestellt. Für den RPE-O<sub>0</sub> konnte ein Bestimmtheitsmass von R<sup>2</sup>=0.18 analysiert werden. Für die RPE-Werte zwei Minuten nach der Belastung wurden nur geringe Bestimmtheitsmasse festgestellt (RPE-AM<sub>2</sub>: R<sup>2</sup>=0.01; RPE-O<sub>2</sub>: R<sup>2</sup>=0.03). Die Regressionsgeraden für RPE-AM<sub>0</sub> und RPE-O<sub>0</sub> sind in *Abb. 5* und *Abb. 6* dargestellt.

Es konnten bei 12 der 16 Probanden signifikant hohe Korrelationen zwischen Laktat und RPE-O<sub>0</sub> festgestellt werden.

Die mittlere Korrelation ergab für diese beiden Parameter einen hohen Zusammenhang (r=0.71). Die weiteren RPE-Werte korrelierten ebenfalls mittel bis hoch. Bei RPE-AM<sub>0</sub> konnte eine mittlere Korrelation von r=0.67, bei RPE-AM<sub>2</sub> eine durchschnittliche Korrelation von r=0.57 festgestellt werden. Der RPE-O<sub>2</sub> wies den geringsten Zusammenhang mit den Laktatwerten auf (r=0.55). Bei Betrachtung des Session-RPE in Studie 2, liegt der höchste Zusammenhang für die über die Trainingseinheit gemittelten RPE-AM<sub>0</sub>-

