



universität  
wien

# MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Koffein und Ermüdung im Krafttraining – eine systematische  
Übersichtsarbeit“

verfasst von / submitted by

Felix Glock, Bakk. rer. nat.

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

Master of Science (MSc)

Wien, 2019 / Vienna 2019

Studienkennzahl lt. Studienblatt /  
degree programme code as it appears on  
the student record sheet:

UA 066 826

Studienrichtung lt. Studienblatt /  
degree programme as it appears on  
the student record sheet:

Masterstudium Sportwissenschaft

Betreut von / Supervisor:

Univ. Prof. Mag. Dr. Harald Tschann



# Kurzzusammenfassung

Schon lange wird Koffein im Sport als leistungssteigernde Substanz verwendet. Sowohl im Ausdauersport als auch bei koordinativ anspruchsvollen Bewegungen kann Koffein die Leistung des Zentralnervensystems beeinflussen. Zudem belegen aktuelle Studien die positiven Auswirkungen einer Koffeinnahme auf die Kraftausdauer- und Maximalkraftleistung. Interessanterweise existieren nur wenige, teilweise widersprüchliche, Ergebnisse in Bezug auf die Auswirkungen einer Koffeinnahme bei Mehrfachwiederholungsmaxima (Hypertrophiemethode). Da eine effektive Muskelhypertrophie ein erstrebenswertes Ziel im Leistungs- und Gesundheitssport ist, wäre es jedoch interessant, die möglichen Effekte einer Koffeinsupplementation auf Mehrfachwiederholungsmaxima zu eruieren. Daher wurde in der folgenden Abschlussarbeit eine systematische Übersichtsarbeit zum Thema durchgeführt. Elf Studien, welche zwischen den Jahren 2007 und 2018 veröffentlicht wurden, erfüllten alle vorher definierten Einschlusskriterien und wurden in die Überblicksarbeit aufgenommen. Insgesamt inkludierte die Arbeit 158 männliche Probanden. Die durchschnittliche Koffeinsupplementation in den Interventionsgruppen betrug zwischen 4,7 und 5,3mg/kg Körpergewicht. Eine Studie verwendet absolute Werte in Form von Energy Drinks. Bei 75,4% aller untersuchten Probanden der Interventionsgruppen wurde eine Leistungssteigerung im Vergleich zur Placebo Gruppe festgestellt. 24,6% berichten von einem geringen bzw. keinem leistungssteigernden Effekt. Zehn von elf untersuchten Studien verwendeten ein „double blind crossover“ Studiendesign. Obwohl ein positiver Trend eines Leistungszuwachses zu erkennen ist, kann die Forschungsfrage aktuell nicht eindeutig beantwortet werden. Weitere qualitativ hochwertige Studien, welche Parameter wie zum Beispiel die verabreichte Koffeindosis, den Trainingsstatus der Probanden, den Zeitpunkt der Einnahme, den Schlaf, die Koffeinverträglichkeit, etc. untersuchen, scheinen nötig. Zudem könnten die aktuellen bzw. zukünftigen Studiendaten mit quantitativen Verfahren (z.B.: Metaanalysen) zusammengefasst werden um statistisch aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

# Abstract

Caffeine has long been used as a performance-enhancing substance in sports. It is well established, that caffeine can affect the performance of the central nervous system in both endurance sports and coordinative movements. In addition, recent studies show the positive effects of caffeine intake on strength- endurance and maximum strength performance. Interestingly there are few, sometimes contradictory, results regarding the effects of caffeine intake in multiple repetitions maxima (hypertrophy method). However, since effective muscle hypertrophy is a desirable goal in performance and health sports, it would be interesting to assess the possible effects of caffeine supplementation on multiple repetitions maxima. Therefore, a systematic review of the topic was carried out in the following thesis. Eleven studies published between 2007 and 2018 met all the inclusion criteria and were included in this review article. A total of 158 male subjects were examined. 4.7 – 5.3mg/kg body-weight was the average caffeine dose supplemented. One study used absolute values in form of energy drinks. After extensive literature research and considering all included and excluded criteria, twelve studies were examined and compared with each other. 75.4% of all subjects examined, showed improvement in their performances, after caffeine supplementation whereas no improvement was found in the placebo group. 24.6% report a low or no performance-enhancing effect. Ten out of eleven studies used a so called “double blind crossover” design. Although a positive trend towards an increase in performance can be seen, the research question cannot be answered unambiguously at the moment. Further high-quality studies, which examine parameters such as the administered caffeine dose, the training status of the subjects, the time of ingestion, sleep, caffeine tolerance etc., seem necessary. In addition, current or future data could be summarized by using quantitative methods (e.g. meta-analysis) to obtain statistically meaningful results.

# Inhaltsverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| Kurzzusammenfassung .....                                   | I   |
| Inhaltsverzeichnis .....                                    | III |
| Vorwort .....   | IV  |
| 1 Einleitung .....  | 7   |
| 2 Methodik .....  | 12  |
| 3 Aktuelle Studienlage .....                                | 13  |
| 3.1 Koffein .....   | 20  |
| 3.2 Ermüdung .....  | 28  |
| 3.3 Messung der Ermüdung / Rate of perceived exertion ..... | 32  |
| 3.4 Repetitions in Reserve .....                            | 34  |
| 4 Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche .....    | 35  |
| 4.1 Studienübersicht .....                                  | 36  |
| 4.2 Testergebnisse .....                                    | 40  |
| 4.3 Diskussion .....  | 43  |
| 4.4 Conclusio .....   | 52  |
| 5 Literaturverzeichnis .....                                | 55  |
| 6 Abbildungsverzeichnis .....                               | 61  |
| 7 Tabellenverzeichnis .....                                 | 61  |
| 8 Abkürzungsverzeichnis .....                               | 62  |
| Erklärung .....   | 63  |

# Vorwort

Ich möchte mich an dieser Stelle bei den Menschen, welche mir die Möglichkeit gaben ein Studium zu absolvieren, bedanken. Meine Familie, bestehend aus meinem Vorbild, meiner Mutter, meinem (Stief)Vater und meinen Großeltern. Ein besonders großes Dankeschön bedarf meiner Freundin, welche mich tatkräftig unterstützte. Ein weiterer Dank geht an meine Betreuer Univ. Prof. Mag. Dr. Tschan und Mag. Dr. Pascal Bauer, welche mich über die gesamte Zeit der Erstellung dieser Arbeit unterstützten.

“Stop whining.” – Arnold Schwarzenegger

# 1 Einleitung

Entdeckt wurde Koffein zuerst als Inhaltsstoff des urtypischen Kaffees, welcher vom Vorderen Orient ausgehend erst im 15. Jahrhundert in der Geschichte vorkam. Die ersten Versuche, die Inhaltsstoffe der Kaffeebohnen zu analysieren und isolieren, unternahm der Chemiker Friedlieb Ferdinand Runge. Im Jahr 1820 gelang ihm die Isolierung des pharmakologisch wichtigsten Bestandteiles. Das Koffein, dessen Bezeichnung auf dem Gattungsnamen der Kaffeepflanze „Coffea“ zurückzuführen ist (Maier, 1981). Etwa zur selben Zeit beschäftigten sich auch andere Wissenschaftler und Pharmazeuten mit der Extrahierung und Isolierung des Koffeins aus der Kaffeebohne. Das Interesse an dieser Substanz wuchs zusehends und im Jahr 1875 konnte die chemische Strukturformel des Koffeins von Ludwig Medicus als 1,3,7- Trimethylxanthin definiert werden. 20 Jahre später bestätigten die Wissenschaftler Fischer und Ach diese Formel durch die erste Koffein-Synthese. Erst bis Mitte des 20. Jahrhunderts vervollständigten sich unsere Kenntnisse über die chemischen Verbindungen des Kaffees und seinen physiologischen Wirkungsmechanismen (Eichler, 1976). Seit Jahrzehnten wird Koffein im Sport als leistungssteigernde Substanz verwendet. Die ersten Studien über den Gebrauch dieses ergogenen Mittels wurden Anfang des 20. Jahrhunderts veröffentlicht. Zwischen 1903 und 1906 führten William Rivers und Harald Webber von der Cambridge University eine Reihe von Tests zu Koffein und dessen Auswirkung auf muskuläre Arbeit durch (Rivers & Webber, 1907). Die Forscher setzten sich teilweise selbst als Probanden ein und kamen zu dem Ergebnis, dass Koffein zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit der Muskelarbeit beiträgt. Aufgrund des Studiendesigns waren die Resultate dieser Untersuchung jedoch fraglich. Dennoch legten sie den Grundstein für die moderne Forschung in der Wirkungsweise von Koffein und Sport. In den 1940er Jahren erschienen weitere Forschungsarbeiten zum Thema Koffein und sportlicher Leistung. Haldi & Wynn (1946) beispielsweise untersuchten die Auswirkungen unterschiedlicher Substanzen, darunter auch Koffein, auf die Leistungsfähigkeit bei Schwimmern. Sie schlussfolgerten, dass Koffein keine positiven Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit im Schwimmen hat. In den späten 1970er Jahren untersuchte Dave Costill in mehreren Studien die Vorteile der Koffeinaufnahme auf die Ausdauer- und Leistungsfähigkeit im Radsport, welche unterschiedliche Ergebnisse lieferten (Burke, Desbrow, Spriet, 2013). Die kontinuierliche Erforschung über den Zusammenhang von Koffein und Bewegung in den letzten Dekaden hat sich seither in drei Hauptgebiete intensiviert: 1.) Die Erforschung der Effekte von Koffein und Bewegung auf den Metabolismus. 2.) Die Auswirkungen von Koffein auf langanhaltende Bewegung und Schlafentzug mit Relevanz für militärische Operationen.

3.) Die Wirkung von Koffein auf die sportliche Leistung (Burke et al., 2013). In der vorliegenden Masterarbeit wird vorwiegend der erste und dritte Punkt, wie von Burke et al. (2013) beschrieben, behandelt und diskutiert. Laut dem Positionspapier der International Society of Sports Nutrition zum Thema Koffein und sportlicher Leistung ist Koffein ein effektives Mittel um die Leistungsfähigkeit im Ausdauerbereich zu steigern. Im Krafttraining scheinen die Ergebnisse jedoch unklar (Goldstein et al., 2010).

#### Effekte von Koffein auf die Ausdauerleistungsfähigkeit

Die Ausdauerfähigkeit des Menschen läuft zur Gänze über die aerobe Energiebereitstellung. Unter dem Begriff „Ausdauerleistung“ versteht man eine körperliche Aktivität, welche mindestens 20 Minuten aufrechterhalten werden kann (Schmidt, Lang & Heckmann, 2010). Ein systematischer Überblicksartikel und eine Meta-Analyse aus 46 Studien von Southward, Rutherford-Markwick & Ali, (2018), kamen zu dem Ergebnis, dass Koffein ein effektives, leistungssteigerndes Mittel im Ausdauersport sein kann. Desbrow et al. (2012) veröffentlichten eine Studie bezüglich des Effekts verschiedener Koffein-Dosierungen auf die Fahrradleistung. 16 trainierte männliche Probanden wurden in einer randomisierten, doppelblinden Cross-Over Untersuchung getestet. Die Teilnehmer nahmen entweder ein Placebo, 3 oder 6mg/kg Körpergewicht Koffein 90 Minuten vor Studienbeginn. Die Trainingsleistung war bei beiden Koffeinbehandlungen im Vergleich zu Placebo signifikant höher.

#### Effekte von Koffein auf die Crossfit Performance

Die Definition von CrossFit setzt sich aus mehreren Punkten zusammen. Einerseits sind konstante Variation und funktionale Bewegungen, andererseits eine hohe Intensität ausschlaggebend für CrossFit Training (<https://www.crossfit.com/what-is-crossfit>). Aus diesen drei Säulen (Variation, funktionelle Bewegung, hohe Intensität) entstehen Workouts und Programme. Die ergogene Wirkung von Koffein hält während verschiedener Trainingsmodalitäten an, jedoch sind die Informationen, die seine Wirksamkeit bei CrossFit-Protokollen belegen, begrenzt. Eine Studie von Stein, Ramirez & Heinrich (2019), zielte darauf ab, die Auswirkungen der Koffeinsupplementierung auf die CrossFit-Leistung zu bestimmen. Dreizehn CrossFit-geübte Männer (Alter =  $28,5 \pm 6,6$  Jahre, Erfahrung =  $49,2 \pm 36,3$  Monate) wurden in einem doppelblinden Crossover-Design randomisiert. Die Teilnehmer absolvierten zwei Sitzungen, die sieben Tage voneinander getrennt stattfanden. 60 Minuten vor der Testung wurde den Testpersonen entweder 5 mg/kg Körpergewicht Koffein oder ein Placebo verabreicht. In jeder Sitzung absolvierten die Teilnehmer so viele Runden wie möglich in 20 Minuten mit 5 Pull-ups, 10 Push-ups und 15 Air Squats. Die CrossFit-Performance war die Gesamtzahl der Wiederholungen, die in 20 Minuten abgeschlossen wurden. Das



Ergebnis zeigte, dass die Gesamtwiederholungen in der Koffeingruppe höher waren, als in der Placebogruppe. Die ergogene Wirkung von Koffein ist während CrossFit Workouts vorhanden. Zukünftige Untersuchungen sollten jedoch die Wirksamkeit von Koffein bei anderen CrossFit-Protokollen und bei SportlerInnen belegen.

### Effekte von Koffein auf die Maximalkraftleistung

Unter Maximalkraft versteht man jene Kraft, die während 2-3s bei maximalem Willenseinsatz während isometrischer Muskelaktivität erzeugt werden kann (Schmidt et al., 2010). Die Maximalkraft ist sehr stark abhängig vom Querschnitt des Muskels. Je mehr motorische Einheiten rekrutiert werden können, desto höher die Maximalkraft. Die Energiebereitstellung während eines Maximalkraftversuchs erfolgt hauptsächlich anaerob alaktazid (Schmidt et al., 2010). Studien im Bereich der Maximalkraftleistung bestätigen teilweise die ergogene Wirkung von Koffein in diesem Sektor (Astorino et al., 2007; Grgic & Mikulic, 2017). Exakte Richtlinien, zu welcher Zeit, in welcher Menge Koffein zugeführt werden soll, bleibt unklar. Ob sich die unterschiedlichen Wirkungen in den Kraftsport-Studien aufgrund des Studiendesigns, des Fitness-/Leistungsniveau der ProbandInnen oder andere veränderbare Parameter (z.B. Placeboeffekt, Schlafdefizit, Koffeinresistenz, ... etc.) beziehen, scheint ebenfalls zum überwiegenden Teil ungeklärt zu sein.

Die Nutzung im sportlichen Sektor und der Gebrauch als Genussmittel im Alltag macht Koffein zur am häufigsten konsumierten bioaktiven Substanz der Welt (<http://www.kaffee-wirkungen.de/wirkungen/inhaltsstoffe/koffein/>). Bis zum Jahr 2004 stand Koffein auf der Liste der verbotenen leistungssteigernden Substanzen der WADA. Heute gibt es keinerlei Einschränkungen mehr wieviel Koffein in einer Sportart zur Leistungssteigerung eingesetzt werden darf. Allerdings steht Koffein auch im Jahr 2019, wie in den letzten Jahren, auf der Monitoring Liste der WADA und dessen Gebrauch wird routinemäßig überprüft. Zusätzlich gibt es internationale Bestrebungen es wieder auf die Liste zu setzen, sollte sich ein übermäßiger Missbrauch zeigen ([https://www.wada-ama.org/sites/default/files/wada\\_2019\\_english\\_monitoring\\_program.pdf](https://www.wada-ama.org/sites/default/files/wada_2019_english_monitoring_program.pdf)).

Koffein hat seine Popularität zusätzlich durch einen weiteren Effekt erlangt. Diese Auswirkung beschreibt, dass nach der Einnahme das Wachheitsgefühl stärker in den Vordergrund rückt. Wo Wachheit vorherrscht, wird im Gegenzug die Ermüdung gehemmt. Ein weiterer Punkt im Zusammenhang mit Koffein, welches ein hohes Maß an Komplexität vorlegt, ist die physiologische Ermüdung. Das Thema Ermüdung ist seit langem ein großer Bestandteil der Forschung. So hat es schon 1981 ein Symposium in London gegeben, welches sich umfassend mit den physiologischen Mechanismen der Ermüdung auseinandergesetzt hat. Von der Ursache der Abnahme an muskulären Kontraktionsmechanismen bis hin zur Frage,

ob Ermüdung eine biochemische oder neuronale Ursache hat, werden viele Thematiken von bekannten Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen (z.B.: Bigland-Ritchie, Edwards, Saltin) diskutiert (Pitman Medical, 1981). Die Ermüdung wurde nach langer Forschung in eine zentrale und periphere Ermüdung unterteilt. Zusätzlich musste eine Operationalisierung der Ermüdung möglich gemacht werden. Aktuelle Studien, welche ein Vorher-Nachher-Design festlegen, verfolgen das grundsätzliche Ziel, Leistung (Kraft, Schnelligkeit, Koordination) aufgrund von Ermüdungserscheinungen darzustellen. Konkret zeigt eine Studie, wie sich Maximalkraftwerte vor und nach der Koffeineinnahme ändern und ob diese Veränderungen muskulärer oder neuronaler Natur sind (Beck et al., 2006; Grgic & Mikulic, 2017). Im Ausdauerbereich, genauer gesagt bei Langzeitausdauerleistungen, scheint Koffein die Ermüdungswiderstandsfähigkeit zu erhöhen (Pasma, van Baak, Jeukendrup, de Haan, 1995). Da die Ermüdung im Sport einen so relevanten Aspekt darstellt, wird in dieser Masterarbeit versucht herauszufinden, ob es möglich ist, die Ermüdung bei Mehrfachwiederholungsmaxima im Krafttraining (im Bereich der Muskelquerschnittsvergrößerung) durch Koffein hinauszuzögern beziehungsweise zu reduzieren. Sollte sich eine generelle Formel zur Leistungssteigerung durch Koffeinsupplementation herauskristallisieren, könnten einige Sportarten härter und effizienter trainieren. Mehrfachwiederholungen werden in Sportarten verwendet, wo der Muskelquerschnitt, also die Kraft, eine entscheidende Rolle einnehmen kann (z.B.: Eishockey, Crossfit, etc.). In einem Intensitätsbereich zwischen 60-80% ihres Einwiederholungsmaximums findet eine Muskelquerschnittsvergrößerung statt (Schoenfeld, 2010). Auch bei Kraftausdauermethoden oder Schnellkrafttrainingsmethoden könnte Koffein eine entscheidende Rolle in der Supplementierung einnehmen. Der Intensitätsbereich des sogenannten Kraftausdauertrainings liegt bei circa 50-65% des 1RM (Hottenrott & Neumann, 2010). Das Training der Schnellkraft findet im Bereich von 30-60% des 1RM statt und gehört zu den Methoden der explosiven, nicht maximalen Kräfteinsätze (Hottenrott & Neumann, 2010). Die Intensitätsbereiche stehen in einem direkten Zusammenhang zur Maximalkraft. Eine koffein-bedingte Leistungssteigerung in einem bestimmten Bereich (30-80% des 1RM) könnte sich auch positiv auf die Maximalkraftleistung auswirken. Neben den positiven Veränderungen des Metabolismus bringt Krafttraining weitere Modifikationen mit sich. Die gesundheitlichen Vorteile eines trainierten Menschen gehen über das alleinige Muskelwachstum hinaus. Westcott (2012) schreibt, dass erwachsene Menschen, ab dem 30. Lebensjahr, pro Dekade 3-8% an Muskelmasse abbauen. Die Auswirkungen der fehlenden Muskulatur werden erst im hohen Alter sichtbar und zeigen sich meist durch Krankheit bzw. Gebrechen. Allerdings weist Westcott (2012) darauf hin, dass die körperliche Leistungsfähigkeit, Bewegungskontrolle, Gehgeschwindigkeit, funktionelle Unabhängigkeit, kognitive Fähigkeiten und das Selbstwertgefühl durch regelmäßiges Krafttraining

positiv beeinflusst werden. Die Forschungsfrage, ob eine Koffeineinnahme vor dem Training zur Steigerung der körperlichen Leistungsfähigkeit im Bereich der Mehrfachwiederholungen von Nutzen ist, gilt es in den nachfolgenden Kapiteln genauer zu betrachten und zu diskutieren.