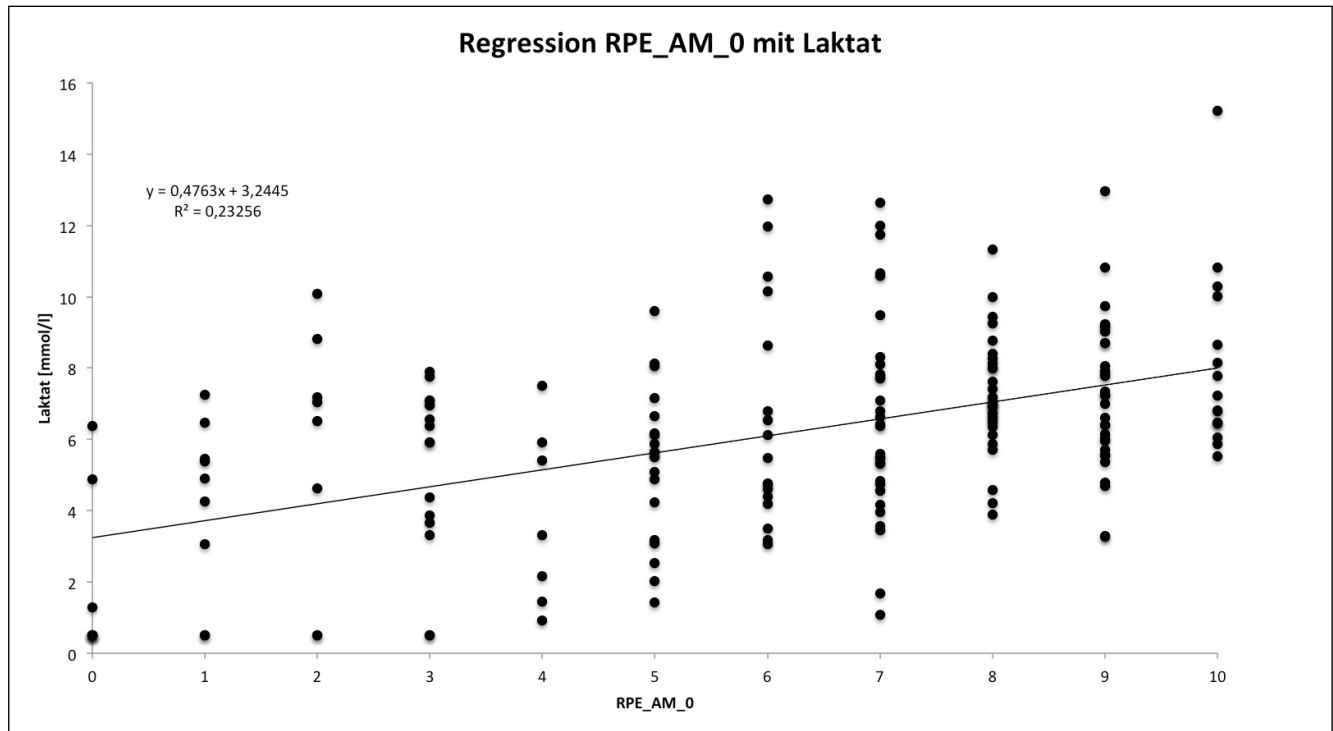


Abbildung 5: Regressionsanalyse von RPE-AM<sub>0</sub> und Blutlaktatkonzentration für Studie 2 über alle Messzeitpunkte. Das Bestimmtheitsmass R<sup>2</sup> beträgt 0.23.

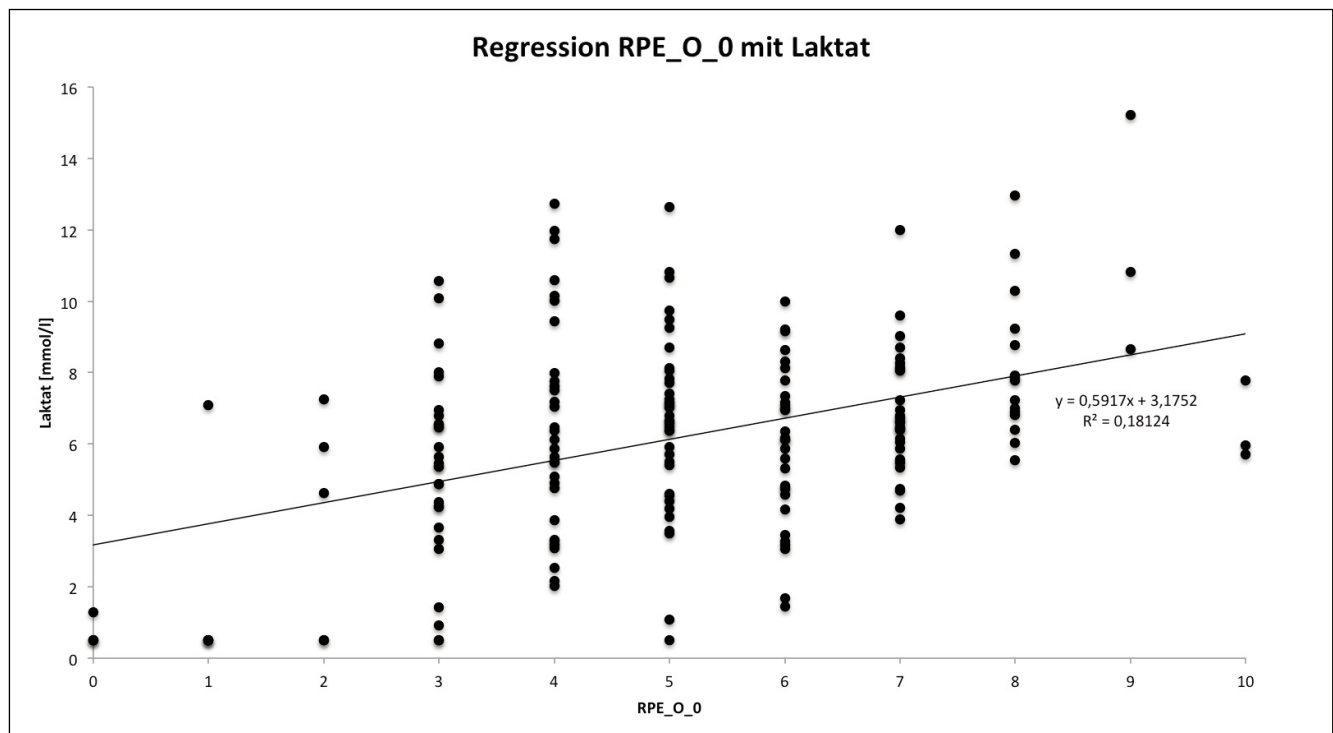


Abbildung 6: Regressionsanalyse von RPE-O<sub>0</sub> und Blutlaktatkonzentration für Studie 2 über alle Messzeitpunkte. Das Bestimmtheitsmass R<sup>2</sup> beträgt 0.18.