## 2 Methodik

Um die vorher genannte Forschungsfrage zu beantworten, wird eine systematische Literaturrecherche in folgenden Datenbanken durchgeführt: PubMed, Google Scholar, und SPO-LIT. ResearchGate wurde als zusätzliche Informationsquelle verwendet. Jene Suchbegriffskombinationen wurden dafür verwendet: „Caffeine repetitions to failure, caffeine repetitions to fatigue, caffeine strength performance, caffeine strength training, caffeine supplementation strength sport, energy drink repetitions to failure, energy drink repetitions to fatigue, koffein mehrfach wiederholungen, koffein krafttraining hypertrophie. Die verwendeten Suchbegriffe werden über sogenannte boolesche Operatoren in den Datenbanken miteinander verknüpft. Somit konnte die Suche nach Studien spezifischer und themenbezogener ausgeführt werden. Die Literaturrecherche fand über einen Zeitraum von circa 9 Monaten statt (November 2018 – Juli 2019). Existierende und inhaltlich passende Überblicksartikel werden ausschließlich als zusätzliche Quelle für Referenzen verwendet. Die dort aufgeführten Literaturverzeichnisse dienen als Hilfsquelle für etwaige wichtige Originalstudien. Studien, welche Maximalkraftleistungen (Einwiederholungsmaxima, englisch one-repetition maximum [1RM] ) oder Ausdauerleistungen (Radfahren, Laufen, etc.) untersuchen, werden nicht in diese Übersichtsarbeit aufgenommen und daher ausgeschlossen. Wissenschaftliche Arbeiten, welche weibliche Probandinnen untersuchen, werden aufgrund (1) der Studie von Temple & Ziegler (2011), welcher erfolgreich die unterschiedliche physiologische Wirkungsweise von Koffein zwischen den Geschlechtern feststellte und (2) der Verfügbarkeit und Häufigkeit männlicher Studienteilnehmer, in diesem Überblicksartikel nicht respektiert. Wichtigstes Einschlusskriterium ist, dass sich das Protokoll der untersuchten Studie mit Mehrfachwiederholungsmaxima und „Wiederholungen bis zum Muskelversagen“ (repetitions to failure) im Kraftsport auseinandersetzen. Ein Muskelversagen ist dann erzielt, wenn keine weitere Wiederholung über das gesamte Bewegungsausmaß mehr möglich ist. Eine fortgeschrittene Trainingserfahrung, wie sie in allen Studien beschrieben wurde, stellt ein notwendiges Einschlusskriterium dar. Darüber hinaus muss ein Protokoll der Koffeinnahme vorhanden und nachvollziehbar sein. Die Art, in welcher Form Koffein konsumiert wird, spielt eine sekundäre Rolle. Wichtig war nur, dass das verabreichte Koffein mengentechnisch notiert wurde. Es wurden sowohl Studien, welche flüssigen Kaffee, Koffeintabletten und Energy Drinks supplementierten, in den Übersichtsartikel aufgenommen. Koffeintabletten wurden aufgrund der erleichterten Mengenbestimmung, von den meisten Autoren bevorzugt. Die Einnahme der Koffeindosis erfolgte zwischen 45 und 60 Minuten vor den Testungen.

### 3 Aktuelle Studienlage

Heutzutage beschäftigen sich zahlreiche Studien und wissenschaftliche Arbeiten mit der Wirksamkeit von Koffein auf den menschlichen Körper. Eine Tabelle, welche aktuelle Studienergebnisse gegenüberstellt, wird im nachfolgenden Teil (4.1) präsentiert. Anhand der Anzahl an verfügbaren Studien zum Thema Koffein, im Zusammenhang mit Sport, erkennt man deutlich die Wichtigkeit dieser leistungssteigernden Substanz. Unterschiedliche Parameter erlauben es, Koffein mit diversen trainingswissenschaftlichen Methoden in Verbindung zu bringen. Zahlreiche Studien wurden bereits in Bezug auf länger andauernde Belastungen unter Koffeineinfluss durchgeführt.

#### Koffeinsupplementierung bei aerober Belastung / Ausdauersportarten

Im Jahr 1992 wurden erfahrene LaufsportlerInnen nach einer Koffeinnahme oder unter Verwendung eines Placebos auf einem Laufband getestet. 1500m sollten nach der Zufuhr von 3g Koffein oder entkoffeiniertem Kaffee gelaufen werden. Das Resultat zeigte signifikante Ergebnisse in Form einer verkürzten Laufzeit für 1500m (Wiles, Bird, Hopkins, Riley, 1992). Schon damals konnten also deutliche Erfolge mit einer geringen Dosis an Koffein festgestellt werden. Graham, Hibbert & Sathasivam (1998), testeten drei verschiedene Koffein-Protokolle und deren Auswirkungen auf die Ausdauerleistung. Die Koffein- und Placebo-Dosis lag bei 4,45mg/kg Körpergewicht. Unter den drei Protokollen konnte nur eines die Ausdauerperformance steigern. Koffein-Kapseln schienen im Vergleich zu regulärem Kaffee und Placebos größere Auswirkungen auf das Ausdauerprotokoll zu haben (Graham et al., 1998). Im Jahr 2000 wurde in Australien eine Studie durchgeführt, welche den Effekt von Koffein auf die Ruderleistung analysierte (Bruce et al., 2000). Nach einer 6-9mg/kg Körpergewicht Koffein Einnahme ruderten die Probanden eine vorgegebene Strecke. Im Mittelpunkt stand die Kurzzeitdauerleistung am Ruderergometer. Die Ergebnisse deckten auf, dass ein 6 oder 9mg/kg Körpergewicht Koffein-Verzehr eine wertvolle Leistungsverbesserung der Kurzzeitdauerleistung gewährleistete (Bruce et al., 2000). Eine weitere Untersuchung, dessen Zweck es war, die Wirkung der Koffeinsupplementierung auf physiologische Leistungsparameter während eines 4-stündigen Steady-State-Radfahren zu untersuchen, gefolgt von einem Zeitversuch mit maximaler Leistung. Unter Verwendung eines randomisierten, doppelblinden Crossover-Designs radelten 11 trainierte Ausdauersportler 4 Stunden bei ~ 55% des maximalen individuellen Sauerstoffverbrauchs. Dies ist die erste Studie, die ein Schema mit mehreren Dosen Koffein in Kombination mit der Kohlenhydrataufnahme während eines langen Trainings untersucht. Neben 6mg/kg Körpergewicht Koffein, 3 Stunden vor der Fahrt oder Placebo wurde den Probanden 2 Stunden vor

der 4-stündigen Fahrt, eine kleine kohlehydrathaltige Mahlzeit verabreicht. Die Testergebnisse zeigten, dass Koffein in Zusammenhang mit Kohlehydraten keine Leistungsverbesserung im Radfahren bei trainierten Athleten nachweisen konnte. Die Studien, welche sich mit Koffein in Ausdauersportarten beschäftigten, zeigten unterschiedlichste Ergebnisse auf. Die verschiedenen Autoren begannen kreativere Studiendesigns zu entwerfen und in vielen Untersuchungen auch Kohlehydrate vor und während der Testungen zu supplementieren. Zwei Studien, mit unterschiedlicher Koffein-, Kohlehydrat-, Coca Cola- und Placebo-Dosis, wurden mit Leistungssportler in einer 2-stündigen Steady-State (SS) Fahrrad Testung, bei rund 70% maximaler Sauerstoffaufnahme und anschließender „Time-Trial Testung“ (TT) durchgeführt (Cox et al., 2002). In Studie A erhielten 12 Probanden entweder 6mg/kg Koffein 1 Stunde vor dem Training, 6 x 1mg/kg Körpergewicht Koffein alle 20 Minuten während der gesamten Steady-State Testung und zusätzliche 2 x 5ml/kg Coca-Cola oder Placebo zwischen 100 und 120 Minuten in der Steady-State und während des Time Trials. In Studie B erhielten acht Probanden 3 x 5ml/kg Körpergewicht verschiedene Cola-Getränke während der letzten 40 Minuten von SS und TT. Insgesamt steigerte 6mg/kg Körpergewicht Koffein die Time Trial-Leistung unabhängig vom Zeitpunkt der Einnahme. In der zweiten Studie wirkten Coca-Cola, im Vergleich zu Sportgetränken, in den letzten Phasen des Trainings die Ausdauerleistung in gleicher Weise wie Koffein. Zusammenfassend zeigten die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen, dass die Einnahme von moderaten Dosen Koffein (6mg/kg) die Leistung trainierter Athleten förderte (Cox et al., 2002). Die Lage von Koffein in der Wissenschaft wurde laufend ergänzt, so wurden auch unterschiedliche Protokolle und Kombinationen mit anderen Substanzen, neben Kohlehydraten, durchgeführt. Bell, Mclellan & Sabiston (2002) recherchierten die Effekte einer Einnahme aus einer Kombination von Koffein und Ephedrin auf die 10-km-Laufperformance. Die Untersuchung betrachtete die Effekte von Koffein, unabhängig von Ephedrin und umgekehrt, die Kombination aus beiden Substanzen und einem Placebo. Probanden liefen bei konstanter Temperatur auf einem Laufband. Die Laufzeiten für die Ephedrin-Versuche (inklusive der Kombinationsversuche) waren im Vergleich zu den Nicht-Ephedrin-Versuchen stark verkürzt. Koffein erhöhte die Adrenalin- und Noradrenalinreaktion, die mit dem Lauf einherging und erhöhte sowohl die Blutlaktat-, als auch Glukose- und Glycerinspiegel. Schlussfolgernd wurde erwähnt, dass in dieser Studie die ergogene Wirkung jedoch hauptsächlich auf das Ephedrin zurückzuführen ist (Bell et al., 2002). Eine weitere Studie, welche eine 8-km Laufleistung nach einer Koffeineinnahme untersuchte, konnte eine sehr positive Wirksamkeit auf die Bewegungsdauer erzielen. Die Teilnehmer absolvierten 1 Stunde nach Einnahme einer Placebo-Kapsel, einer Koffein-Kapsel (3mg/kg Körpergewicht) oder ohne Nahrungsergänzung ein 8 km-Rennen. Eine Varianzanalyse mit wiederholten Messungen identifizierte einen signifikanten Behandlungseffekt für eine Leistungszeit von 8 km ( $P < 0,05$ ). Koffein

fürte zu einer mittleren Verbesserung von 23,8 Sekunden (Minimum 13,1s; Maximum 34,5s). Daraus kann geschlossen werden, dass die Einnahme von 3mg/kg Körpergewicht die absolute Laufleistung über 8 km verbessern kann (Bridge & Jones, 2006). Neben verschiedenen Ausdauerprotokollen, Substanzen und deren Kombinationen, beschäftigen sich einige Studien auch speziell mit den Dosierungen von Koffein und versuchen Richtlinien, für die zu verabreichende Menge, um eine Leistungssteigerung hervorzurufen, aufzustellen. Jenkins, Trilk, Singhal, O'Connor & Cureton (2008), versuchten herauszufinden, ob niedrige Dosen von Koffein während des Fahrradfahrens ergogene, wahrnehmbare und metabolische Wirkungen auf die Leistung haben. 13 Radfahrer verbrachten 15 Minuten auf einem stationären Ergometer bei rund 80% der maximalen Sauerstoffaufnahme. Nach 4-minütiger Pause wurden die 15 Minuten wiederholt. 60 Minuten vor den zweiten 15 Minuten wurden entweder 1,2 oder 3mg/kg Körpergewicht Koffein oder ein Placebo verabreicht. Im Vergleich zum Placebo erhöhten 2 und 3 mg/kg Körpergewicht die Leistung um 4 und 3%. Diese Effekte waren im Durchschnitt ergogen, unterschieden sich jedoch erheblich in der Größenordnung der einzelnen Radfahrer (Jenkins et al., 2008). Nachfolgend ist es auch sinnvoll, einen systematischen Überblicksartikel von Ganio, Klau, Casa, Armstrong, Maresh (2009), zu erwähnen, da dieser alle oben genannten und vorgestellten Studien vereint. Verschiedene Ausdauersportarten, Koffein Dosierungen und Intensitätsbereiche bieten einen Überblick, wie Koffein im Ausdauersport am besten eingesetzt werden kann. Ganio et al. (2009), untersuchten 21 Studien, welche insgesamt 33 Protokolle zur Verabreichung von Koffein enthielten und in welchen eine Ausdauerleistung >5min erfolgte. Das Gesamtergebnis war eine durchschnittliche Leistungsverbesserung zwischen  $3,2 \pm 4,3\%$  bei Aufnahme von Koffein im Vergleich zum Placebo. Diese Verbesserung war jedoch zwischen den Studien sehr unterschiedlich. Minimal wurde eine Verschlechterung von -0,3% errechnet. Die maximale Leistungssteigerung betrug allerdings +17,3%. Das relative Mittel konnte somit einfach errechnet werden. Das hohe Maß an Variabilität kann von zahlreichen Faktoren abhängen, einschließlich des Einnahmezeitpunkts, des Einnahmemodus (flüssig oder Kapselform) und der Koffeinresistenz des Subjekts. Ganio et al. (2009) schlussfolgerten, dass die Aufnahme von Koffein ein wirksames leistungsförderndes Mittel für Ausdauersportler sei, wenn die Substanz vor und / oder während des Trainings in mäßigen Mengen eingenommen wird. Die empfohlene Menge befindet sich laut Übersichtsartikel zwischen 3-6mg/kg Körpergewicht.

## Koffeinsupplementierung bei anaerober Belastung / Maximalkraftsportarten

Neben den unzähligen Experimenten mit Koffein in Ausdauersportarten beziehungsweise während Ausdauerbelastungen, welche größtenteils im aeroben Energiestoffwechsel stattfanden, wurden auch Studien und Tests im anaeroben Sektor durchgeführt. Dies sind sehr kurzzeitige / (sub)maximale Belastungsintervalle, welche 30 Sekunden nicht überschreiten. Schon 1991 führte Collomp et al. (1991) eine Studie durch, welche die Auswirkungen der Aufnahme von Koffein auf die Leistung und die Stoffwechselreaktionen während eines supramaximalen Trainings bestimmen soll, führten sechs gesunde Probanden den Wingate Anaerobic Test zweimal durch. Sechzig Minuten vor jedem Versuch nahmen sie im nüchternen Zustand 5mg/kg Körpergewicht Koffeinkapseln oder ein Placebo. Das Resümee der Untersuchung deckte allerdings auf, dass Koffein keinen Einfluss auf die anaerobe Leistungsfähigkeit im Wingate Anaerobic Test hat. Anaerobe Kapazitäten wurden optimalerweise mithilfe des Wingate Tests durchgeführt. Anselme et al. (1992), testete ihre ProbandInnen mithilfe eines speziellen Ergometers. Die Idee hinter der Praxis war es herauszufinden inwiefern sich die Auswirkungen von Koffein auf die maximale anaerobe Kraft widerspiegeln. Eine automatische Vorrichtung wurde verwendet um die maximale Trittfrequenz für jede Last zu bestimmen. Die anaerobe Kraft wurde dann über das Produkt aus Kraft (F) und Geschwindigkeit (v) errechnet. Der Test bestand aus sich wiederholenden, maximalen Sprints, gegen eine zunehmende Belastung mit 5-minütigen Erholungsphasen nach jedem Sprint. Sie schlussfolgerten, dass Koffein sowohl die maximale Kraft, als auch die Blutlaktatkonzentration erhöhte. Nicht nur auf Ergometern, auch im Wasser wurde Koffein eingesetzt um die Performance zu verbessern. Eine dazugehörige Studie veröffentlichte Colomp et al. (1992), als sie trainierte und untrainierte Schwimmer unter Koffeinfluss gegeneinander antreten ließen. Allen Testpersonen wurden entweder 250mg Koffein oder ein Placebo verabreicht. Sieben trainierte Schwimmer und sieben untrainierte Schwimmer schwammen im Freistil zwei zufällig zugewiesene 2 × 100m Entfernungen mit maximaler Geschwindigkeit und 20 Minuten passiver Erholung zwischen den Tests. Das Ergebnis ist in dieser Studie besonders spannend, da nur trainierte Schwimmer ihre Schwimmgeschwindigkeit nach einer Koffein Supplementation erhöhen konnten. Anbetracht dieser Ergebnisse scheint es notwendig zu sein, gezielt zu trainieren, um von den durch Koffein während eines supramaximalen Trainings verursachten Stoffwechselanpassungen zu profitieren (Colomp et al., 1992). Interessante Ansätze zu weiteren Untersuchungen bezüglich Koffein gab es allerdings auch auf kraftbasierten Geräten. An 20 männlichen Elite-Athleten (American Football) wurden computergestützte Tests durchgeführt. Die Wirkung von 7mg/kg Körpergewicht Koffein sollte die maximale aufbringbare Muskelkraft des Kniestreckers und Kniebeugers überprüfen. Das maximale Drehmoment wurde bei Winkelgeschwindigkeiten von



30, 150 und 300 Grad gemessen. Die Auswertung ergab folgende Ergebnisse: Höhere Anstiege unter Koffeineinfluss im Vergleich zum Placebo. Es wurde der Schluss gezogen, dass Koffein einige Kraftparameter bei Männern mit hohem Widerstandstraining positiv beeinflussen kann. Unterschiede in Bezug auf Fasertypzusammensetzung, Motivation und Koffeinsensitivität müssten jedoch geklärt werden (Jacobson, Weber, Claypool & Hunt, 1992). Die Bandbreite der Studienlage bezüglich Koffein scheint grenzenlos zu sein. Neben unzähligen Studien, welche erfolgreiche Effekte dieser Substanz unter verschiedensten Parametern nachweisen konnten, gibt es auch Arbeiten, welche das Gegenteil behaupten. Crowe, Leicht & Spinks (2006) untersuchten physiologische und kognitive Reaktionen auf Koffein während intensiver, wiederholter körperlicher Belastung. Siebzehn ProbandInnen (w=5) wurden vor und nach dem Konsum von Koffein (6mg/kg KG), Placebo oder Nichts (Kontrolle) kognitiv (Reaktionszeit) und bluttechnisch (Glukose, Kalium, Katecholamine, Laktat) getestet. 90 Minuten nach dem Konsum von Koffein / Placebo wurde ein Belastungstest in Form von zwei Runden zu je 60s maximaler Anstrengung durchgeführt. Das Resultat war ernüchternd: Koffein hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Spitzenleistung, die Arbeitsleistung, die RPE oder die maximale Herzfrequenz. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Koffein keine ergogene Wirkung auf wiederholte, maximale Zyklen hat und die anaerobe Leistung beeinträchtigen kann. Diese Beeinträchtigung wurde wegen des zu schnellen Anstiegs des Blutlaktatspiegels durch Koffein argumentiert. Carr et al. (2008) widerspricht der oben offengelegten Studie wieder und schreibt, dass Koffein sehr wohl vor wiederholten Sprints die anaerobe Laufleistung erhöhte. Allerdings wurden in dieser Abhandlung 6mg/kg Körpergewicht Koffein 60 Minuten vor Belastungsbeginn zugeführt. Carr et al. (2008) berichtet auch von einem höheren Blutlaktatspiegel nach der Koffeinnahme was allerdings nicht leistungsmindernd erschien. Aus diesem direkten Vergleich kann angenommen werden, dass der Zeitpunkt der Koffeinnahme einen ausschlaggebenden Parameter darstellt. Eine weitere Untersuchung testete die Wirkung von Koffein auf mehrfach wiederholte Sprints. 21 Männer nahmen entweder 5mg/kg KG Koffein oder ein Placebo zu sich und erhielten die Anweisung, alle 35 Sekunden einen 30 Meter Sprint zu absolvieren. Die Substanz wurde eine Stunde vor Testbeginn konsumiert. Die Resultate der Abhandlung zeigte, dass Koffein ergogene Eigenschaften aufwies, die die Leistung sowohl bei Einzel-, als auch bei Mehrfachsprintsportarten verbessern könnte (Glaister et al., 2008). Woolf, Bidwell & Carlson (2008) hingegen waren der Meinung, dass eine Kombination aus klassischen Krafttrainingsübungen und einem Wingate Anaerobic Test helfen könnte die Wirkung von Koffein besser zu verstehen. Sie untersuchten 18 männliche Probanden unter 5mg/kg Körpergewicht Koffein im Vergleich zu einem Placebo. Während des Koffeinversuchs wurde mit der Brustpresse mehr Gesamtgewicht angehoben und während des Wingate Anaerobic Tests wurde eine größere Spitzenleistung erhalten.

Eine Arbeit von Astorino, Rohmann & Firth (2007), welche sich allerdings ausschließlich mit Maximalkraftversuchen auseinandersetzt, kommt hingegen zu folgendem Ergebnis: Das Einwiederholungsmaximum im Bankdrücken unter Koffeineinfluss unterscheidet sich nicht zur Placebo Gruppe. Astorino et al. (2007) konnten keine signifikanten Verbesserungen unter Koffeineinfluss feststellen. Ein Review Artikel von Astorino & Roberson (2010) untersuchte insgesamt 29 Studien, welche Kurzzeitbelastungen unter Koffeineinfluss testeten. 11 von 29 Studien beschäftigten sich mit Krafttraining, 6 von 11 Studien konnten eine signifikante Leistungsverbesserung durch Koffein im Vergleich zum Placebo feststellen. Sie schlussfolgerten, dass einige Studien eine verminderte Leistung bei Aufnahme von Koffein zeigen, jedoch der genaue Mechanismus, welcher die ergogene Wirkung von Koffein bei Kurzzeittraining erklärt nicht bekannt ist (Astorino & Roberson, 2010). Ein Übersichtsartikel von Glaister & Gissane (2018) untersuchte die physiologischen Auswirkungen von Koffein auf submaximale sportliche Leistungen zwischen 5 und 30 Minuten. Studien, welche die Einschlusskriterien erfüllten, verabreichten zwischen 3-6mg/kg Koffein oder ein Placebo. Die positiven Auswirkungen einer Koffeinsupplementierung auf die anhaltende Leistungsfähigkeit bei intensiven körperlichen Aktivitäten wurden in diesem Review weitgehend akzeptiert obwohl die Mechanismen zur Erklärung dieser Reaktion zurzeit nicht lösbar scheinen. Diese Metaanalyse hat eindeutige Auswirkungen von Koffein auf verschiedene physiologische Reaktionen während submaximaler Belastung gezeigt, was zur Erklärung der ergogenen Wirkung beitragen konnte.

Wie zu erkennen ist, gibt es im wissenschaftlichen Rahmen des Koffeins eine eindeutig positive Tendenz für das Koffein. Zahlreiche Studien und Publikationen wurden bereits durchgeführt. Koffein wird sowohl im Ausdauerbereich bei Bewegungsabläufen mit aeroben Stoffwechselforgängen weitgehend akzeptiert. In Sportarten, in welchen anaerobe Stoffwechselforgänge ablaufen, gehen die Meinungen etwas weiter auseinander. Sei es nun eine maximale kardiovaskuläre Belastung oder ein Maximalkraftversuch im Bankdrücken.

Ein aktueller Überblicksartikel von Goldstein et al. (2010) erklärt, dass allgemeine Ergebnisse und Aussagen bezüglich der Koffeinsupplementierung in den Bereichen Kraft, Ausdauer und Teamsport widersprüchlich sein können. In Studien, welche ihren Schwerpunkt auf Ausdauersportarten legen, scheint Koffein als Substitution weitgehend bestätigt zu sein. Koffein im Zusammenhang mit Krafttrainings-Studiendesigns weisen differenzierte Ergebnisse auf. Aufgrund der Design-Vielfalt verwenden die Autoren unterschiedliche Protokolle. Ob sich diese unterschiedlichen Ergebnisse aufgrund des Studiendesigns, des Fitness-/Leistungsniveau der ProbandInnen oder sonstige veränderbare Parameter beziehen, scheint unklar zu sein. „It is evident that caffeine is indeed ergogenic to sport performance“ heißt es in der Conclusio von Goldstein et al. (2010). Es sind mehr Studien notwendig, um

die Auswirkungen von Koffein in Kraftsportarten nachweisen zu können. In den verschiedenen wissenschaftlichen Datenbanken (Google Scholar, PubMed, SciNet) liegen eine hohe Anzahl an Studien bereit, welche versuchen, den Zusammenhang der Koffeinnahme und Leistungssteigerung im Bereich der Mehrfachwiederholungsmaxima eine Formel zu verleihen. Silva et al. (2015) beispielsweise untersucht 14 trainierte Athleten mit und ohne Koffeinnahme im Bankdrücken und verzeichnet signifikant positive Erfolge nach einer Koffeinnahme. Eine andere Studie von Eckerson et al. (2013) hingegen, welcher 17 trainierte Athleten unter den annähernd identen Parametern testete, konnte keine Leistungssteigerung durch Koffein feststellen. In dieser Arbeit wird das Hauptaugenmerk auf die Zusammenfassung gesammelter Studien, welche Mehrfachwiederholungen (Wiederholungen bis zum Muskelversagen) austesten, gelegt. Die Wichtigkeit der Mehrfachwiederholung sollte nicht unterschätzt werden, da die Muskelquerschnittsvergrößerung (sog.: Hypertrophieeffekt), welcher sowohl für leistungssportspezifische (Schoenfeld, 2010), als auch rehabilitative (Wonisch et al., 2012) Zwecke einen wichtigen Parameter darstellt. Schoenfeld (2010) setzt den Wiederholungsbereich, in dem eine Muskelquerschnittsvergrößerung stattfindet auf 6 – 12 Wiederholungen. Wonisch et al. (2012) gibt den Trainingsbereich im rehabilitativen Kontext zwischen 8 und 15 Wiederholungen an. Würde Koffein den gewünschten Effekt erfüllen, so könnten folgende trainingspezifische Parameter davon profitieren: die Anzahl der maximalen ausführbaren Wiederholungen und die neuronale „Wachheit“ des Sportlers (Ermüdungswiderstandsfähigkeit). Mehr ausgeführte Wiederholungen im Bereich der Hypertrophie resultiert in einer höheren mechanischen Belastung der Skelettmuskulatur. Laut Schoenfeld (2010) ist dieser mechanische Reiz, neben zwei weiteren Parametern (Muskelschaden, metabolischer Stress), der Wichtigste für eine Muskelquerschnittsvergrößerung. Eine Supplementierung wäre somit für all jene Sportler sinnvoll, welche auf maximalen Muskelquerschnitt aus sind. In der rehabilitativen Branche wäre es denkbar, das Training mit Koffein zu ergänzen, jedoch ist hier primär eine Verbesserung der Körperkomposition im Vordergrund. Das rehabilitative Krafttraining zielt darauf ab, den gesamten Körper durch wenig Gewicht und vielen Wiederholungen zu stärken und an eine höhere Stufe der Belastbarkeit heranzuführen (Wonisch et al., 2012).

## 3.1 Koffein

### Physiologische Wirkung von Koffein

1, 3, 7 – Trimethylxanthin, oder kurz, Koffein, kommt als natürliche chemische Substanz in manchen Pflanzen vor und kann künstlich im Labor hergestellt werden. Reines Koffein ist ein weißes, geruchsloses, kristallines Pulver mit bitterem Geschmack. Neben dem natürlichen Vorkommen wird Koffein heutzutage in einem großen Rahmen in Lebensmitteln verarbeitet. Koffein selbst besitzt keinerlei Nährwerte und wird vom Menschen seit Jahrhunderten als psychoaktivierende Stimulanz und Schmerzmittel verwendet. Die umfassende Wirkung von Koffein auf den menschlichen Organismus wurde zudem klinisch nachgewiesen. Um die genaue Wirkungsweise von Koffein verstehen zu können, erfordert es einige Einblicke in die Chemie und in die Physiologie des Menschen.

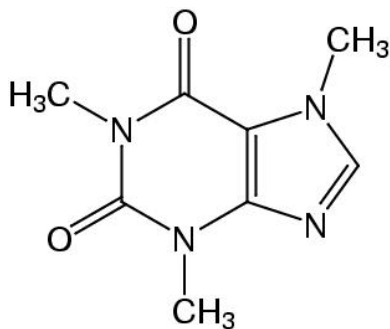


Abbildung. 1: Chemische Summenformel von Koffein

Die chemische Summenformel von Koffein lautet  $C_8H_{10}N_4O_2$ , was den Bestandteilen von 8 Kohlenstoff-, 10 Wasserstoff-, 4 Stickstoff- und 2 Sauerstoffatomen gleicht. Wie also kommt Koffein zu seinem chemischen Namen 1, 3, 7,-Trimethylxanthin? Koffein gehört zu der Gruppe der Purine. Purine sind Moleküle, welche sich dadurch auszeichnen, dass sie nur aus Wasser und Stickstoff bestehen. Sie können vom Menschen selbst synthetisiert werden. Ein Beispiel für ein Purin ist der Baustein Adenin, welcher essentiell für den Bau der Nukleinsäure ist. Purine bestehen aus zwei Ringen, die in reiner Form in der Natur nicht vorkommen. Beim Purinalkaloid Xanthin kommen dann zu diesen beiden Ringen 2 Sauerstoffatome dazu. Ein Alkaloid ist, vereinfacht gesagt, ein aus einer Pflanze isolierter Stoff. Xanthin ist ein natürliches Produkt des Nukleotidstoffwechsels wenn Purine abgebaut werden. Das Xanthin wird nach der chemischen Ableitung (nach Hydroxylierung) zum Koffein. Beim Koffein ist an der ersten, dritten und siebenten Position eine sogenannte Methylgruppe. Das sind Gruppen von 1 Kohlenstoff- und 3 Wasserstoffatomen: Fertig ist das 1,3,7-Trimethylxanthin, oder kurz: Koffein (Beiglböck, 2016). Warum ist es wichtig, diesen Hintergrund der genauen Formulierung der chemischen Summenformel zu erwähnen?

Grund dafür ist, dass Purine nicht nur Grundbestandteile von Adenin und Guanin sind, sondern wegen der großen Ähnlichkeit zwischen Koffein zum körpereigenen leistungsbestimmenden Adenosin. Adenin und Guanin sind mit Thymin und Cytosin die vier Grundbausteine der menschlichen DNS. Die DNS ist jene Molekülkette, welche unsere genetische Identität bestimmt. Adenosin hingegen regelt den körpereigenen Energiestoffwechsel. Adenosin entsteht, wenn ATP durch Hydrolyse (durch Hinzugabe von Wasser) in ADP und einem Phosphatrest (P) aufgespalten wird (Abb. 2). Diese Aufspaltung gibt Energie ab. Eine normal arbeitende Muskelzelle setzt ihren gesamten ATP-Vorrat etwa einmal pro Minute um. Das bedeutet, dass pro Sekunde und Zelle zehn Millionen ATP-Moleküle verbraucht werden. Bei maximaler Arbeit verbraucht die Muskelzelle ihren ATP-Vorrat in wenigen Sekunden. Die im menschlichen Körper täglich verbrauchte ATP-Menge entspricht etwa dem eigenen Körpergewicht. Die Regeneration von ATP erfolgt aus ADP und Phosphat. Der Vorgang verläuft endergonisch und wird unter anderem als Phosphorylierung bezeichnet (<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/biologie-abitur/artikel/atp-energieuebertraeger-zellen-oder-lebewesen/>).

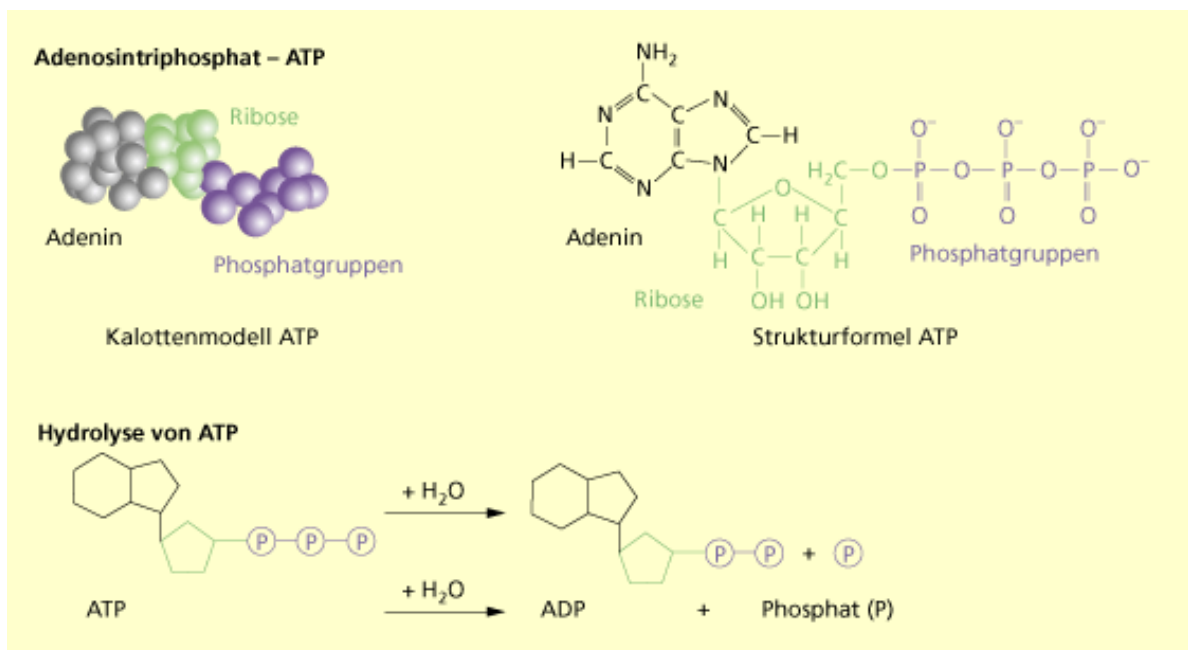


Abbildung 2: Kalottenmodell von ATP

ATP ist nicht nur ein universeller Energieträger, sondern reguliert mit der Energiebereitstellung zusammenhängende Prozesse (Beiglböck, 2016). Werden Zellen über einen längeren Zeitraum beansprucht, erhöht sich die Adenosinkonzentration. Dasselbe gilt bei kurzen intensiven Belastungen. Eine Art „negative Rückkopplung“ ist das Resultat einer hohen Adenosinkonzentration nach körperlicher Betätigung. Die Nervenbahnen des Menschen weisen

verschiedene Arten von Rezeptoren für Adenosin auf. Dockt dieses Molekül an einen Rezeptor an, wird die Ausschüttung von Dopamin, Noradrenalin und Acetylcholin gehemmt. Das bedeutet, dass der Körper den Zellen eine „notwendige Pause“ mitteilt. Beiglböck (2016) hält fest, dass, je mehr die Zellen arbeiten, umso höher ist der interzelluläre Adenosinspiegel, desto mehr Rezeptoren werden besetzt und nachfolgende Aktivitäten der Nervenzellen werden gehemmt. Eine langsam arbeitende Zelle ist das Resultat. Aus dieser Kettenreaktion entsteht ein zusätzliches Ergebnis. In weiterer Folge erweitern sich die Blutgefäße, der Blutdruck sinkt und die Herzfrequenz wird langsamer. Adenosin besitzt weitere Besonderheiten, dessen genauere Ausführung den Rahmen dieser Arbeit überschreiten würde. Die Wichtigkeit von Adenosin wird deutlich, wenn man die chemische Summenformel mit der des Koffeins vergleicht. Sie lautet  $C_{10}H_{13}N_5O_4$  (Vergleich Koffein:  $C_8H_{10}N_4O_2$ ). Eine gewisse Ähnlichkeit springt sofort ins Auge. Koffein besitzt die Fähigkeit, Adenosinrezeptoren in Nervenzellen zu besetzen, ist aber nicht in der Lage sie zu aktivieren. Eine negative Rückkopplung bleibt aus. Aus diesem Grund wird Koffein als sogenannter „kompetitiver Antagonist“ des Adenosins bezeichnet (Beiglböck, 2016). Koffein als „Aufputzmittel“ wirkt demnach nicht direkt auf eine Nervenzelle ein. Enzyme, welche Ermüdungserscheinungen entstehen lassen würden (Dopamin, Noradrenalin, Acetylcholin etc.), werden gehemmt bzw. bleiben aus. Zusätzlich erhöht Koffein die Aktivität der Natrium-Kalium-Pumpe. Diese Vorrichtung ist zuständig für den Austausch von Natrium und Kalium-Ionen zwischen dem Zellinneren und Zelläußeren und die damit verbundene Aufrechterhaltung des Ruhepotentials. Diese Steuerung trägt sekundär dazu bei, dass der Muskulatur mehr Energie zur Verfügung steht. Hier gilt: Dieser Effekt ist nur bei Koffeinemengen messbar, welche deutliche Haushaltsmengen übersteigen. Die hier erläuterten Mechanismen sind die Grundlagen von gesundheitlich vorteilhaften, aber auch gesundheitsschädigenden Eigenschaften von Koffein (Beiglböck, 2016). Zusätzlich zu den bereits genannten Auswirkungen erhöht sich, nach einem Koffeinkonsum, das Serotonin, welches einen positiven Effekt auf die Ausdauer, die Muskelkraft und neuromuskuläre Koordination aufweist (Beiglböck, 2016). Diese Schlussfolgerung erklärt die pharmazeutische Nutzung von Koffein bei Tabletten gegen Migräne. Gleichzeitig erhöht es den Energiestoffwechsel des Gehirns. Koffein ist, wie die aktuelle Studienlage darlegt, sowohl in Bereichen des Alltags, als auch in sport- und leistungsspezifischen Gebieten, ein wertvolles Produkt.