**Tabelle 2:** Korrelationstabelle für die verschiedenen RPE-Faktoren für Studie 2. Dabei handelt es sich bei den RPE-Werten um die Fisher-Z-transformierten Mittelwerte. RPE-AM<sub>0</sub>=RPE für den aktiven Muskel direkt nach der Übung; RPE-O<sub>0</sub>=RPE für den Gesamtkörper direkt nach der Übung; RPE-AM<sub>2</sub>=RPE für den aktiven Muskel 2 Minuten nach Übungsende; RPE-O<sub>2</sub>=RPE für den Gesamtkörper 2 Minuten nach Übungsende; m\_RPE[...] = gemittelte RPE-Werte für den jeweiligen Faktor über alle Messzeitpunkte; m\_Laktat=mittlerer Laktatwert über alle Messzeitpunkte; Laktat\_max=maximaler Laktatwert aller Messzeitpunkte.

Faktor	Spearman-Rho mit Laktatwert	p-Wertebereich
RPE-AM <sub>0</sub>	0.67	0–0.43
RPE-O <sub>0</sub>	0.71	0–0.16
RPE-AM <sub>2</sub>	0.57	0.001–0.78
RPE-O <sub>2</sub>	0.55	0.004–0.94
Spearman-Rho mit Session RPE		p-Wert
m_RPE-AM <sub>0</sub>	0.52*	0.04
m_RPE-O <sub>0</sub>	0.12	0.65
m_RPE-AM <sub>2</sub>	0.42	0.10
m_RPE-O <sub>2</sub>	–0.15	0.59
m_Laktat	0.31	0.24
Laktat_max	0.33	0.62

Werten vor ( $r=0.52$ ). Zwischen Session-RPE und gemitteltem Laktatwert konnte nur eine geringe Korrelation nachgewiesen werden ( $r=0.31$ ). Auch mit dem maximalen Laktatwert wurde nur ein geringer Zusammenhang festgestellt ( $r=0.33$ ). Eine Übersicht der Zusammenhänge befindet sich in *Tab. 2*.

## Diskussion

Die Ergebnisse von Studie 2 zeigen, dass zwischen der subjektiven Wahrnehmung und dem physiologischen Parameter Laktat mittlere Zusammenhänge vorliegen. Die Zusammenhänge zwischen RPE und Laktat waren vergleichbar mit den hohen Zusammenhängen im Ausdauerbereich bei Scherr et al. (2012). Allerdings fallen die Korrelationen geringer aus als in der Studie von Kraemer et al. (1987), in der bei Kraftsportlern Korrelationen von  $r=0.84$  gefunden wurden. Bei Hollander et al. (2003) konnte eine ähnlich hohe Korrelation von  $r=0.73$  zwischen Blutlaktat und RPE festgestellt werden. Lediglich bei Lagally et al. (2002) wurde kein Zusammenhang zwischen RPE und Laktat festgestellt. In Studie 2 ergeben sich aus den Formen und Abfragezeitpunkten der RPE-Skala unterschiedliche Zusammenhänge zwischen RPE und Laktatkonzentration. Auf individueller Ebene sind vor allem zwischen RPE-O<sub>0</sub> (direkt nach der Belastung) und dem Blutlaktatwert die höchsten Korrelationskoeffizienten zu beobachten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die durch die Belastung ausgelöste Bildung von Laktat im Zielmuskel erst mit zeitlichem Versatz gemessen werden kann. Hier fanden Wirtz, Kleinoeder, Baucsek und Mester (2012) nach zwei Minuten die maximalen Laktatwerte nach Kraftbelastungen. Dennoch hängt die Erschöpfung im gesamten Körper offensichtlich eher mit der zentralen physiologischen Beanspruchung zusammen, als mit der Ermüdung des Zielmuskels. Dies scheint logisch, da der gemessene Laktatwert nicht direkt am Zielmuskel entnommen wurde. Hierbei ist zu differenzieren, welchen Hintergrund die RPE-Befragung

besitzt. Ist es das Ziel, die Beanspruchung des Zielmuskels zu erfassen, so ist zu vermuten, dass die Befragung mittels RPE-AM zielführender ist. Bezogen auf die physiologischen Vorgänge in der Muskulatur basiert diese Annahme auf theoretischen Überlegungen, da eine direkte Laktatentnahme am Zielmuskel bei aktuellem Wissensstand methodisch nicht möglich ist. Bei der Befragung ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass die RPE-AM-Werte durchschnittlich höher ausfallen als die RPE-O-Werte. Zudem sind die Werte zwei Minuten nach der Belastung geringer als direkt nach der Belastung. Als Erklärungsgrundlage ist ein kognitiver Verarbeitungsprozess zu vermuten, der die Absenkung der RPE-Werte verursacht. Die Betrachtung der Zusammenhänge auf allgemeiner Ebene zeigt für keinen der RPE-Werte einen inhaltlichen relevanten Zusammenhang mit den Blutlaktatkonzentrationen. Somit sind sowohl RPE- als auch Blutlaktatwerte höchst individuell zu betrachten und sollten nur in längsschnittlichen Forschungsdesigns auf intra-individueller Ebene eingesetzt werden.

Generell kann die Auswahl des Laktats als Kontrollparameter der Ermüdung kritisch betrachtet werden. So zeigt sich an der hohen Variabilität der Laktatausschüttung bei den Probanden (z.B. Laktat\_max ein Range von 4.59–15.22 mmol/l) die sehr individuelle physiologische Reaktion auf vergleichbare Trainingsreize. Diese Variabilität ist auf inter-individuelle Unterschiede in der genetisch determinierten, aber auch trainingsbedingten Muskelarchitektur, zurückzuführen (Togo & Boutellier, 2006). Ausdauertrainierte Athleten mit einem höheren Typ-I-Faseranteil bilden weniger Laktat und verfügen gleichzeitig über eine grössere Kapazität, das anfallende Laktat zu verstoffwechseln (Donovan & Pagliassotti, 2000; Gladden, 2008). Hingegen sind Sportler mit einem höheren Anteil an glykolytischen Fasern in der Lage, höhere Laktatwerte bei geringeren Abbau-Kapazitäten zu bilden (Billat et al., 2003; Gladden, 2004; Philp et al., 2005). Davon abgeleitet scheint die Laktatdiagnostik im Hypertrophietraining für querschnittliche Vergleiche nicht geeignet zu sein. Hingegen ergibt sich ähnlich wie für die Ausdauerleistungsdiagnostik die Empfehlung, längsschnittliche Untersuchungen



unter konstanten Rahmenbedingungen durchzuführen (Benke, Leithäuser, & Ochentel, 2011). Zusammengefasst kann der Zusammenhang zwischen Laktatstoffwechsel und Hypertrophietraining aufgrund der Vielzahl an diskutierten Mechanismen, die möglicherweise zu Hypertrophieprozessen führen (Schoenfeld, 2010, 2013), und den vielfältigen Funktionen, die dem Laktatmolekül zugeschrieben werden (Brooks, 2009; Gladden, 2008; Wahl et al., 2009), weder bestätigt noch widerlegt werden. Es bleibt offen, ob das Laktatmolekül als Signalmolekül direkt Hypertrophieprozesse triggert, zwischen belastungsinduzierten Mechanismen vermittelt oder deren Wirkungsweise verstärkt. Somit kann trotz der bestehenden mittleren bis hohen Zusammenhänge zwischen subjektiver Beanspruchung und Laktatkonzentrationen nicht eindeutig gesagt werden, ob Laktatparameter dabei helfen, umfassendere Aussagen über die Beanspruchung bei einem Hypertrophietraining zu treffen. Für genauere Aussagen über die tatsächliche muskuläre Ermüdung nach der Belastung müssten weitere invasive Verfahren angewandt werden. So könnten über Biopsien im Zielmuskel Aussagen über die akute Ermüdung durch den mechanischen Stress, z.B. über die Menge an Proteinfragmenten getroffen werden. Eine weitere Möglichkeit wäre eine Blutentnahme direkt an einer zielmuskelnahen Vene, um weitere direkte physiologische Erschöpfungsparameter zu erfassen. Diese Form der Diagnostik wäre aber nur bei wenigen Muskelgruppen, wie z.B. im Unterarm, möglich, da entsprechende Venen zugänglich sein müssten, ohne bereits zu weit verzweigt zu verlaufen.