### Koffein und Nervenbotenstoffe

Koffein beeinflusst, so wie Adenosin, die Aktivität bestimmter Neurotransmitter. Neurotransmitter sind chemische Botenstoffe, welche für die Kommunikation, vor allem zwischen den Gehirnzellen und Nervenbahnen verantwortlich sind. Laut Beiglböck (2016) steht fest, dass vor allem die Gamma-Amino-Buttersäure (GABA) beziehungsweise deren

Rezeptoren betroffen sind. Koffein schränkt durch die Erhöhung des Dopamin Spiegels die Ausschüttung von GABA ein, weshalb mehr Rezeptoren gebildet werden müssen, um dies zu kompensieren. GABA ist für Schlaf und Entspannung zuständig. Eine geringere Konzentration dieses Neurotransmitters bedeutet daher mehr Aktivierung, Wachheit und eine erhöhte motorische Aktivität. Da auch Benzodiazepine (Beruhigungsmittel) und Alkohol an diesen Rezeptoren andocken, erklärt sich der Umstand, dass die dämpfende Wirkung von Alkohol und Beruhigungsmittel subjektiv deutlich geringer wahrgenommen wird, wenn gleichzeitig Koffein zugeführt wird. Koffein regt auch die Ausschüttung von Acetylcholin an. Acetylcholin ist einer der wichtigsten Neurotransmitter während der Gehirnentwicklung im Mutterleib. Beim Erwachsenen ist er vor allem für die Regulation von Wachheit und Aufmerksamkeit zuständig (Beiglböck, 2016).

### Koffein Abbau

Die Halbwertszeit, in welcher der Mensch Koffein im Körper abgebaut hat, beträgt durchschnittlich 3,5 Stunden. Die Halbwertszeit beschreibt jene Dauer, die der Körper benötigt, die zuvor konsumierte Menge an Koffein zur Hälfte abzubauen (Beiglböck, 2016). Die Aufspaltung beginnt bei Trimethylxanthin, welches zu Dimethylxanthin und durch weitere chemische Prozesse in Monomethylxanthin aufgespalten wird. Monomethylxanthin wird durch weitere Reaktionen zu Harnsäure umgewandelt und ausgeschieden. Dieser Sachverhalt wird durch ein zusätzliches Abbauprodukt verkompliziert. Theobromin, ein Dimethylxanthin welches durch Aufspaltung von Trimethylxanthin entsteht, hemmt wiederum den Abbau von Trimethylxanthin und erschwert dessen Verstoffwechslung. Eine allgemeine Aussage über die Effekte von Koffein im zentralen Nervensystem zu beschreiben, scheint ausgeschlossen. Die Interpretation der Daten ist höchst subjektiv, da die Wirksamkeiten unter den Probanden teilweise weit voneinander abweichen. Die Datenlage bestätigt weitgehend, dass Koffein die Wachsamkeit und Ausdauerleistungsfähigkeit verbessern würde. Eine Toleranz im ZNS des Menschen scheint nicht leicht entwickelt zu werden, obwohl Koffeinabhängigkeiten als positiv beschrieben wurden. Koffeinkonsum leitet gefäßverengende Effekte im Gehirn und gefäßerweiternde Effekte des Blutflusses in den Extremitäten ein.

## Koffein Ressourcen

Neben den Eigenschaften von Koffein auf den menschlichen Körper, ist es auch notwendig zu verstehen, wieviel Koffein in diversen Getränken enthalten ist. Um die praktische Anwendung von Koffein im Sportbereich optimal nutzen zu können, wird in der folgenden Tabelle der Koffeingehalt einzelner Getränke dargelegt. Der Koffeingehalt unterscheidet sich je nach Getränk und Zubereitungsform. Die quantitative Analyse von Getränken, die von Mitarbeitern der Addiction Research Foundation zu Hause zubereitet wurden, ergab einen niedrigeren und viel variableren Koffeingehalt von Tee und Kaffee als in früheren Studien berichtet. Die relative Koffeinkonzentration von 37 selbst zubereiteten Teeproben betrug rund 27mg pro Tasse (Schwankungsbreite von 8mg bis 91mg), für 46 Kaffeeproben betrug die mittlere Konzentration 74mg pro Tasse (Schwankungsbreite 29mg bis 176mg). Schlussfolgernd könnte gemutmaßt werden, dass wenn Tee und Kaffee weniger Koffein enthalten als allgemein angenommen, die Wirksamkeit von Koffein höher sein könnte als gewöhnlich angenommen, ebenso wie der relative Koffeingehalt bestimmter kommerzieller Zubereitungen, einschließlich Schokolade und Cola (Gilbert, Marshman, Schwieder & Berg, 1976).

Tabelle 1: *Darstellung des Koffeingehalts ausgewählter Getränke*

| Reference no. | Ground coffee                    |                      |  | Instant coffee                   |                      |  | Decaffeinated coffee             |                      |  | Tea                              |                      |  | Colas                                |                          |  |     |
|---------------|----------------------------------|----------------------|--|----------------------------------|----------------------|--|----------------------------------|----------------------|--|----------------------------------|----------------------|--|--------------------------------------|--------------------------|--|-----|
|               | Stated caffeine content (mg/cup) | Stated cup size (ml) | Estimated caffeine concentration (µg/ml) | Stated caffeine content (mg/cup) | Stated cup size (ml) | Estimated caffeine concentration (µg/ml) | Stated caffeine content (mg/cup) | Stated cup size (ml) | Estimated caffeine concentration (µg/ml) | Stated caffeine content (mg/cup) | Stated cup size (ml) | Estimated caffeine concentration (µg/ml) | Stated caffeine content (mg/serving) | Stated serving size (ml) | Estimated caffeine concentration (µg/ml) |     |
| 9*            | 88 - 119                         | 250                  | 352 - 476                                | 55 - 62                          | 250                  | 220 - 248                                | 13 - 35                          | 250                  | 52 - 140                                 | 43 - 110                         | 250                  | 172 - 440                                | -                                    | -                        | -  |     |
| 10*           | -                                | -                    | -  | 86 - 99                          | 250                  | 344 - 396                                | 2 - 4                            | 250                  | 8 - 16                                   | -                                | -                    | -  | -                                    | -                        | -  |     |
| 11            | 90 - 120                         | 140                  | 643 - 857                                | 66 - 74                          | 140                  | 471 - 529                                | 1 - 6                            | 140                  | 7 - 43                                   | 70                               | 140                  | 500                                      | 19                                   | 140                      | 136                                      |     |
| 12*           | 100                              | 155                  | 645                                      | 30 - 75                          | 155                  | 194 - 483                                | 2 - 6                            | 155                  | 13 - 39                                  | -                                | -                    | -  | 25 - 37                              | 280                      | 89 - 132                                 |     |
| 13            | 100 - 150                        | 225                  | 444 - 667                                | -                                | -                    | -  | -                                | -                    | -  | 30 - 50                          | 225                  | 133 - 222                                | -                                    | -                        | 40                                       |     |
| 14            | 96                               | 140                  | 686                                      | -                                | -                    | -  | -                                | -                    | -  | 19                               | 140                  | 136                                      | -                                    | -                        | -  |     |
| 15            | 170 - 190                        | -                    | -  | -                                | -                    | -  | -                                | -                    | -  | -                                | -                    | -  | -                                    | -                        | -  |     |
| 16            | 90 - 125                         | 140                  | 643 - 893                                | 60 - 80                          | 140                  | 429 - 571                                | 30 - 75                          | 140                  | 214 - 536                                | 30 - 70                          | 140                  | 214 - 500                                | 30 - 45                              | 335                      | 90 - 134                                 |     |
| 17            | 100 - 150                        | -                    | -  | ?                                | -                    | -  | -                                | -                    | -  | 100 - 150                        | -                    | -  | 35 - 55                              | 335                      | 104 - 164                                |     |
| Range:        | Low                              | 88                   | 140                                      | 352                              | 30                   | 140                                      | 194                              | 2                    | 140                                      | 7                                | 19                   | 140                                      | 133                                  | 19                       | 140                                      | 40  |
|               | High                             | 190                  | 250                                      | 893                              | 80                   | 250                                      | 571                              | 75                   | 250                                      | 536                              | 150                  | 250                                      | 500                                  | 55                       | 335                                      | 164 |

\*These reports describe laboratory determinations.

Quelle: Gilbert et al., (1976)

Aktuellere Literatur von Burke et al. (2013) erläutert in ihrem Buch den Koffeingehalt weiterer Getränke, welche sich derzeit auf dem Markt befinden. Neben Haushaltskaffee sind auch namenhafte Firmen vertreten, welche Kaffee in ihrem Sortiment anbieten. Diverse Soft- Drinks wurden ebenfalls analysiert und werden in der Liste mit entsprechenden Koffeingehalt aufgezeigt.



Tabelle 2: Koffeingehalt verschiedener Getränke und Soft-Drinks

| SOFT DRINKS/SODA BEVERAGES                                 |                     |                            |
|--|---------------------|----------------------------|
| Coca-Cola and Coke Zero                                    | 355 ml can          | 34                         |
| Diet Coke  | 355 ml can          | 46                         |
| Pepsi  | 355 ml can          | 38                         |
| Pepsi Max  | 355 ml can          | 68                         |
| Mountain Dew (all varieties other than decaf or Game Fuel) | 355 ml can          | 36                         |
| Mountain Dew (Game Fuel varieties)                         | 355 ml can          | 48                         |
| Dr. Pepper   | 355 ml can          | 40                         |
| RC Cola  | 355 ml can          | 36                         |
| Canada Dry Cola (not diet)                                 | 355 ml can          | 30                         |
| ENERGY DRINKS  |                     |                            |
| Red Bull energy drink                                      | 250 ml can          | 80                         |
| V energy drink (AUS/NZ)                                    | 500 ml can          | 155                        |
| Mother energy drink (Aus/NZ)/Relentless energy drink (UK)  | 500 ml can          | 160                        |
| Monster energy drink                                       | 500 ml can          | 160                        |
| Lipovitan energy drink                                     | 250 ml can          | 50                         |
| Rockstar energy drink                                      | 500 ml can          | 160                        |
| Food or drink  | Serving size        | Caffeine content (mg)      |
| COFFEE AND TEA PRODUCTS                                    |                     |                            |
| Instant coffee   | 250 ml cup          | 60 (12-169)*               |
| Brewed coffee  | 250 ml cup          | 80 (40-110)*               |
| Brewed coffee (same outlet on different days)              | 250 ml cup          | 130-282*                   |
| Short black coffee/espresso from variety of outlets (AUS)  | 1 standard serving  | 107 (25-214)*              |
| Starbucks Breakfast Blend brewed coffee (USA)              | 600 ml (venti size) | 415 (256-564)*             |
| Iced coffee—commercial brands (AUS)                        | 500 ml bottle       | 30-200, depending on brand |
| Starbucks Double Shot coffee drink                         | 192 ml can          | 130                        |
| Starbucks Double Shot (energy varieties)                   | 240 ml can          | 78                         |
| Frappuccino  | 375 ml cup          | 90                         |
| Tea  | 250 ml cup          | 27 (9-51)*                 |
| Black tea  | 250 ml cup          | 25-110                     |
| Green tea  | 250 ml cup          | 30-50                      |
| Iced tea   | 600 ml bottle       | 20-40                      |

Quelle: Burke et al., (2013)

## Koffein und Doping

Bis 1933 war das Wort Doping Teil der englischen Sprache geworden. Während sich Viele gegen Doping aussprachen, stimmte das Internationale Olympische Komitee (IOC) erst 1967 für eine Drogentestrichtlinie, die den Konsum bestimmter Drogen verbietet. Der Einsatz von Medikamenten zur Steigerung der körperlichen Leistungsfähigkeit ist seit Beginn der aufgezeichneten Geschichte ein Merkmal des menschlichen Wettbewerbs. Das Ziel des Nutzers war es hauptsächlich, Kraft zu gewinnen und / oder Ermüdung zu minimieren. Heute klassifizieren wir solche Medikamente als Anabolika und Stimulanzien. Schon im antiken Griechenland, experimentierten die Athleten mit verschiedenen Diäten, schworen auf bestimmte Lebensmittel oder Zubereitungsformen. Sie tranken verschiedene Brände und Weine und aßen halluzinogene Pilze und Sesamsamen, um Ihre Leistung zu steigern. Eine Menge der damaligen Stimulanzien waren Pflanzen. Die Samoeden beispielsweise verwendeten Bufotein, eine Art Fliegenpilz, um ihre Kampfbereitschaft zu steigern. In Teilen Afrikas wurde eine Pflanze verzehrt, welche Norpseudoephedrin enthielt, welche die Kraft steigern und die Ermüdung verzögern sollte. In Peru kauen Ureinwohner in den Anden Koka Blätter und trinken Koka- Tee, um ihre Ausdauerfähigkeit zu verbessern. In der letzten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts begann die moderne Medizin mehr Arzneimittel herzustellen. Es war kein Zufall, dass diese Produkte, unter anderem zur Leistungssteigerung, missbraucht wurden. Das Hauptaugenmerk lag bei Stimulanzien welche als ergogene Hilfsmittel verwendet wurden. Gleichzeitig war dies auch die Geburtsstunde wissenschaftlicher Experimente mit den anabolen Effekten von Hormonen. Die ersten Einsätze von Koffein als leistungssteigernde Stimulanz sind aus Bürgerkriegszeiten bekannt geworden. Erschöpfte SoldatInnen sollen davon profitiert haben und konnten wachsender handeln. Auch LiteratInnen und WissenschaftlerInnen bezeichneten Koffein als „Droge der Wahl“, da deren Arbeit ein gut funktionierendes Gehirn voraussetzte (Bahrke, 2001).

Am 1. Juli 2008 wurde in Österreich die NADA (National Anti Doping Agency), als Gesellschaft mit beschränkter Haftung und mit ihrem Hauptsitz in Wien. Sie ist eine nicht gewinnorientierte, unabhängige Anti-Doping Organisation und hat die Aufgabe eine umfassende Anti-Doping Arbeit in Österreich zu leisten. Grundlage der präventiven und repressiven Tätigkeiten sind das Anti-Doping Bundesgesetz und der Welt-Anti-Doping-Code (<https://www.nada.at/de/nada-austria/aufgaben-ziele>).

Die Gründung der Welt-Anti-Doping-Agentur (WADA) und der NADA auf nationaler Ebene hat zu einer Vereinheitlichung der Anti-Doping-Richtlinien geführt. In Übereinstimmung mit dem Welt-Anti-Doping-Kodex von 2003 hat die WADA die Liste der verbotenen Substanzen von 2004 als internationalen Standard entwickelt. Die Liste der verbotenen Substanzen, welche vom IOC (International Olympic Comitee) aufgestellt wurde, hatte die WADA durch

eine Reihe von Änderungen überarbeitet. Diese Veränderungen hatten große Konsequenzen für die medizinisch gestützte Therapie von SpitzensportlerInnen (Striegel, Furian, Niess, Horstmann, 2004). Im speziellen Fall des Koffeins wurden erstmals in den 1980er Jahren Publikationen bekannt, die die ergogenen Effekte mithilfe hoher Dosierungen der Substanz aufzeigten. Infolgedessen führte man dafür einen Grenzwert von 12 Milligramm Koffein pro Milliliter Urin ein, was bei einer Überschreitung als Dopingdelikt geahndet wurde. Fälschlicherweise wurde damals angenommen, dass dieser Grenzwert durch alltäglichen Konsum von Kaffee schwer erreicht werden könne und die Konzentrationen des Koffeins im Harn unverändert bliebe. Nach einer Einnahme von 4 - 5 Tassen Kaffee oder von 3 - 4 Litern Cola könnte der Grenzwert erreicht sein, was einer Aufnahme von über 6 - 18 mg/kg KG entspricht. Damit würde der Dopingtest positiv ausfallen und der Athlet disqualifiziert werden. Es zeigte sich allerdings, dass diese beiden Parameter (Kaffeekonsum und Konzentration im Harn) von verschiedensten individuellen Faktoren, wie beispielsweise Geschlecht und Körpergewicht, abhängig sind und der Toleranzwert auch durch den alltäglichen Konsum koffeinhaltiger Getränke überschritten werden kann (Ellender & Linder, 2005). Von 1984 bis 2004 stand Koffein auf dieser Verbotliste der WADA.