Die Zusammenhänge zwischen dem Session-RPE und den gemittelten RPE-Werten waren alle im geringen bis mittleren Bereich ( $r = -0.15$ – $0.52$ ). Auch hier ist von einem kognitiven Verarbeitungsprozess auszugehen. Erstaunlicherweise war der Session-RPE in den meisten Fällen höher als die gemittelten RPE-Werte während der Trainingseinheit. Somit sollten Session-RPE und direkt abgefragte RPE-Werte nicht verglichen, sondern jeder Wert isoliert betrachtet werden. Ebenso konnte für die gemittelten Laktatwerte, bzw. dem maximalen Laktat (i.d.R. im letzten Satz) nur geringe Zusammenhänge festgestellt werden. Hierfür hätte zusätzlich zum Laktat während des Trainings ein Session-Laktat gleichzeitig mit dem Session-RPE entnommen werden können.

## Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der beiden Studien zeigen, dass sich die subjektive Wahrnehmung der Ermüdung durch Krafttraining auf individueller Ebene ähnlich verhält wie die Blutlaktatkonzentration. Dabei wurde die höchste Übereinstimmung mit dem RPE-Wert für den Gesamtkörper direkt nach Belastungsende festgestellt. Daher ist zu empfehlen, diese Form des RPE für das Krafttraining zu verwenden, wenn Erkenntnisse über den Grad der anaeroben Energiegewinnung gewonnen werden sollen. Dabei variierten in beiden Studien die Laktat- und RPE-Werte interindividuell, sodass deutlich geringere allgemeine Zusammenhänge zwischen RPE und der Laktatkonzentration im kapillaren Blut gefunden wurden. Demnach sollten Zusammenhänge zwischen diesen Parametern ausschließlich auf individueller Ebene betrachtet werden.

Korrespondenzadresse:

Niklas Brown, Institut für Sport- und Bewegungswissenschaft, Universität Stuttgart, D-70569 Stuttgart, E-Mail: niklas.brown@inspo.uni-stuttgart.de

## Literaturverzeichnis

- Benke, R., Leithäuser, R. M., & Ochentel, O. (2011). Blood lactate diagnostics in exercise testing and training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(1), 8–24.
- Billat, V. L. V. L., Sirvent, P., Py, G., Koralsztein, J.-P. J. P., & Mercier, J. (2003). The concept of maximal lactate steady state: a bridge between biochemistry, physiology and sport science. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 33(6), 407–426.
- Borg, G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand. J. Rehab. Med.*, 2, 92–98.
- Bosquet, L., Léger, L., & Legros, P. (2001). Blood lactate response to overtraining in male endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 84(1–2), 107–114. doi:10.1007/s004210000343
- Brooks, G. a. (2009). Cell-cell and intracellular lactate shuttles. *The Journal of Physiology*, 587(Pt 23), 5591–5600. doi:10.1113/jphysiol.2009.178350
- Brooks, G., Brooks, T., & Brooks, S. (2008). Laktat als metabolisches Signal der Genexpression. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 59(12), 280–286.
- Brzycki, M. (1993). Strength Testing-Predicting a One-Rep Max from Reps-to-Fatigue. *JOPEERD--The Journal of Physical Education, Recreation and Dance*, 64.
- Buitrago, S., Wirtz, N., Yue, Z., Kleinöder, H., & Mester, J. (2011). Effects of load and training modes on physiological and metabolic responses in resistance exercise. *European Journal of Applied Physiology*. doi:10.1007/s00421-011-2249-9
- Colado, J. C., Garcia-Masso, X., Triplett, T. N., Flandez, J., Borreani, S., & Tella, V. (2012). Concurrent validation of the OMNI-resistance exercise scale of perceived exertion with Thera-band resistance bands. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 26(11), 3018–3024. doi:10.1519/JSC.0b013e318245c0c9
- Crewther, B., Cronin, J., & Keogh, J. (2006). Possible stimuli for strength and power adaptation: Acute metabolic responses. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 36(1), 65–78.
- Day, M., McGuigan, M., Brice, G., & Foster, C. (2004). Monitoring exercise intensity during resistance training using the session RPE scale. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 18(2), 353–358.
- Di Michele, R., Gatta, G., Di Leo, A., Cortesi, M., Andina, F., Tam, E., ... Merni, F. (2012). Estimation of the anaerobic threshold from heart rate variability in an incremental swimming test. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 26(11), 3059–3066. doi:10.1519/JSC.0b013e318245bde1
- Donovan, C. M., & Pagliassotti, M. J. (2000). Quantitative assessment of pathways for lactate disposal in skeletal muscle fiber types. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(4), 772–777.
- Farah, B. Q. B., Lima, A. H. R. A., Lins-Filho, O. L., Souza, D. J. C. A., Silva, G. Q. M., Robertson, R. J., ... Ritti-Dias, R. M. (2012). Effects of rest interval length on rating of perceived exertion during a multiple-set resistance exercise. *Perceptual and Motor Skills*, 115(1), 279–282.
- Farinatti, P. T. V., da Silva, N. S. L., & Monteiro, W. D. (2013). Influence of exercise order on the number of repetitions, oxygen uptake, and rate of perceived exertion during strength training in younger and older women. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 27(3), 776–785. doi:10.1519/JSC.0b013e31825d9bc1
- Frigeri, A., Nicchia, G. P., Verbavatz, J. M., Valenti, G., & Svelto, M. (1998). Expression of aquaporin-4 in fast-twitch fibers of mammalian skeletal muscle. *The Journal of Clinical Investigation*, 102(4), 695–703. doi:10.1172/JCI2545
- Gearhart, R. F., Lagally, K. M., Riechman, S. E., Andrews, R. D., & Robertson, R. J. (2009). Strength tracking using the OMNI resistance exercise scale in older men and women. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 23(3), 1011–1015. doi:10.1519/JSC.0b013e3181a2ec41
- Gladden, L. B. (2004). Lactate metabolism: a new paradigm for the third millennium. *The Journal of Physiology*, 558(Pt 1), 5–30. doi:10.1113/jphysiol.2003.058701
- Gladden, L. B. (2008). A lactatic perspective on metabolism. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(3), 477–485. doi:10.1249/MSS.0b013e31815fa580
- Haddad, F., & Adams, G. R. (2004). Inhibition of MAP/ERK kinase prevents IGF-I-induced hypertrophy in rat muscles. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 96(1), 203–210. doi:10.1152/japplphysiol.00856.2003
- Hardee, J. P., Lawrence, M. M., Utter, A. C., Triplett, N. T., Zwetsloot, K. A., & McBride, J. M. (2012). Effect of inter-repetition rest on ratings of perceived exertion during multiple sets of the power clean. *European Journal of Applied Physiology*. doi:10.1007/s00421-011-2300-x