## 3.2 Ermüdung

Das Thema Ermüdung beschäftigt die Wissenschaft seit langer Zeit. Eine Studie aus dem Jahr 1915 von Mosso versuchte schon die Ermüdung in weitere Teilgebiete zu gliedern. Bigland-Ritchie, ihrer Zeit eine Ikone auf diesem Gebiet, veröffentlichte zahlreiche Studien zu diesem Thema. Die Sportwissenschaft beschäftigt sich seit jeher mit der Frage, wie Ermüdung entsteht, woher sie kommt und was den Ermüdungszustand hervorruft. Nicht jede Studie versucht Ermüdung als direkten Parameter aufzuzeigen, aber oberflächlich versteckt sich die Frage nach der „fatigue“ hinter jeder Studie. Nahrungsergänzungsmittelstudien, Theorien über Muskelquerschnittvergrößerungen, Studien über verschiedene Trainingsformen wie Schnellkraft und Koordinationstraining etc. untersuchen in ihrem Kern den Ermüdungszustand. Schmidt, Lang und Heckmann (2010) erläutern in dem Sammelwerk „Physiologie des Menschen“ verschiedene Formen und Aussagen bezüglich der Ermüdung. Es gibt mittlerweile viele Definitionen, die versuchen „fatigue“ zu beschreiben. Im Zusammenhang mit der muskulären Komponente ist es definiert als eine Abnahme der körperlichen Leistungsfähigkeit. Mögliche andere Definitionen in diesem Zusammenhang sind eine Beeinträchtigung der psychischen und physischen Leistung sowie der reinen Fähigkeit, Kraft zu entwickeln. Fitts (2007) schreibt, dass Ermüdung durch einen Abfall der muskulären Stärke charakterisiert wird, welche aus einer Reduktion von Kraft und Geschwindigkeit resultiert. Eine über einen längeren Zeitraum andauernde verrichtete Arbeit führt nicht nur zu metabolisch bedingter Ermüdung, sondern zu klassischen Ermüdungserscheinungen im Bereich der Motorik. Am Ende einer erschöpfenden Trainingseinheit oder einer allgemeinen dynamischen Arbeit treten zusätzliche Koordinationsstörungen auf. Die Präzision nimmt deutlich ab, seien es zyklische oder azyklische wiederkehrende Bewegungen. Ermüdung, welche durch statische Arbeit erzeugt wird, erscheint als Tremor. Haltungsermüdung äußert sich unter anderem in einem Nachvornekippen des Rumpfes und einem Hängenlassen der Schultern. In Folge einer Ausbelastung können Einschränkungen der Feinmotorik auftreten. Die Ergebnisse der Ermüdung sind gewisse Leistungseinbußen, welche aber durch Ruhe und Schlaf reversibel sind. Generell kann behauptet werden, dass Ermüdung ein komplexes und multifaktorielles Ereignis darstellt, welches verschiedene Ursachen haben kann. Schmidt et al. (2010) beschreibt sieben Faktoren, welche Einflüsse auf die Ermüdung haben können. Muskulärer Kalium-Mangel, welcher die Innervationszeit des Muskels bei Belastungen beeinflusst. Ein lokaler pH-Wert-Abfall, da die Muskulatur übersäuert, limitiert notwendige Enzymaktivitäten. Bewegung braucht Energie, welche das Muskelglykogen liefert. Ein Glykogenmangel kann zur Einschränkung der ATP-Resyntheserate führen. Neben dem Energieverbrauch erhöht sich gleichzeitig die Körpertemperatur, welche wiederum

weitere Enzymaktivitäten einschränkt. Laut Schmidt et al. (2010) ist sowohl der bewegungsinduzierte Temperaturanstieg der Extremitäten, als auch die Erhöhung der Körperkerntemperatur ausschlaggebend für Ermüdungserscheinungen. Hinzu kommt der Mangel an Flüssigkeit, welcher das Herzminutenvolumen mindern, den Blutdruck senken, den Blutfluss verlangsamen und die Versorgung des Muskels reduzieren kann. Die psychische Komponente (Motivation) spielt, neben den physiologischen Komponenten, eine ausschlaggebende Rolle. Enoka & Duchateau (2008) bezeichnet die Weite des Begriffs „Ermüdung“ als problematisch, da sie sich als ein motorisches Defizit, Wahrnehmungseinschränkungen, Rückgänge mentaler Funktionen, die stetige Abnahme der Kraft eines Muskels oder das Ende einer dauerhaft durchgeführten Bewegung beschreiben lassen kann. Es gibt, wie schon genannt, zahlreiche Einflussfaktoren, welche Ermüdung hervorrufen können. Darüber sind sich auch andere Autoren einig (Fitts, 2007; Macintosh & Rassier, 2002). Enoka & Duchateau (2008) heben allerdings hervor, dass ihre Definition der muskulären Ermüdung nicht der Punkt ist, an dem die Muskelkraft sinkt und eine vermeintliche Übungsausführung scheitert. Vielmehr ist die muskuläre Ermüdung eine Verringerung der Maximalkraft, welche direkt nach Beginn einer maximal willkürlichen Kontraktion stattfindet. Ein Prinzip, welches sich in den letzten Jahren herauskristallisiert hat, ist die Aufgabenabhängigkeit der Ermüdung eines Muskels, welche auch von anderen Autoren übernommen wurde (Asmussen, 1979; Bigland-Ritchie, Rice, Garland & Walsh, 1995). Wie am Anfang des Kapitels schon vorweggenommen, konnte schon Mosso (1915) zeigen, dass eine durch willkürliche Kontraktion abnehmende Muskelkraft durch elektrische Reizung des muskelinnervierenden Nervs wieder „aufgeladen“ werden kann. Diese Erkenntnis lässt laut Hollmann (1977) eine Einteilung in zentrale und periphere Ermüdung zu. Gandevia, Enoka, McComas, Stuart & Thomas (1995) unterteilen in ihrem Sammelwerk „Fatigue“ die Ermüdung in unterschiedliche Sektionen. Zentrale und periphere Ermüdung wurden unabhängig voneinander betrachtet.

Muskelermüdung kann entweder von zentraler (Versagen der Erregung von Motoneuronen), oder von peripherer Bedeutung (Versagen der Übertragung des neuronalen Signals, oder Versagen des Muskels, auf neuronale Erregung zu reagieren) sein (Bigland-Ritchie et al., 1978, 1982). Auf peripherer Ebene sind möglicherweise mehrere prä- und postsynaptische Mechanismen und Stellen beteiligt: darunter ein Versagen der Ausbreitung des Aktionspotentials entlang des Axons, eine unzureichende präsynaptische Freisetzung von dem Neurotransmitterstoff Acetylcholin, eine nicht genügende Depolarisation der postsynaptischen Membran; das Versagen der Ausbreitung des Aktionspotentials entlang des Sarkomlemmas und ein Ausfall der Exzitation-Kontraktions-Kopplung. Fitts (2007) versucht die Ermüdung über die „Cross-Bridge“-Theorie zu erklären. Seiner Meinung nach ist Ermüdung,

neben dem Fitnesszustand, Ernährungsstatus, Muskelfaserzusammensetzung, Dauer und Intensität, von der Aktivität zwischen Aktin und Myosin abhängig. Im Review von Fitts (2007), mit dem Titel „*Cross bridge and muscle fatigue*“, wird detailliert beschrieben, wie die Beziehung zwischen den beiden Proteinen die Wachheit beeinflussen kann. Laut Fitts (2007) ist die periphere Ermüdung, die Ermüdung direkt am Muskel, ein nicht zu vernachlässigendes Thema. MacIntosh & Rassier (2002) versuchen in ihrer Studie die Ermüdung sichtbar zu machen. Sie gehen davon aus, dass Ermüdung mit einer Reduktion von  $Ca_{2+}$  Ionen und einer Sensitivitätsstörung von  $Ca_{2+}$  entsteht. Die Hypothese geht weiter, indem sie das Gegenteil der Ermüdung, die sogenannte Potenzierung, auf eine Stufe mit der Ermüdung stellen. Eine Koexistenz sei ohne Zweifel möglich, was es schwierig macht, die verschiedenen Prozesse zu quantifizieren und einzuordnen. Mit wiederholten 10Hz Stimulationen ist es möglich, dass sich die erzeugte Spannung zuerst erhöht, im Laufe des Experiments jedoch abfällt (MacIntosh & Rassier, 2002). MacIntosh & Rassier (2002) stellten sich selbst die Frage, ab welchem Zeitpunkt man von Ermüdung sprechen kann und wo diese stattfindet. Ermüdungserscheinungen können im Gehirn, im Muskel, an einem innerverierenden Nerv, etc., ausfindig gemacht werden und aufgrund biochemischer und/oder neuronaler Unterversorgung von einem Leistungsabfall betroffen sein. Durch die Teilung der Ermüdung in eine Zentrale und Periphere wurde der Begriff „Neuromuskuläre Ermüdung“ verwendet um spezifisch die Ermüdung im Zentralnervensystem zu untersuchen. Boeiro, Jubeau, Zory, und Maffioletti (2005) unterteilten die beiden Begriffe dahingehend, dass periphere Ermüdung an oder unter der neuromuskulären Verbindungsstelle stattfindet. Die zentrale Ermüdung hingegen sei eine progressive Verringerung der Muskelaktivierung durch intrinsische, motoneurale, spinale und supraspinale Umstände. Gandevia et al. (1995) definiert die zentrale Ermüdung als eine fortschreitende übungsbedingte Verringerung der freiwilligen Aktivierung eines Muskels (in der Regel bei maximaler freiwilliger Kontraktion). Zusätzlich zu den Studien, welche versuchen, Ermüdung theoretisch zu definieren und einen Rahmen zu verleihen, gibt es Abhandlungen, die versuchen, Ermüdung auf andere, praktisch orientierte Art, zu beleuchten. Machado et al. (2018) versuchten durch transkranielle Gleichstromstimulation (tDCS) eine Verbesserung der Trainingsleistung zu erzielen. 22 Studien und insgesamt 393 StudienteilnehmerInnen wurden in die Übersichtsarbeit inkludiert und 11 Studien mit 236 TeilnehmerInnen in die Meta Analyse. Das Hauptziel war die Untersuchung des primären motorischen Kortex und ob während einer transkraniellen Gleichstromstimulation eine Verbesserung der Trainingsleistung einhergeht. Eine signifikante Verbesserung im Radfahren bis zur völligen Erschöpfung zeigte sich bei der anodischen tDCS. Die mittlere Differenz betrug hier 93,41s. Keinen Effekt zeigte die anodische tDCS beim isometrischen Krafttraining der oberen und unteren Extremitäten. Isokinetische Kraftübungen zeigten gemischte Resultate. Weitere kontrollierte Studien mit größeren

Stichprobengrößen und einer breiteren Erforschung der tDCS-Methode sind abzuwarten. Eine weitere Studie von Boerio et al. (2005) untersuchte die zentrale und periphere Ermüdung, welche durch eine typische EMS-Sitzung hervorgerufen wird. Es wurde angenommen, dass, nachdem elektrische Reize auf den M. triceps surae einwirken, die willkürliche Plantarflexion des Fußes durch eine periphere Ermüdung eingeschränkt werden kann. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass zentrale und periphere Ermüdung zur Erschöpfung des Muskels beigetragen haben. Die signifikante Reduktion der „Plantarflexor-MVC -Drehmomentreduzierung“ um -9%, die nach dem EMS-Training beobachtet wurde, wurde von einer verminderten willkürlichen Aktivierung der Agonistenmuskulatur begleitet, das durch eine Interpolation und normalisierte EMG-Ergebnisse bestätigt wurde (Boerio et al., 2005).

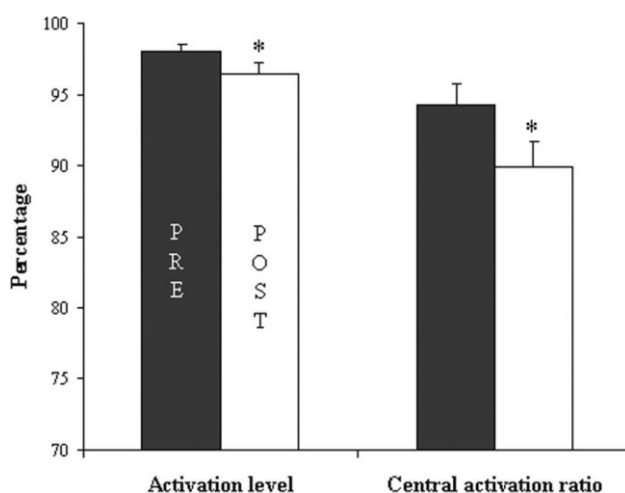


Abbildung 3: *Activation level before and after EMS stimulation*

Ermüdung findet durch periphere Mechanismen im Muskel und zentrale Mechanismen im Zentralnervensystem statt. Welche Faktoren für eine Art der Ermüdung verantwortlich sind, bleibt weiterhin ein zu erforschendes Thema in der Wissenschaft.

### 3.3 Messung der Ermüdung / Rate of perceived exertion

Ein Gefühl oder ein Empfinden sichtbar und messbar zu machen, stellte bis zum Jahr 1982 eine Herausforderung dar. Der schwedische Psychologe Gunnar Borg versuchte mit seinem Begriff der „perceived exertion“ (dt.: wahrgenommene Anstrengung) eine Skala zu beschreiben, welche diesen Prozess der Operationalisierung der Ermüdung vereinfachen sollte. Heute ist diese Skala in weiten Teilen der Rehabilitation, im Personal Training und in simplen Trainingseinheiten einsetzbar. Einige Kritikpunkte müssen dennoch berücksichtigt werden. Borg's Ziel war es, eine Methode zu finden, welche ein Ziel oder eine Errungenschaft einer Person messbar machte. Unabhängig von dessen Geschlecht, Alter und Rahmenbedingungen (Krankheit, Schwangerschaft etc.). Vor allem für Personen, welche im gesundheitlichen Fachgebiet tätig sind, hilft die Borg Skala. Empathie wird verständlicher, greifbarer und sichtbarer gemacht (Borg, 1982).

Drei von 11 Studien, welche in der Tabelle 4.1 dargestellt werden, untersuchen neben den Auswirkungen von Koffein auf die Leistungsfähigkeit bei Mehrfachwiederholungsmaxima, die Unterschiede der „perceived exertion“. Dieser zusätzliche Parameter soll helfen Veränderungen bezüglich der wahrgenommenen Anstrengung ohne und unter Koffeineinfluss darzulegen.

Tabelle 3: *Scale of perceived exertion*

Table 1. The 15-grade scale for ratings of perceived exertion, the RPE Scale. (3)

|    |                  |
|----|------------------|
| 6  |                  |
| 7  | Very, very light |
| 8  |                  |
| 9  | Very light       |
| 10 |                  |
| 11 | Fairly light     |
| 12 |                  |
| 13 | Somewhat hard    |
| 14 |                  |
| 15 | Hard             |
| 16 |                  |
| 17 | Very hard        |
| 18 |                  |
| 19 | Very, very hard  |
| 20 |                  |

Quelle: Borg, (1982)

Die wahrgenommene Anstrengung wird meistens zur Bewertung sportlicher Aktivität herangezogen. Kritisch wird, bei näherer Betrachtung, die Tatsache, dass Personen ihre „wahrgenommene Anstrengung“ übertrieben beurteilen. Würde man eine Person auf einem Laufband in einem vorgegebenen Pulsbereich von 130-140 bpm schnell gehen lassen,



wäre es möglich, dass sich dies auf der Skala mit einer 15 widerspiegelt. Dieselbe Person, dieses Mal mit einem Pulsbereich von 140-150 bpm, wiederholt das Training. Die „wahrgenommene Anstrengung“ bleibt, trotz erhöhter Herzleistung, gleich. Die Schwierigkeiten bleiben bestehen, da keine Vergleiche unter Personen gezogen werden können. Person A beschreibt ein Gewicht X mit „1“ und ein Gewicht Y mit „10“. Für Person B ist das Gewicht X eine „5“ und Y eine „25“. Borg (1982) formuliert ein System mit einer Zahlenreihe von 6-20, welches weltweit an Bedeutung zum Beschreiben des individuellen Empfindens der Belastungsintensität beschreibt. In Anlehnung an andere Messverfahren, wie die Herzfrequenz- und Laktatmessung, können die Ziffern für die aktuelle Herzfrequenz der Person herangezogen werden. 6 würde einer Herzfrequenz von 60 bpm und 20 einer Schlagfrequenz von 200 bpm entsprechen. Später präsentierte Borg (1982) eine neue Skala, welche eine zusätzliche Überprüfung ermöglichen kann und Anstrengungen verhältnismäßig beschreibt. Würde eine Person eine Tätigkeit mit „4“ beschreiben, müsse die Zahl 2 genau die Hälfte der Anstrengung der Person widerspiegeln. So können Verhältnisse aufgestellt werden.

Tabelle 4: *Ratio – Property Scale*

Table 2. The new rating scale constructed as a category scale with ratio properties.  
(5)

|     |                   |                   |
|-----|-------------------|-------------------|
| 0   | Nothing at all    |                   |
| 0.5 | Very, very weak   | (just noticeable) |
| 1   | Very weak         |                   |
| 2   | Weak              | (light)           |
| 3   | Moderate          |                   |
| 4   | Somewhat strong   |                   |
| 5   | Strong            | (heavy)           |
| 6   |                   |                   |
| 7   | Very strong       |                   |
| 8   |                   |                   |
| 9   |                   |                   |
| 10  | Very, very strong | (almost max)      |
| •   | Maximal           |                   |

Quelle: Borg, (1982)

Die neu entwickelte Skala beginnt bei 0 und endet mit 10. Jede Zahl beschreibt einen Zustand der körperlichen Ausbelastung einer Person. Borg (1982) schlussfolgert, dass es keine perfekte Skala für diverse Belastungen gibt. Die erste veröffentlichte Skala wird für sportwissenschaftliche Fachartikel und sportliche Aktivitäten in der medizinischen Trainingstherapie bevorzugt eingesetzt. Die neue Skala wäre bei anderen subjektiven Symptomen wie Atemschwierigkeiten und allgemeinen Schmerzen passender.

### 3.4 Repetitions in Reserve

Helms, Cronin, Storey & Zourdos (2016) schreiben in ihrem Artikel über sogenannte RIR). Die Autoren bezeichnen RIR als nützlicheres Werkzeug zur Veranschaulichung des Belastungsempfindens, spezifisch im Krafttraining.

Tabelle 5: *Repetitions in Reserve*

| Rating | Description of perceived exertion |
|--------|-----------------------------------|
| 10     | Maximum effort                    |
| 9      | 1 repetition remaining            |
| 8      | 2 repetitions remaining           |
| 7      | 3 repetitions remaining           |
| 5–6    | 4–6 repetitions remaining         |
| 3–4    | Light effort                      |
| 1–2    | Little to no effort               |

Quelle: Helms et al., (2016)

Die RIR-Skala ist darauf aufgebaut, wieviel Wiederholungen nach Beendigung eines Trainingssatzes noch hätten vollzogen werden können. Dieser Ansatz des subjektiven Belastungsempfindens passt die bewegte Last automatisch in einem Satz zu Satz Verhältnis an. Vor allem bei Intensitäten nahe der Einwiederholungsmaxima kann diese Art der Skala einen akkuraten Richtwert aufweisen und dementsprechend Feedback geben. In vielen Trainingsplänen werden Einwiederholungsmaxima theoretisch berechnet. Auf dieser Theorie lastet somit das theoretische 10 Wiederholungsmaximum. Um stärker zu werden bzw. Progression in einen Trainingsplan miteinzuschließen ist es notwendig, mehr Last oder eine gewohnte Last öfter zu bewegen. Es kann vorkommen, dass man sich an einem Trainingstag körperlich nicht in der Lage fühlt, ein zuvor errechnetes Gewicht praktisch zu überwinden. Hier ist es völlig legitim nach dem Prinzip der „Repetitions in reserve“ zu trainieren, anstatt Verletzungen zu riskieren. Helms et al. (2016) weisen darauf hin, dass inhärente Unterschiede in der sportlichen Leistung aufgrund biologischer und psychologischer Variabilität auftreten können. Faktoren wie Schlaf, Ernährung und Stress können die Muskelkraft während eines Trainings oder einer Testung stark beeinflussen.

## 4 Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche

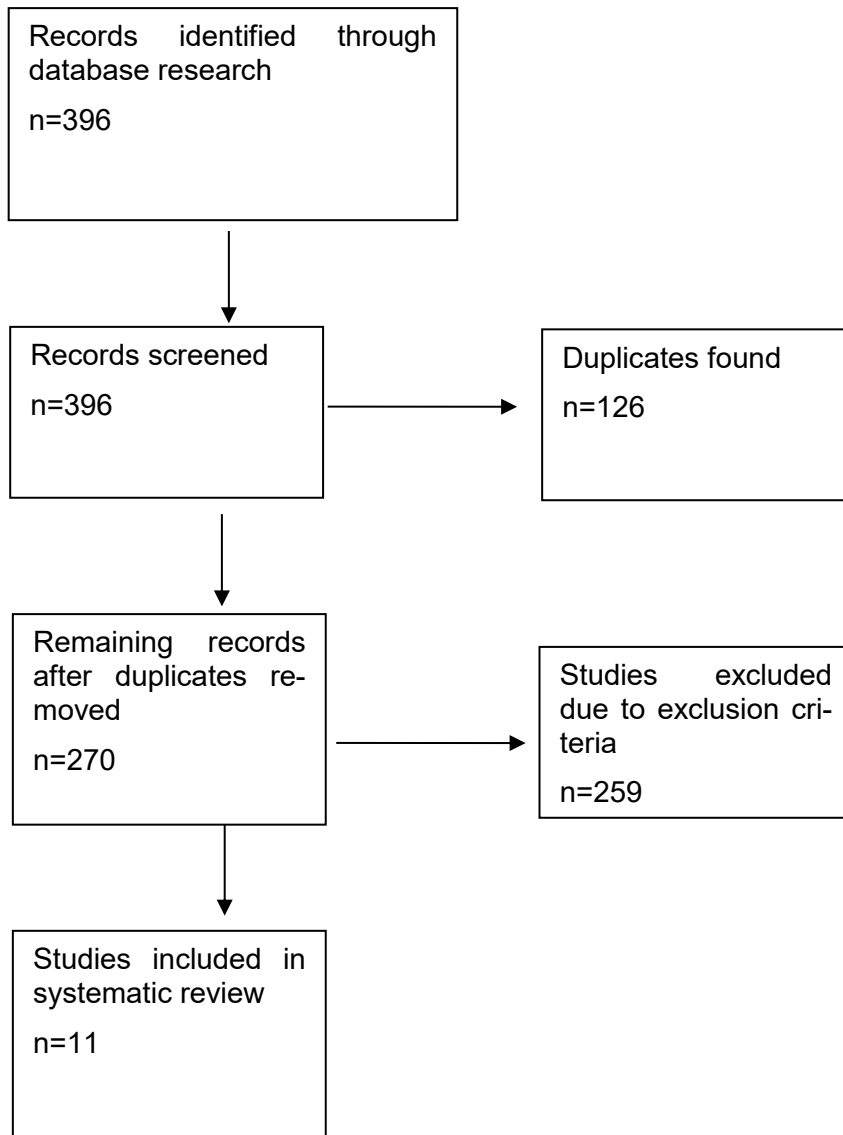


Abbildung 4: *Flow Chart Prisma*

Im Kapitel 4.1 wird eine Tabellenübersicht an Studien bereitgestellt, welche alle Einschlusskriterien erfüllten und somit auch in die Diskussion aufgenommen wurden. Diese Tabelle beinhaltet insgesamt 13 Studien, von welchen jede einzelne eine Korrelation zwischen Koffein und Mehrfachwiederholungsmaxima untersucht. Das Flow Chart Prisma beschreibt, wie viele Studien in den unterschiedlichen Datenbanken zur näheren Betrachtung herangezogen wurden. Dadurch, dass keine Studien, welche weibliche Testpersonen beinhalten, in diese Übersichtsarbeit aufgenommen wurden, erwies sich die Literaturrecherche als schwierig und fiel im Endeffekt sehr klein aus.

## 4.1 Studienübersicht

Tabelle 6: Studienübersicht

| Study (Year)            | Subjects (n)             | Dose                                 | Protocol   | Findings                      | Supplementation vs. Placebo   | RPE (Rate of perceived exertion) / Level of significance         |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--|-------------------------------|---|--|
| Silva et al. (2015)     | 14 well trained athletes | 5mg/kg BW CAFF or PLAC               | 3 Sets BP & LP at 80% of 1 RM                    | ↑ Reps BP<br>↑ Reps LP        | Reps (M=30.00±1.87) vs. PLAC (M=26.86±1.74) in BP<br>Reps (M=47.64±4.69) vs. PLAC (M=40.0±4.22) in LP | No differences, p=0.027 for BP vs PLAC<br>p=0.009 for LP vs PLAC |
| Duncan & Oxford (2011)  | 13 trained athletes      | 5mg/kg BW CAFF or PLAC               | 1 Set BP at 60% of 1 RM                          | ↑ Reps BP                     | Reps (M=22.4±3.0), CAFF vs. PLAC (M=20.4±3.4)   | No differences, p=0.031 vs. PLAC                                 |
| Duncan et al. (2012)*   | 13 trained athletes      | 179mg CAFF or PLAC                   | 1 Set BP, DL, BS, Prone Row at 60% of 1 RM – RTF | ↑ Reps BP, DL, BS & Prone Row | Reps Energy Drink (M=20.1±6.3)<br>Reps PLAC (M=18.6±5.6)  | RPE ↑ in PLAC<br>p = 0.015 for total reps vs. PLAC               |
| Eckerson et al. (2013)* | 17 trained men           | 160mg CAFF+TAU<br>160mg CAFF or PLAC | 1 Set BP at 70% of 1 RM                          | No Effects / No Findings      | Reps CAFF (M=14±2)<br>Reps PLAC (M=14±2)<br>Volume load CAFF (M=1164.14±147.03kg)                     | p=0.63<br>No data for changes of RPE                             |

| Author (Year)              | Participants              | Intervention   | Protocol  | Results  | Volume load  | Other Findings   |
|----------------------------|---------------------------|--|---|--|--|--|
| Hudson (2008)              | 15 trained men            | 10mg/kg BW Aspirin<br>6mg/kg BW CAFF or PLAC   | 4 Sets LE & AC at 12 RM - RTF                                 | ↑ Reps in LE with CAFF; No Effect on AC; No effect with Aspirin  | Volume load PLAC.<br>(M=1141.46±193.41kg)  | Total reps in CAFF were higher compared to PLAC & Aspirin<br>RPE ↑ with Aspirin compared to CAFF |
| Astorino (2007)            | 22 resistance trained men | 6mg/kg BW CAFF or PLAC   | BP & LP at 60% of 1 RM → RTF                                  | No Significance between CAFF & PLAC  | Reps CAFF (M=19.9±4.3);<br>Reps PLAC (M=18.4±4.0);<br>Reps CAFF LP (M=23.9±13.0);<br>Reps PLAC LP (M=22.5±11.0)  | RPE similar in CAFF & PLAC<br>P>0.05   |
| Astorino (2011)            | 14 resistance trained men | 6mg/kg BW CAFF or PLAC   | 4 Sets of BP, LP, Row, Shoulder Press at 70-80% of 1 RM → RTF | Similar total weight lifted across treatment.  | CAFF (M=2685.5±154.7 kg vs. PLAC (M=2573.8±161.2) on BP Performance  | No data for RPE<br>No data in changes of level of significance                                   |
| Richardson & Clarke (2016) | 9 resistance trained men  | 0.15g/kg COF<br>0.15g/kg DEC<br>0.15mg/kg DEC+5 mg/kg AH CAFF (D+C),<br>5mg/kg BW CAFF or PLAC | Squat + Bench Press @60% of 1 RM to Failure                   | Total weight in Squat ↑ in D+C compared to DEC, PLAC.<br>Total weight in COF ↑ than PLAC. No differences between COF & DEC | Reps COF (M=17±5);<br>Reps DEC (M= 14±5);<br>Reps D+C (M=18±5);<br>Reps CAFF (M=15±5);<br>Reps PLAC (M=13±4) in the Squat condition;<br>Reps COF (M=13±2);<br>Reps DC (M=12±2);<br>Reps D+C (M=12±3);<br>Reps CAFF (M=13±2);<br>Reps PLAC (M=12±2) in the BP condition | No differences in RPE<br>p>0.01  |

No differences in BP

|                       |                           |                        |  |  |   |   |
|-----------------------|---------------------------|------------------------|--|--|---|---|
| Davis et al. (2012)   | 10 resistance trained men | 6mg/kg BW CAFF or PLAC | 6 exercises (BP, LatPull, MP, AC, Triceps Push, LP), 4 sets/ exercise. 10 RM RTF | No significant effect in Total Repetitions<br>Post Hoc -> BP ↑<br>Reps in CAFF | Reps for CAFF with the fourth set of bench press (M=5.2±1.4);<br>Reps PLAC (M=3.7±1.3)  | RPE in Triceps Push ↑ than all other excercises.<br>p=0.24 for total reps of all excercises                               |
| Cook et al. (2012)    | 16 trained Rugby Players  | 4mg/kg BW CAFF or PLAC | 4 sets of BP, BS & bent Rows @ 85% of 1 RM+SD vs. NSD                            | Caff increased voluntary workload  | NSD CAFF BP p=0.039; BS p=0.0122; Bent Rows p=0.0249; total workload p=0.003 vs. NSD PLAC; SD CAFF BP p=0.0023; BS p=0.0004 Bent Rows p=0.0043 vs. SD PLAC. | No data for changes in RPE<br>No data for changes of level of significance  |
| Salatto et al. (2018) | 15 resistance trained men | 800mg CAFF or PLAC     | 3 Sets of BP RTF (classic, incline, dumbbell) @ 80% of 1 RM                      | Increase of repetitions in classic and incline. Decrease in dumbbell           | Reps CAFF Classic BP (M=4.80±2.66); PLAC (M=4.42±2.56).<br>Reps CAFF Incline BP (M=4.91±2.29); PLAC (M=4.36±2.11);  | p=0.0032 for Classic BP between CAFF and PLAC.<br>p=0.018 for Incline BP between CAFF and PLAC<br>p=0.433 for Dumbbell BP |

Reps CAFF DB BP between CAFF  
(M=6.91±3.47); and PLAC  
PLAC  
(M=7.16±3.37)

---

RTF = Repetitions to failure; RPE = Rate of perceived exertion; CAFF = Caffeine; COF = caffeinated coffee; DEC = decaffeinated coffee; AH CAF = anhydrous coffee; PLAC = Placebo; BP = Bench Press; LE = Leg Extension; AC = Arm Curl; DL = Deadlift; BS = Back Squat; RM = Repetition Maximum; SD = sleep deprived; NSD = not sleep deprived

\*Energy Drink

## 4.2 Testergebnisse

Eine sorgfältig durchgeführte Literaturrecherche zum Thema Koffein und Mehrfachwiederholungsmaxima zeigt, dass sich die Wissenschaft in einigen Bereichen uneinig ist. Alle in der Tabelle 4 präsentierten Abhandlungen beleuchten den Zusammenhang von Koffein mit Mehrfachwiederholungsmaxima im Krafttraining. Bis auf eine Studie (Richardson & Clarke, 2016) verfügen alle über ein randomisiertes, doppelblindes Crossover Design. Bei dieser Form des Studiendesigns wissen weder TesterIn noch Proband, welche Substanz vor der Testung verabreicht wurde (Koffein oder Placebo). Richardson & Clarke (2016) verwenden jedoch auch ein Crossover Design, in welchem nur die Probanden unwissend sind. Die Koffeindosis wurde in allen Studien innerhalb 45 Minuten und 1h vor der Testserie eingenommen. Die Breite der Dosis reichte von 3mg/kg Körpergewicht bis 9mg/kg Körpergewicht. Im Mittel wurden rund 5mg/kg Körpergewicht verabreicht. Die Koffeineinnahme selbst bestand aus Koffeinkapseln, koffeinhaltigen Getränken und normalem Haushaltskaffee. Koffeinhaltige Getränke in Form von Energy Drinks wurden in zwei der insgesamt 11 Studien verabreicht (Duncan, Smith, Cook & James, 2012; Eckerson et al., 2013). Das Besondere an dieser Studie war, dass die Koffeinmenge unabhängig vom Körpergewicht verabreicht wurde. 10 von 11 Abhandlungen beschäftigen sich unter anderem mit Mehrfachwiederholungsmaxima im Bankdrücken (Silva et al., 2015; Duncan & Oxford, 2011; Duncan et al., 2012; Eckerson et al., 2013; Astorino et al., 2007; Astorino, Martin, Schachtsiek, Wong, & Ng, 2011; Richardson & Clarke, 2016; Davis et al., 2012; Cook, Beaven, Kilduff, Drawer, 2012; Salatto, Arevalo, Brown, Wiersma & Coburn, 2018). Ein weiterer Bewegungsablauf, der von einigen ForscherInnen herangezogen wurde, ist die Kniebeuge (Richardson & Clarke, 2016; Cook et al., 2012) und die Beinpresse (Silva et al., 2015; Astorino et al., 2007; Astorino et al., 2011; Davis et al., 2012). Hudson, Green, Bishop & Richardson (2008) verwendeten in ihrem Studiendesign Ruderzüge, Armbeuger/-strecker-Übungen, Lat-Züge, sowie Schulterdrücken und Kreuzheben wurden auch ins Studiendesign integriert (Davis et al., 2012; Cook et al., 2012; Astorino et al., 2011; Hudson et al., 2008; Duncan et al., 2012). 9 von 11 Studien geben einen Intensitätsbereich von 60-85% des Einwiederholungsmaximums an, was laut Schoenfeld, (2010) den Bereich der Muskelquerschnittsvergrößerung angibt. Zwei der 11 Studien ließen die Probanden ihr Mehrfachwiederholungsmaximum finden und RTF (repetitions to failure) durchführen. Die Anzahl an Studienteilnehmer variiert zwischen 9 (Minimum) und 22 (Maximum) Personen. Insgesamt werden die Ergebnisse von 158 Studienteilnehmern berücksichtigt und ausgewertet. Im Schnitt liegt die Teilnehmerzahl bei 14 Personen pro Studie. Bei insgesamt 39 von 158 Personen konnten keinerlei positive Ergebnisse erzielt werden.



Die Studien von Astorino et al. (2007) und Eckerson et al. (2013) konnten keinerlei positive Effekte von Koffein auf die Leistungsfähigkeit feststellen. Die Teilnehmeranzahl gehörte mit 17 (Eckerson et al., 2013) und 22 (Astorino et al., 2007) Personen zu den Studien mit den meisten Probanden. Sie machten ca. 24,6% aller Teilnehmer aus. Die anderen 75,6% der Teilnehmer konnten niedrig bis hohe positive Effekte durch Koffein auf die Leistungsfähigkeit ermitteln.

Silva et al. (2015) testeten 14 mäßig trainierte Männer (mindestens 1 Jahr Erfahrung im Krafttraining, 18 - 25 Jahre alt), welche entweder 5mg/kg Körpergewicht Koffein oder ein Placebo eine Stunde vor der Untersuchung einnahmen. Die Testbatterie setzte sich aus 3 Sätzen Bankdrücken und 3 Sätzen Beinpresse bei 80% des gemessenen Einwiederholungsmaximum zusammen. Dabei wurden ganze Wiederholungen und das bewegte Gesamtgewicht am Ende jedes Satzes bestimmt. Das Ergebnis der Koffein-Einnahme resultierte in einer erhöhten Anzahl an Wiederholungen bis zur vollständigen Ermüdung im Bankdrücken und in der Beinpresse im Vergleich zum Placebo. Die Summe der durchgeführten Wiederholungen in den 3 Sätzen war beim Bankdrücken um 11,6% und in der Beinpresse um 19,1% höher.

Bei Duncan & Oxford. (2011) nahmen 13 mäßig trainierte Männer teil, welche ebenfalls 5mg/kg Körpergewicht Koffein oder ein Placebo konsumierten. Getestet wurde 1 Satz Bankdrücken bei 60% des zuvor gemessenen 1RM (one-repetition-maximum). Das Ergebnis lautete, dass Probanden mehr Wiederholungen bis zum Muskelversagen vollendeten und insgesamt mehr Gewicht nach der Koffeinnahme im Vergleich zur Placebogruppe drückten.

Ein Jahr später konnte Duncan et al. (2012) in einer Koffeinstudie, welche mit Energy Drinks durchgeführt wurde, positive Effekte ermitteln. 13 mäßig trainierte Athleten, welche vor der Testung einen Energy Drink mit 179mg Koffein zu sich nahmen, absolvierten drei Übungen: Kreuzheben, Kniebeuge und vertikales Rudern. Die Ergebnisse führten zu mehr Wiederholungen in allen drei Übungen nach Koffein-Konsum.

Salatto et al. (2018) verzeichnete ebenfalls positive Studienergebnisse. In den verschiedenen Variationen der Übung Bankdrücken, der „incline“ (schräg), „classic“ (horizontal) und „dumbbell“ (Kurzhandeln) konnten 15 mäßig trainierte Männer bei „incline“ und „classic“ mehr Wiederholungen ausführen, nachdem sie 800mg Koffein zu sich nahmen. Interessanterweise verringerte sich die Leistung mit den Kurzhandeln.

Hudson et al. (2008) berichtete, dass sich die Wiederholungen in der Beinstrecker-Maschine erhöhten. Die 15 Teilnehmer nahmen entweder 10mg/kg Körpergewicht Aspirin,

6mg/kg Körpergewicht Koffein oder ein Placebo ein. Das Aspirin und Placebo zeigten keinerlei Wirkung. Allerdings konnten nach Koffeineinnahme mehr Wiederholungen in der Beinstrecker Maschine durchgeführt werden.

Astorino et al (2011) schrieb, dass 9 von 14 Probanden mehr Wiederholungen im Bank-, Schulterdrücken und Rudern nach einer Einnahme von 6mg/kg Körpergewicht Koffein durchführen konnten. Das bewegte Gesamtgewicht zwischen den Gruppen (Plac vs. Caff) war jedoch vermeintlich gering und konnte kein positives Signifikanzniveau erreichen.

4 Jahre zuvor untersuchte Astorino et al. (2007) 22 trainierte Männer, indem er ihnen auch 6mg/kg Körpergewicht Koffein oder ein Placebo verabreichte. Nach der Koffeineinnahme war das bewegte Gesamtgewicht im Bankdrücken und in der Beinpresse um 11 bzw. 12 % höher, erreichte aber nicht das Signifikanzniveau um ein positives Ergebnis vorzuweisen.

Cook et al. (2012) untersuchte, neben dem Einsatz von 4mg/kg Körpergewicht Koffein oder Placebo, einen zusätzlichen Parameter. Seine Probanden wurden in zwei Gruppen geteilt: Eine Gruppe wird unter Koffein/ Placebo Einnahme und Schlafmangel untersucht. Die andere unter Koffein/ Placebo Einnahme und keinem Schlafdefizit. Das Ergebnis lieferte eine erhöhte Leistung unter Einfluss von Koffein. Schlafmangel erhöhte diesen Effekt.

Richardson & Clarke, (2016) berichteten, dass normaler Kaffee und entkoffeinierter Kaffee in Kombination mit Koffein Kapseln, die Leistungsfähigkeit im Bereich der Mehrfachwiederholungsmaxima steigern. Sie testeten neun erfahrene Kraftsportler und verabreichten unterschiedliche Mittel und Dosierungen. Kaffee als Getränk, mit und ohne Koffein, entkoffeinierter Kaffee in Kombination mit Koffein-Kapseln, nur Koffein-Kapseln oder ein Placebo. Die Ergebnisse zeigten, dass durch die Koffein Interventionen ein höheres Gesamtgewicht in der Kniebeuge, im Vergleich zum Placebo, erreicht werden konnte. Im Bankdrücken zeigten sich keine signifikant positiven Veränderungen in den Wiederholungen.

Eckerson et al. (2013) testete 17 trainierte Personen im Bankdrücken nach Einnahme eines Energy Drinks. Vor der Testung nahmen die Testpersonen einen 500ml zuckerfreien Energy Drink (160mg Koffein+ 2000mg Taurin), ein 500ml zuckerfreies Koffeingetränk (160mg) oder ein Placebo zu sich. Das Ergebnis lautete, dass weder der zuckerfreie Energy Drink noch das Koffeingetränk und die Placebo Lösung einen Einfluss auf die Leistung im Bankdrücken haben.

Um Koffein auf seine Wirksamkeit zu überprüfen ließ Davis et al. (2012) seine Probanden ein Ganzkörpertraining durchlaufen. Sechs Übungen zu je vier Sätzen unter Koffein Einfluss (6mg/kg Körpergewicht) oder einem Placebo sollten durchgeführt werden. Erst in der post-hoc-Analyse zeigte sich eine signifikante Leistungsverbesserung im letzten Satz Bankdrücken bei der Koffein Intervention.