- Hashimoto, T., & Brooks, G. A. (2008). Mitochondrial lactate oxidation complex and an adaptive role for lactate production. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(3), 486–494. doi:10.1249/MSS.0b013e31815fcb04
- Hollander, D. B., Kilpatrick, M. W., Ramadan, Z. G., Reeves, G. V., Francois, M., Blakeney, A., ... Kraemer, R. R. (2008). Load rather than contraction type influences rate of perceived exertion and pain. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 22(4), 1184–1193. doi:10.1519/JSC.0b013e31816a8bc2
- Hollander, D., Durand, R., Trynicki, J., Larock, D., Castracane, V., Hebert, E., & Kraemer, R. (2003). RPE, pain, and physiological adjustment to concentric and eccentric contractions. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(6), 1017–1025.
- Kosek, D. J., Kim, J.-S., Petrella, J. K., Cross, J. M., & Bamman, M. M. (2006). Efficacy of 3 days/wk resistance training on myofiber hypertrophy and myogenic mechanisms in young vs. older adults. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md. : 1985), 101(2), 531–544. doi:10.1152/jappphysiol.01474.2005
- Koulmann, N., & Bigard, A.-X. (2006). Interaction between signalling pathways involved in skeletal muscle responses to endurance exercise. *Pflügers Archiv : European Journal of Physiology*, 452(2), 125–139. doi:10.1007/s00424-005-0030-9
- Kraemer, W. J., Noble, B. J., Clark, M. J., & Culver, B. W. (1987). Physiologic responses to heavy-resistance exercise with very short rest periods. *International Journal of Sports Medicine*, 8(4), 247–252. doi:10.1055/s-2008-1025663
- Lagally, K., & Robertson, R. (2006). Construct validity of the OMNI resistance exercise scale. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(2), 252.
- Lagally, K., Robertson, R., Gallagher, K., Goss, F., Jakicic, J., Lephart, S., ... Goodpaster, B. (2002). Perceived exertion, electromyography, and blood lactate during acute bouts of resistance exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(3), 552–559; discussion 560.
- Lang, F., Busch, G. L., Ritter, M., Vökl, H., Waldeger, S., Gulbins, E., & Häussinger, D. (1998). Functional significance of cell volume regulatory mechanisms. *Physiological Reviews*, 78(1), 247–306.
- Lodo, L., Moreira, A., Zavanella, P. M., Newton, M. J., McGuigan, M. R., & Aoki, M. S. (2012). Is there a relationship between the total volume of load lifted in bench press exercise and the rating of perceived exertion? *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 52(5), 483–488.
- Loenneke, J. P., Wilson, G. J., & Wilson, J. M. (2010). A mechanistic approach to blood flow occlusion. *International Journal of Sports Medicine*, 31(1), 1–4. doi:10.1055/s-0029-1239499
- Lu, H., Dalgard, C. L., Mohyeldin, A., McFate, T., Tait, A. S., & Verma, A. (2005). Reversible inactivation of HIF-1 prolyl hydroxylases allows cell metabolism to control basal HIF-1. *The Journal of Biological Chemistry*, 280(51), 41928–41939. doi:10.1074/jbc.M508718200
- Meeusen, R., Duclos, M., Gleeson, M., Rietjens, G., Steinacker, J., & Urhausen, A. (2006). Prevention, diagnosis and treatment of the Overtraining Syndrome. *European Journal of Sport Science*, 6(1), 1–14. doi:10.1080/17461390600617717
- Miller, P. C., Hall, E. E., Chmelo, E. A., Morrison, J. M., DeWitt, R. E., & Kostura, C. M. (2009). The influence of muscle action on heart rate, RPE, and affective responses after upper-body resistance exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 23(2), 366–372. doi:10.1519/JSC.0b013e31818548f6
- Olbrecht, J. (2011). Lactate Production and Metabolism in Swimming. In L. Seifert, D. Chollet, & I. Mujika (Eds.), *World Book of Swimming. From Science to Performance*. (pp. 255–276). New York: Nova.
- Philp, A., Macdonald, A. L. A. L., & Watt, P. W. P. W. (2005). Lactate—a signal coordinating cell and systemic function. *The Journal of Experimental Biology*, 208(24), 4561. doi:10.1242/jeb.01961
- Pincivero, D., Polen, R., & Byrd, B. (2010). Gender and Contraction Mode on Perceived Exertion. *International Journal of Sports Medicine*, 31(5), 359–363.
- Pincivero, D., Timmons, M., & Elsing, D. (2010). RPE angle effects in young and middle-aged adults. *International Journal of Sports Medicine*, 31(4), 257–260.
- Pyne, D. B., Lee, H., & Swanwick, K. M. (2001). Monitoring the lactate threshold in world-ranked swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(2), 291–297.
- Richardson, R. S., Noyszewski, E. A., Kendrick, K. F., Leigh, J. S., & Wagner, P. D. (1995). Myoglobin O<sub>2</sub> desaturation during exercise. Evidence of limited O<sub>2</sub> transport. *The Journal of Clinical Investigation*, 96(4), 1916–1926. doi:10.1172/JCI118237