## 4.3 Diskussion

Koffein und dessen Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit im Bereich der Mehrfachwiederholungen exakt zu bestimmen, zeigt sich als eine Herausforderung für die Sportwissenschaft. Fragen, welche teilweise beantwortet scheinen, werfen wieder neue Fragen auf. Die neurophysiologische Wirkung von Koffein innerhalb der Zellen ist laut der aktuellen Studienlage nachvollziehbar. Was auf Zellebene stattfindet, wurde in mehreren Studien belegt. (Graham, 2001; Nehlig, Daval & Debry, 1992). Chemische Prozesse können genau gemessen werden und geben Aufschluss darüber, wie Koffein mit verschiedenen Rezeptoren reagiert. Eine genauere Ausführung würde den Rahmen dieser Arbeit in weitem Ausmaß übersteigen. Die aktivierende Wirkung des ZNS durch Koffein könnte im Krafttraining zu mehr Wiederholungen in einem bestimmten Intensitätsbereich beitragen. Durch eine höhere mechanische Belastung und ein höheres absolutes Gewicht (Summe aller Wiederholungen, aller Sätze) wird der Muskel mechanisch stärker belastet und der Hypertrophie-Effekt zeigt sich durch eine Muskelquerschnittsvergrößerung (Schoenfeld, 2010). In der physikalischen Rehabilitation wird ein Muskelwachstum, neben der Wiederherstellung der körperlichen Funktionalität, als ein primäres Ziel definiert. Verletzungsprophylaktisch dient eine starke ausgeprägte Muskulatur um vor äußerlich einwirkenden Kräften zu schützen (Wonisch et al., 2017). Obwohl die physiologische Wirkungsweise von Koffein theoretisch bewiesen wurde, liefern einige Krafttrainings-Studien negative oder nicht ausreichend positive Ergebnisse (Eckerson et al., 2013; Astorino et al., 2007). Insgesamt 158 trainingserfahrene Testpersonen in elf Studien wurden unter Koffein bzw. einem Placebo aufgefordert, eine maximale Anzahl an Wiederholungen mehrerer ausgewählter Übungen durchzuführen. Es zeigt sich, dass keine Studie ein exakt identes Protokoll zur Untersuchung anwendet. Alle wissenschaftlichen Publikationen, welche sich mit Mehrfachwiederholungsmaxima beschäftigen, unterscheiden sich voneinander. Dosis, Intensität, Übungsauswahl, Trainingsstatus der Teilnehmer und deren Koffeinverträglichkeit sind dafür ausschlaggebende Parameter. Astorino, Terzi, Roberson & Burnett (2010) verfassten einen ähnlichen Überblicksartikel, in welchem allgemein eine Korrelation zwischen Koffein und sportlicher Aktivität untersucht wird. Die Ergebnisse zeigten, dass 54-65% der überprüften Studien eine Leistungssteigerung durch Koffein berichteten. Neben Teamsportarten und kurzzeitige maximale Sprints wurden auch Einwiederholungsmaxima in den Übersichtsartikel aufgenommen. Eine interessante Studie ist jene von Salatto et al. (2018). Die Koffeindosis ist um einiges höher im Vergleich zu jenen der anderen Autoren. Unter anderem bekommt jeder Proband, unabhängig von seinem Körpergewicht, 800mg Koffein. Alle anderen Studien relativieren die Dosis und beziehen sich auch auf das Körpergewicht der Probanden. Auch

jene Studien, welche Energy Drinks verwenden, verabreichten eine absolute Dosis. Salatto et al. (2018) sticht mit der Dosierung von 800mg deutlich hervor. Salatto et al. (2018) nahm an, dass die Dosis, welche benötigt wurde um leistungssteigernde Effekte nachzuweisen, höher sein kann, wenn die Testung auf mehr Übungen und Sätzen ausgedehnt wird. Auffallend ist, dass bei den meisten Studien Oberkörperdrückbewegungen durchgeführt wurden. Bankdrücken sticht eindeutig als beliebteste Übung zur Leistungsmessung hervor (Silva et al., 2015; Duncan & Oxford, 2011; Duncan et al., 2012; Eckerson et al., 2013; Astorino et al., 2007; Astorino et al., 2011; Richardson & Clarke, 2016; Davis et al., 2012; Cook et al., 2012; Salatto et al., 2018). Gefolgt von der Beinpresse und Kniebeugen (Richardson & Clarke, 2016; Cook et al., 2012; Silva et al., 2015; Astorino et al., 2007; Astorino et al., 2011; Cook et al., 2012). Es ist kein Zufall, dass bewusst das Bankdrücken herangezogen wurde um eine vergleichbare Basis zu schaffen. Das Bankdrücken zur Überprüfung einer maximalen Kraftleistung ist von dessen Komplexität her einfacher als eine Kniebeuge, ein Kreuzhebeversuch oder ein Schulterdrückversuch. Das Bankdrücken zählt trotzdem, aufgrund erforderlicher koordinativer Fähigkeiten, zu den Ganzkörperübungen. Das Überblicksergebnis zeigt, dass 5 von 10 Studien, welche Bankdrücken ins Studiendesign aufgenommen haben, positive Ergebnisse in Form einer signifikanten Leistungssteigerung durch Koffein berichten können. Eckerson et al. (2013) wollte eine Korrelation zwischen Energy Drinks und Mehrfachwiederholungen zeigen. Als möglicher limitierender Faktor könnte wahrscheinlich die Dosis des Koffeins herangezogen werden. Der verwendete Energy Drink beinhaltete 160mg Koffein, was 2mg/kg Körpergewicht bei einem 80kg schweren Mann entspricht. Um den direkten Vergleich nochmals darzustellen: Salatto et al. (2018) verwendete 800mg Koffein. In der Abhandlung von Eckerson et al. (2013) wurde explizit aufgezeigt, dass Forbes et al. (2007) in der Lage war, positive Ergebnisse in einem ähnlichen Studiendesign zu zeigen. Dieser testete die Auswirkungen von einem 500ml Energy Drink auf die Leistungsfähigkeit im Bankdrücken bei 70% des 1 Wiederholungsmaximums. Der Grund, warum Forbes et al. (2007) in dieser Arbeit nicht explizit besprochen wurde ist, dass sowohl Männer als auch Frauen getestet wurden, das den Einschlusskriterien widerspreche. Bei Astorino et al. (2007) war die Dosis (6mg/kg) und Intensität (60% des 1RM) des Protokolls ähnlich wie bei anderen Autoren, welche jedoch positive Ergebnisse aufzeigen konnten. Astorino et al. (2007) führte die Ergebnisse auf die Studienteilnehmer zurück. „Es sei notwendig, eine größere Stichprobe, welche sich weniger in ihrer Körpermasse, Koffeineinnahme und Trainingsstatus unterscheiden, zu testen“, war die Schlussfolgerung. Davis et al. (2012) beklagte ebenfalls, dass das Testdesign mit ihren Probanden im Allgemeinen keine Signifikanz aufwies. Post hoc wurde nur der vierte Satz im Bankdrücken mit mehr Wiederholungen gemessen. Davis et al. (2012) wollte die Untersuchung so praxisnahe wie möglich aussehen lassen. Es wurden 6 Übungen zu jeweils 4

Sätzen gewählt, was einer Gesamtsatzzahl von 24 Sätzen entspricht. Die Stichprobe (n=10) erhielt dafür 6mg/kg Körpergewicht Koffein oder ein Placebo. Bis auf den genannten vierten Satz im Bankdrücken lieferten alle anderen Übungen/Sätze keine positiven Auswirkungen nach einer Koffeineinnahme. Richardson & Clarke (2016) testeten fünf verschiedene Koffeinprotokolle an fünf Tagen. Normaler Haushaltskaffee, koffeinfreier Kaffee, Koffeintabletten und Placebos wurden den Probanden in verschiedensten Kombinationen zugeführt. Die Placebo Testung schnitt dabei am schlechtesten ab. Die besten Ergebnisse konnten eine Kombination aus koffeinfreiem Kaffee und Koffeintabletten zeigen. Astorino et al. (2011) verzeichnete teilweise positive Erfolge, verwies aber in der Publikation trotzdem auf die „Caffeine Non-Responder“ (Personen, welche aus physiologischen Gegebenheiten nicht auf den aufmunternden Effekt des Koffeins reagieren). Das Studiendesign von Astorino et al. (2011) ähnelt dem von Duncan & Oxford (2011), welcher aber weniger Koffein und Intensität in sein Studiendesign einarbeitete. Die Frage, ob ein Unterschied der Koffeindosis von 1g/kg und ein Unterschied des Intensitätsbereiches von 10-20% des 1RM automatisch zu einer Veränderung der Ergebnisse der durchgeführten Studien führen würde oder ob Astorino et al. (2011) mit seiner Annahme der „Non-Responder“ recht behält, bedarf weiterer Nachforschungen. Würde man diese Annahme der Koffeinabweichung von 1g/kg nachgehen, so wären das 80mg bei einer 80kg schweren Person. Diese 80mg entsprächen einer 250ml Dose Red Bull. Diese geringe Abweichung der Koffeindosis, könnte maßgeblich daran beteiligt sein, wie Koffein die physiologischen Prozesse beeinflusst.

The response to caffeine and the potency of the effects of caffeine seem to be multifaceted. Caffeine habituation, metabolism of caffeine, method of caffeine ingestion, caffeine dosage, training status, and timing of caffeine ingestion have all been identified as having an effect on the ergogenicity of caffeine. Similarly, oral contraceptives, pregnancy, ethnicity, age, and smoking have all been suggested to affect the metabolism of caffeine [51]. Genetic variation in specific genes, namely CYP1A2 (rs762551) and ADORA2A (rs5751876), have also been suggested to have a significant effect on the responses to caffeine ingestion and the metabolism of caffeine. (Southward, Rutherford-Markwick, Badenhorst & Ali, 2018, S. 3)

Southward et al. (2018) bestätigen in ihrem Artikel, dass die Effektgröße, mit der Koffein auf den Körper einwirken kann, von vielen verschiedenen Faktoren abhängt. Der aufmunternde Effekt von Koffein scheint individueller zu sein als bisher angenommen.

This will be more useful to the end users such as coaches and athletes who need to know what the ergogenic effects of caffeine are likely to be, based on their particular combination of CYP1A2, AHR, ADORA2A, and ADORA1A genotypes. (Southward et al., 2018, S. 7)

Southward et al. (2018) weist darauf hin, dass die genetische Zusammensetzung des Individuums ausschlaggebend für die leistungssteigernde Wirkung von Koffein ist. CYP1A2 und ADORA2A sind Gene, von welchen man weiß, dass sie den höchsten Einfluss auf die Leistungssteigerung durch Koffein besitzen. AHR ist mitverantwortlich, das zugeführte Koffein zu metabolisieren und CYP1A2 zu unterstützen. ADORA1A ist jenes Gen, welches unter Koffeineinfluss unseren Schlaf stört und das Wachheitsgefühl verstärkt. Gleich der Ermüdung, könnte auch Koffein eine Substanz sein, welche multifaktoriell abhängig ist. Die genetische Zusammensetzung des Individuums, die bisweilen aufgebaute Koffeinresistenz, die zu benötigende Dosis um die gewünschten Effekte zu erzielen, sind Rahmenpunkte von unglaublich wichtiger Bedeutung. Eine erfolgreiche Supplementation muss diese Punkte im richtigen Maß bestimmen und korrekt anwenden.

Durch die direkte Gegenüberstellung der diskutierten Studien kann nun versucht werden klarzustellen, warum einige Studien ein besseres Studienergebnis liefern konnten als andere. Wie bereits erwähnt, wurden die Eckpunkte, welche die Einschlusskriterien vorgaben, von allen Studien erfüllt. Punkte, in denen sich die einzelnen Studien voneinander unterscheiden waren die verabreichte Menge an Koffein, der Intensitätsbereich und der durchzuführende Bewegungsablauf. Da bereits in der aktuellen Studienlage (Kapitel 3) ausführlich verschiedene Bewegungsabläufe diskutiert wurden, kann angenommen werden, dass es nicht von der Übungsauswahl abhängt, ob Koffein die gewünschte Wirkung erzielt. Koffein wirkt im Gehirn, welches direkt über motorische Bahnen mit den Muskeln verknüpft ist und die Bewegung steuert. Das Argument, dass Koffein keine signifikante Verbesserung bei der Kniebeuge zeigt, jedoch im Bankdrücken außerordentlich positive Ergebnisse liefert, ist somit neutralisiert. Da das Bankdrücken in fast jeder Studie durchgeführt wird, kann nun ein direkter Vergleich über die verabreichte Koffeindosis aufgestellt werden. Silva et al. (2015), Duncan et al. (2011) und Richardson & Clarke (2016) verwendeten 5 Milligramm pro Kilogramm Körpergewicht Koffein um eine Leistungsverbesserung zu erzielen. Alle drei Publikationen testeten dazu die maximalen ausführbaren Wiederholungen im Bankdrücken. Silva et al. (2015) bei 80% des Einwiederholungsmaximums, Duncan et al. (2011) bei 60% des Einwiederholungsmaximums und Richardson & Clarke (2016) bei 60% des 1RM. Die Studienteilnehmeranzahl war bei Silva et al. (2015) und Duncan et al. (2011) mit 13 und 14 Personen sehr ähnlich. Richardson und Clarke (2016) hatten 9 Probanden. In den Studien

von Silva et al. (2015) und Duncan et al. (2011) konnten die Probanden unter Koffein signifikant mehr Wiederholungen ausführen als unter der Placebo Kondition. Bei Richardson & Clarke (2016) wurden im Bankdrücken keine Unterschiede im Vergleich zum Placebo festgestellt. In der Kniebeuge hingegen sprachen die Resultate für das Koffein, nachdem in der Analyse das Signifikanzniveau überschritten wurde. Grundsätzlich konnte somit jede Studie (teilweise) positive Ergebnisse feststellen. Ein Punkt, der jedoch nicht aus den Augen gelassen werden sollte, sind die Rahmenbedingungen, an welche sich die Testpersonen während den Untersuchungen zu halten hatten. Festgelegt wurden neben Zeiten und Mengen von alltäglichen Koffeinnahmen, auch ernährungstechnische Regeln. Silva et al. (2015) legte den Probanden nahe, Koffein, Alkohol und schwere körperliche Anstrengung 24 Stunden vor der Testung zu vermeiden. Die maximale Koffeinnahme durfte bei 250mg/ Tag liegen. Bei Duncan et al. (2011) war es, was die Koffeinabstinenz betrifft, sogar 48h und eine maximale Koffeinnahme von 169-250mg/ Tag. Richardson & Clarke (2016) hingegen meinten 12h vor der Testung keine koffeinhaltigen Produkte zu verzehren. Das Argument dafür war das die Halbwertszeit von Koffein zwischen 1,5h und 9h liegt. Die Probanden gaben allerdings auch an  $241 \pm 122$ mg Koffein/ Tag zu sich zu nehmen, was in Relation zu Silva et al. (2015) und Duncan et al. (2011) extrem hoch ist. Da Richardson & Clarke (2016) nur 9 Testpersonen in ihrer Arbeit erwähnen, könnte das Gesamtergebnis der Studie theoretische durch die aufgebaute Koffeinresistenz einer oder zwei Personen gefährdet sein. Astorino et al. (2007), Astorino et al. (2011), Davis et al. (2012) und Hudson et al. (2008) verwendeten in ihren Publikationen 6mg/kg Körpergewicht Koffein. Die Probandenanzahl variierte allerdings sehr stark. Astorino et al. (2007) testete 22 Personen, vier Jahre später 2011 unterstützten 14 Probanden seine Forschung. Bei Davis et al. (2012) partizipierten 10 Personen und Hudson et al. (2008) konnte 15 trainierte Männer rekrutieren. Der direkte Vergleich der Studienergebnisse zeigt, dass mäßig bis keine Effekte in allen vier Untersuchungen stattfanden. Ein genauerer Blick auf die Testpersonen bei der Arbeit von Hudson et al. (2008) zeigte, dass die Rahmenbedingungen klar definiert wurden. 24h vor der Testung durfte weder Koffein noch Alkohol aufgenommen werden und die Probanden mussten darauf achten, vor jeder Testung dieselbe Mahlzeit zu konsumieren. Die Koffeinnahme der Testpersonen vor der Untersuchung musste zwischen 100 und 400mg liegen, was mithilfe eines Fragebogens eruiert wurde. Dieselben Bedingungen wurden auch in der Studie von Astorino et al. (2007) festgelegt. Die Koffeinabstinenz wurde sogar auf 48h erhöht und intensive körperliche Belastung durfte 24h vor der Testung nicht mehr ausgeführt werden. Die Testpersonen konsumierten im Durchschnitt 110,5mg Koffein pro Tag, bei einer Standardabweichung von  $\pm 152,3$ mg. Die minimale Koffeinnahme betrug 0mg. Das Maximum wurde bei 600mg gemessen. In der Studie von Astorino et al. (2011) konsumierten die Versuchsteilnehmer im Mittel  $218,2 \pm 28,1$ mg pro Tag. Ein Minimum 120mg bis

zum Maximum von 500mg Koffein konnte mittels Fragebogen ausgewertet werden. Die vierte Studie, welche mit 6mg/kg Körpergewicht testete, Davis et al. (2012), erklärte in seiner Abhandlung, dass alle Teilnehmer, außer einem, <200mg Koffein pro Tag zu sich nahmen. Wobei die Hauptquelle für Koffein Energy-Drinks, Limonaden und Kaffee waren. Dies wurde durch einen Fragebogen ermittelt. Das Mittel und die Standardabweichung betragen  $103\pm 81$ mg/ Tag. Hudson et al. (2008) konnte in der Beinstrecker Maschine unter Koffeinfluss mehr Wiederholungen feststellen. Das durchschnittliche Gewicht der Personen war rund 78kg. Bei einer herkömmlichen Koffeinnahme von 400mg pro Tag wären das rund 5mg/kg KG. Die Untersuchung fand mit 6mg/kg KG statt. Dies könnte ein Ansatz sein, warum es zu einer Leistungssteigerung kam. Astorino et al. (2007) konnte in seiner Studie mit 22 Versuchsteilnehmern keine signifikant positiven Ergebnisse gegenüber des Placebo-Versuchs feststellen, obwohl das bewegte Gesamtgewicht im Bankdrücken um 11% höher war. Die Koffeinnahme der Probanden reichte von 0-600mg pro Tag, im Schnitt lag sie bei  $110\pm 152,3$ mg. Das durchschnittliche Gewicht lag bei 82,5kg. Die Personen, welche zwischen 300 und 600mg Koffein pro Tag konsumierten, verabreichten sich selbst eine tägliche Dosis zwischen 3,6 & 7,2mg pro Kilogramm Körpergewicht. Wie viele Personen tatsächlich in diese Spannbreite des Konsums fallen, wurde nicht beschrieben. Die Hypothese, dass die täglich aufgenommene Koffeindosis eine gewisse Toleranz aufbaut, ist nichts Neues und wurde schon von Burke et al. (2013) genau erklärt. Bei Astorino et al. (2011) fällt der tägliche Koffeinkonsum der Probanden relativ berechnet auf 2,6mg/kg Körpergewicht. Das Minimum beträgt 1,4mg und das Maximum 5,9mg/kg Körpergewicht. Wendet man denselben Rechenvorgang bei Davis et al. (2012) an, ergibt sich eine mittlerer Koffeinkonsum von 1,1mg/kg. Die Spannbreite reicht von 0 – 2mg/kg Körpergewicht. Da in der Studie 6mg Koffein verabreicht wurden und bei Davis et al. (2012) trotz dieser schon sehr niedrigen Koffeinemengen keine Leistungsverbesserungen aufzuzeigen sind (der Post Hoc Test ausgenommen), scheint sich das Gesamtbild wieder zu verzerren und die Wirkung von Koffein auf Mehrfachwiederholungsmaxima könnte wieder sehr stark angezweifelt werden. Das Argument, dass sich keine bis wenige Koffein-Responder in der Testgruppe befanden, wäre zu überprüfen. Die Publikationen von Cook et al. (2012) und Salatto et al. (2018) sind sehr unterschiedlich zu jenen, welche direkt miteinander verglichen werden konnten. Die Studie von Cook et al. (2012) enthält einen zusätzlichen Parameter den andere Studien nicht mitbringen. Dieser Parameter lautet Schlafentzug. Cook et al. (2012) testete die Wirkung von Koffein auf sozusagen ausgeschlafene Personen (>8h) und eine Versuchsgruppe deren Schlaf und Erholung ausblieb (<6h). Koffein wirkte auf beide Gruppen leistungssteigernd, Auf die <6-Stunden-Schlaf-Gruppe allerdings effektiver. Cook et al. (2012) schrieb: „*The diaries indicated that consumption of caffeine was equal to or less than 120 mg caffeine per day, with most participants not consuming caffeine on a daily basis.*“ Die tägliche Menge an