- Scherr, J., Wolfarth, B., Christle, J. W., Pressler, A., Wagenpfeil, S., & Halle, M. (2012). Associations between Borg's rating of perceived exertion and physiological measures of exercise intensity. *European Journal of Applied Physiology*. doi:10.1007/s00421-012-2421-x
- Schoenfeld, B. J. (2010). The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(10), 2857–2872.
- Schoenfeld, B. 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. doi:10.1007/s40279-013-0017-1
- Senna, G., Willardson, J. M., de Salles, B. F., Scudese, E., Carneiro, F., Palma, A., & Simão, R. (2011). The effect of rest interval length on multi and single-joint exercise performance and perceived exertion. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 25(11), 3157–3162. doi:10.1519/JSC.0b013e318121e23b
- Sjøgaard, G., Adams, R. P., & Saltin, B. (1985). Water and ion shifts in skeletal muscle of humans with intense dynamic knee extension. *The American Journal of Physiology*, 248(2 Pt 2), R190–196.
- Sousa, S., Bertucii, & Souza. (2012). Blood lactate concentration as a potential mediator of ratings of perceived exertions during resistance exercise. In ECSS Book of Abstracts. Brugge.
- Springer, B., & Pincivero, D. (2010). Differences in ratings of perceived exertion between the sexes during single-joint and whole-body exercise. *Journal of Sports Sciences*, 28(1), 75–82. doi:10.1080/02640410903390097
- Stewart, C. E., & Pell, J. M. (2010). IGF is/is not the major physiological regulator of muscle mass. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md. : 1985), 108(6), 1820–1821; discussion 1823–1824; author reply 1832. doi:10.1152/jappphysiol.01246.2009
- Takarada, Y., Takazawa, H., Sato, Y., Takebayashi, S., Tanaka, Y., & Ishii, N. (2000). Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md. : 1985), 88(6), 2097–2106.
- Testa, M., Noakes, T., & Desgorces, F.-D. (2011). Training state improves the relationship between RPE and relative exercise volume during resistance exercises. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 26(11), 2990–2996. doi:10.1519/JSC.0b013e31824301d1
- Tiggemann, C. L., Korzenowski, A. L., Brentano, M. A., Tartaruga, M. P., Alberton, C. L., & Kruegel, L. F. M. (2010). Perceived exertion in different strength exercise loads in sedentary, active, and trained adults. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 24(8), 2032–2041. doi:10.1519/JSC.0b013e3181d32e29
- Toigo, M. (2006). Trainingsrelevante Determinanten der molekularen und zellulären Skelettmuskeladaptation. Teil 2: Adaptation von Querschnitt und Fasertypusmodulen. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 54(4), 121–132.
- 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. doi:10.1007/s00421-006-0238-1
- Van Hall, G. (2010). Lactate kinetics in human tissues at rest and during exercise. *Acta Physiologica* (Oxford, England), 199(4), 499–508. doi:10.1111/j.1748-1716.2010.02122.x
- Velloso, C. P. (2008). Regulation of muscle mass by growth hormone and IGF-I. *British Journal of Pharmacology*, 154(3), 557–568. doi:10.1038/bjp.2008.153
- Viru, M., Jansson, E., Viru, A., & Sundberg, C. J. (1998). Effect of restricted blood flow on exercise-induced hormone changes in healthy men. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 77(6), 517–522. doi:10.1007/s004210050369
- Wahl, P., Bloch, W., Mester, J., für Leistungssport, D. D. F., & Köln, D. S. (2009). Moderne Betrachtungsweisen des Laktats: Laktat ein überschätztes und zugleich unterschätztes Molekül. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 57(3), 100–107.
- Wenger, R. H., Stiehl, D. P., & Camenisch, G. (2005). Integration of oxygen signaling at the consensus HRE. *Science's STKE: Signal Transduction Knowledge Environment*, 2005(306), re12. doi:10.1126/stke.3062005re12
- Westerblad, H., Bruton, J. J. D., & Katz, A. (2010). Skeletal muscle: Energy metabolism, fiber types, fatigue and adaptability. *Experimental Cell Research*, 316(18), 3093–3099. doi:10.1016/j.yexcr.2010.05.019
- Wirtz, N., Buitrago, S., Kleinöder, H., & Mester, J. (2010). Laktatkonzentrationen bei 4 verschiedenen Krafttrainingsmethoden. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 58(3), 85–90.
- Wirtz, N., Buitrago, S., Kleinoeder, H., & Mester, J. (2009). Auswirkungen klassischer Krafttrainingsmethoden auf die Sauerstoffaufnahme während und nach einmaligen, erschöpfenden Belastungen. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 57(3), 108–112.
- Wirtz, N., Kleinoeder, H., Baucsek, S., & Mester, J. (2012). Verlauf der Blutlaktatkonzentration bei aufeinanderfolgenden Kraftbelastungen derselben Muskelgruppe. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 60(1), 26–30.