Koffein durfte 120mg nicht übersteigen. Konsumiert wurden während den Untersuchungen 4mg/kg KG. Das mittlere Gewicht der Probanden betrug 93 Kilogramm. Das entspricht einer maximalen Dosis von 1,2mg/kg Körpergewicht für den alltäglichen Gebrauch. Salatto et al. (2018) verzeichnete ebenfalls leistungssteigernde Erfolge unter der Koffein Bedingung. Mit rund 9mg/kg als relative Dosis liegt Salatto et al. (2018) an erster Stelle was die Koffeinemenge betrifft. Erwähnenswert und spannend sind auch die Studien von Eckerson et al. (2013) und Duncan et al. (2009). Diese testeten mit kommerziell erwerbbaaren Energy Drinks (Red Bull & Quick Energy) die Auswirkungen von Koffein auf Mehrfachwiederholungsmaxima. Beide Energy Drinks enthielten ungefähr dieselbe Menge an Koffein (160mg,179mg). Duncan et al. (2009) konnte positive Effekte mit Quick Energy erzielen, während Eckerson et al. (2013) keine Verbesserungen verzeichnen konnte. Der einzig nennenswerte Unterschied zwischen den beiden Versuchsgruppen von Duncan et al. (2009) und Eckerson et al. (2013) war die Trainingserfahrung ihrer Probanden. Die Versuchsgruppe von Eckerson et al. (2013) musste eine >6-monatige Trainingserfahrung besitzen, während bei Duncan et al. (2009) alle Studienteilnehmer eine  $9,5 \pm 5,5$  – jährige Trainingserfahrung aufweisen konnten. Eine im Anschluss aufgeführte Tabelle zeigt den Koffein Konsum der Probanden und die experimentellen Mengen in Relation zum Körpergewicht.

Tabelle 7: Participant review / relative caffeine dosis

| Study (Year)               | Subjects (n) | Bodyweight (kg) | Expérience (Years) | Daily Caffeine Use (mg) | Experimental Caffeine ingestion / mg/kg | Relative daily consume of Caffeine / mg/kg | Relative experimental caffeine ingestion / mg/kg |
|----------------------------|--------------|-----------------|--------------------|-------------------------|---|--|--|
| Silva et al (2015)         | 14           | 77.62±2.07      | >1                 | Max. ~250mg             | 5                                       | 3.2  | 388  |
| Duncan & Oxford (2011)     | 13           | No data         | 10.4±2.3           | 169–250mg / ~200mg      | 5                                       | No data                                    | No data  |
| Hudson et al. (2008)       | 15           | 78.6±9.6        | >8 weeks           | ~100–400mg              | 6                                       | 3.1  | 471  |
| Astorino et al. (2007)     | 22           | 82.5±13.6       | 6.0±2.8            | 110.5±152.3             | 6                                       | 0-3  | 495  |
| Astorino et al. (2011)     | 14           | 83.4±3.53       | 7.5 ±1.2           | 218.2± 28.1mg           | 6                                       | 2.6  | 500  |
| Richardson & Clarke (2016) | 9            | 84±8            | >1                 | 241±122mg               | 5                                       | 1.4-4.2                                    | 420  |
| Davis et al. (2012)        | 10           | 88.2±7.1        | 3-7                | 103± 81                 | 6                                       | 0-2  | 529  |

|                         |    |                   |         |             |     |                   |     |
|-------------------------|----|-------------------|---------|-------------|-----|-------------------|-----|
| Cook et al. (2012)      | 16 | 97±8 kg           | >2      | Max. ~120mg | 4   | 1.2               | 388 |
| Salatto et al. (2018)*  | 15 | 89.1±13.9         | >1      | Max. ~200mg | 800 | 2.2               | 800 |
| Duncan et al. (2012)*   | 13 | No data available | 9.5±5.5 | ~120-400mg  | 179 | No data available | 179 |
| Eckerson et al. (2013)* | 17 | 85.5±9.26         | >0.5    | Max. ~50mg  | 160 | 0.5               | 160 |

---

\*: Absolut values used in study design

Average Bodyweight of all subjects (n=132): 85,1kg

Average caffeine ingestion in experimantal condition: 433mg

Relative caffeine ingestion during experimental condition: 5,0mg/kg BW

## 4.4 Conclusio

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Koffein als leistungssteigernde Substanz im Krafttraining bei kurzen intensiven Muskelkontraktionen eingesetzt werden kann. Im Ausdauertraining oder bei Ausdauersportarten tendiert die aktuelle Studienlage zu Koffein um eine Leistungssteigerung zu erreichen. Im Krafttraining oder bei kurzzeitigen sub-/ maximalen Belastungen im anaeroben Energiestoffwechsel ist sich die Forschung uneinig. Es werden immer mehr Studien zu diesem Thema publiziert, jedoch ist die Kreativität bzw. das festgelegte Studiendesign der meisten WissenschaftlerInnen unterschiedlich. In diesem Review gibt es weitgehend Einigkeit darüber, welche Übung zur Leistungsüberprüfung bei Mehrfachwiederholungen eingesetzt wird.

Speziell bei Mehrfachwiederholungsmaxima müssen viele einzelne Parameter berücksichtigt werden. Letztendlich ausschlaggebend für eine Leistungssteigerung ist die Koffeindosis, der Einnahmezeitpunkt und die Koffeinresistenz des Einzelnen. Eventuell spielt der Trainings-Status der Versuchsperson auch eine entscheidende Rolle. Auch wenn der Placebo-Effekt die Wirkung von Koffein in einigen Studien dementiert, heißt dies nicht, dass Koffein nichts zu einer Leistungssteigerung beigetragen hätte. Dieses Ergebnis zeigt lediglich, dass der Placebo Effekt funktioniert und dass die Dosis, der Zeitpunkt der Einnahme und die Koffeinresistenz des Individuums sich von anderen unterscheiden. Placebo-Faktoren haben neurobiologische Ursachen und tatsächliche Auswirkungen auf Gehirn und Körper. Sie sind nicht nur Antwortverzerrungen. Andere Placebo-Reaktionen resultieren aus weniger bewussten Prozessen wie der klassischen Konditionierung bei Immun-, Hormon- und Atmungsfunktionen (Price, Finnis & Benedetti, 2008). Duncan, Lyons & Hankey (2009) präsentierten eine reine Placebo Studie, in welcher positive Ergebnisse nachgewiesen werden konnten. Die Probanden erhielten ein, wie sie glaubten, Koffein Supplement oder ein Placebo. Beide Stoffe waren Placebo Tabletten, ohne Inhaltsstoffe. Es konnten, im Glauben daran, dass sie Koffeintabletten einnahmen, mehr Wiederholungen durchgeführt werden. Koffein hat einen physiologisch nachgewiesenen Effekt auf den menschlichen Körper. Über das ZNS werden Ermüdungserscheinungen blockiert. Nicht alle Personen reagieren auf die gleiche Art und Weise auf dieselbe Dosis Koffein. Eine Frage, welche im Laufe der Recherche auftauchte, ist folgende: Wie wichtig ist das eingelagerte Muskelglykogen bei einer maximalen Ausbelastung? Ist die neuronale und periphere Ermüdung ein dämpfender Faktor obwohl die Muskulatur über ausreichend Ressourcen verfügt? Hypertrophie-Training besitzt eine Spanne von 6-12 Wiederholungen (Schoenfeld, 2010). Das Ziel dieser Trainingsmethode ist eine völlige Entleerung der Muskelglykogenspeicher, was ein Versagen einer bestimmten Bewegungsausführung entspricht. Der Ist-Zustand der getesteten Person spielt

eine entscheidende Rolle. Klar ist, dass ein Proband, der 1 Stunde vor der Testung Nahrung in Form von Zucker zu sich nahm, einen klaren Vorteil gegenüber einer nüchternen Person hat und ob diese Personen dieselbe Ausgangsposition bei der nachfolgenden Überprüfung aufweisen können. Es sollten, um die Objektivität zu bewahren, die getesteten Personen immer dieselbe Ausgangsposition vorweisen. Duncan et al. (2012), Cook et al. (2012), Astorino et al. (2011), Davis et al. (2012), Duncan & Oxford (2011), Eckerson et al. (2013), Hudson et al. (2008) wiesen ihre Probanden darauf hin, ihre normale Diät beizubehalten, bzw. vor jeder Testung dasselbe zu konsumieren. Auch der Wasserhaushalt wurde berücksichtigt und sollte über die gesamte Testdauer ungefähr gleich sein. Haff, Lehmkuhl, McCoy & Stone (2003) führen aus: „The literature reviewed suggests that muscle glycogen plays an important role as a substrate in high-intensity anaerobic exercise bouts such as resistance training.“ Haff et al. (2003) meinen in ihrem Übersichtsartikel, dass Kohlehydrate, in Form von Glukose, einen hohen Einfluss auf sportliche Leistung haben. Ein Punkt, welcher kritisch hervorgehoben werden sollte, ist die Verwendung der RPE-Skala. Die wahrgenommene Anstrengung sollte, egal welche Substanz getestet wurde, immer maximal sein. Bei Studien, welche RTF (Wiederholungen bis zum Muskelversagen) testeten, sollte der Anstrengungsgrad immer derselbe sein. Abschließend darf festgehalten werden, dass die Leistungsfähigkeit im Krafttraining im Bereich der Mehrfachwiederholungsmaxima durch Koffein positiv beeinflusst werden kann. Welche Dosis die richtige ist, muss individuell überprüft werden, es sollte jedoch die „normale“ Tasse Kaffee deutlich überschreiten. Zwischen 4mg/kg und 6mg/kg Körpergewicht können leistungssteigernde Effekte hervorgerufen werden, die Koffeinverträglichkeit und der Einnahmezeitpunkt spielen dabei eine entscheidende Rolle. Zudem scheint es, als würden die verschiedenen Intensitäten der Studiendesigns keine Rolle bei der Wirksamkeit von Koffein auf Mehrfachwiederholungen spielen. Eine genauere Betrachtung der Probandengruppen (Tabelle 7) zeigt, dass viele Studien mit der verabreichten Koffeindosis deutlich über der Gewohnheitsmenge liegen. Trotz der hohen Dosierung scheint eine Leistungssteigerung auszubleiben. Eine weitere These könnte also sein, dass der Trainings-Status des Probanden ausschlaggebend ist. Studien, in welchen der Trainings-Status höher war, verzeichneten (teilweise) positive Erfolge in der Koffein Kondition im Vergleich zu Placebo bei Mehrfachwiederholungsmaxima. Die letzte These, welche nicht unvergessen bleiben darf, ist die der „Responder“ und „Non-Responder“. Wie Southward et al. (2018) es in seiner Publikation formuliert, bedarf es mehrerer Faktoren als bisher angenommen, um die Wirkungen von Koffein im menschlichen Körper nachweisen zu können. So ist auch die genetische Prädestination ausschlaggebend um einen aufmunternden Effekt auszulösen.

Abschließend kann gesagt werden, dass sowohl Koffein, als auch die Ermüdung, multifaktoriell bedingt sind. Unterschiedliche Kenngrößen und Parameter sind davon abhängig. Die Wirkung von Koffein kann in der Theorie bei einer Mehrheit als leistungssteigernde Substanz nachgewiesen werden. Die Dosis sollte das Level der Gewohnheit überschreiten, jedoch in einem angebrachten Rahmen verabreicht werden. Körpergewicht und Koffeinresistenzen spielen eine wichtige Rolle um schlussendlich eine Leistungssteigerung zu erzielen. Sollte die individuelle genetische Voraussetzung jedoch nicht gegeben sein, ist eine Koffeinsupplementation wertlos. Dies müssen SpitzenathletInnen, HobbysportlerInnen und BreitensportlerInnen für sich selbst herausfinden.

## 5 Literaturverzeichnis

- Anselme F., Collomp K., Mercier B., Ahmaidi S. and Prefaut C., (1992). Caffeine increases maximal anaerobic power and blood lactate concentration. *European Journal of Applied Physiology Vol. 65*: 188-191.
- Asmussen E., (1979). Muscle fatigue. *Medicine and science in sports*. Vol. 11 (4), S. 313-321.
- Astorino T. A., Martin B. J., Schachtsiek L., Wong K., & Ng K., (2011). Minimal effect of acute caffeine ingestion on intense resistance training performance. *Journal of strength and conditioning research*. Vol 25 (6), S. 1752-1758
- Astorino T. A., Terzi M. N., Roberson D. W. & Burnett T. R. (2010). Effect of two doses of caffeine on muscular function during isokinetic exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise, Vol. 10*, S. 2205 – 2210.
- Astorino T. A., Rohmann R. L., Firth K. (2007). Effect of caffeine ingestion on one-repetition maximum muscular strength. *European Journal of Applied Physiology 102*, S. 127–132.
- Bahrke M. S., (2001). History of Doping in Sport. *International Sport Studies Vol. 24*(1)
- Beiglböck W. (2016). *Koffein. Genussmittel oder Suchtmittel?* Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bigland- Ritchie B., Rice C. L., Garland S. J., Walsh M. L., (1995). Task- dependent factors in fatigue of human voluntary contractions. Springer Science & Business Media New York.
- Boeiro D., Jubeau M., Zory R., Maffiuletti N. A., (2005). Central and peripheral fatigue after electrostimulation-induced resistance exercise. *Journal of the American college of sports medicine*. S. 973-978.
- Borg G. A. V. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise, Vol. 14*, No. 5, S. 377 – 381
- Burke L., Desbrow B., Spriet L. (2013). *Caffeine for Sports Performance*. Human Kinetics.
- Beck T. W., Housh T. J., Schmidt R. J., Johnson G. O., Housh D. J., Coburn J. W. & Malek M. H. (2006). The acute effects of a caffeine containing supplement on strength, muscular endurance, and anaerobic capabilities. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Vol. 20 (3), S. 506-510.
- Bell D. G., McLellan T. M. & Sabiston C. M., (2002). Effect of ingesting caffeine and ephedrine on 10-km run performance. *Medicine & Science in Sports Exercise Vol. 34*: 344-349, 2002

- Bridge C. A. and Jones M. A., (2006). The effect of caffeine ingestion on 8 km run performance in a field setting. *Journal of Sports Science Vol. 24:* 433-439.
- Bruce C. R., Anderson M. E., Fraser S. F., Stepto N. K., Klein R., Hopkins W. G. & Hawley J. A., (2000). Enhancement of 2000-m rowing performance after caffeine ingestion. *Medicine & Science in Sports Exercise Vol. 32:* 1958-1963.
- Carr A., Dawson B., Schneiker K., Goodman C. & Lay B., (2008). Effect of caffeine supplementation of repeated sprint running performance. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness Vol. 48:* 472-478.
- Collomp K., Ahmaidi S., Audran M., Chanal J. L. & Prefaut C., (1991). Effects of caffeine ingestion on performance and anaerobic metabolism during the Wingate test. *International Journal of Sports Medicine Vol. 12:* 439-443.
- Collomp K., Ahmaidi S., Chatard J. C., Audran M. and Prefaut C., (1992). Benefits of caffeine ingestion on sprint performance in trained and untrained swimmers. *European Journal of Applied Physiology Vol. 64:* 377-380.
- Cook C., Beaven C. M., Kilduff L. P., Drawer S. (2012). Acute Caffeine Ingestion's Increase of Voluntarily Chosen Resistance-Training Load After Limited Sleep. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, Vol. 22, S. 157 -164
- Cox G. R., Desbrow B., Montgomery P. G., Anderson M. E., Bruce C. R., Macrides T. A., Martin D. T., Moquin A., Roberts A., Hawley J. A. & Burke L. M., (2002). Effect of different protocols of caffeine intake on metabolism and endurance performance. *Journal of Applied Physiology Vol. 93:* 990-999.
- Crowe M. J., Leicht A. S. and Spinks W. L., (2006). Physiological and cognitive responses to caffeine during repeated, high-intensity exercise. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism Vol. 16:* 528-544.
- Davis J., Green M. J., Laurent M. C., (2012). Effects of caffeine on resistance training performance on repetitions to failure. *Journal of Caffeine Research*. Vol. 2, Nr. 1.
- Duncan M. J. & Oxford S. W. (2011). The Effect of caffeine ingestion on mood state and bench press performance to failure. *Journal of Strength and Conditioning Research* 25(1)/ S. 178–185.
- Duncan M. J., Smith M., Cook K. & James R. S. (2012). The acute effect of a caffeine-containing energy drink on mood state, readiness to invest effort, and resistance exercise to failure. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 26(10)/2858–2865.
- Duncan M. J., Lyons M. & Hankey J. (2009). Placebo Effects of Caffeine on Short-Term Resistance Exercise to Failure. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 4, S. 244-253.



- Enoka R. M. and Duchateau J. (2008). Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *J Physiol* 586.1, S. 11 – 23.
- Eckerson J. M., Bull A. J., Baechle T. R., Fischer C. A., O'Brien D. C., Moore G. A., Yee J. C. & Pulverenti T. S. (2013). Acute ingestion of sugar- free Red Bull Energy Drink has no effect on upper body strength and muscular endurance in resistance trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(8), S. 2248–2254.
- Ellender L., Linder M. M., (2005). Sports Pharmacology and ergogenic aids. *Primary Care: Clinics in office practice* Vol. 32; S. 277-292.
- Fitts R. H., (2007). The cross- bridge cycle and skeletal muscle fatigue. *Journal of applied physiology* Vol 104, S. 551- 558.
- Gandevia S.C., Enoka R. M., McComas A. J., Stuart D. G., Thomas C.K., (1995). Fatigue. Neural and muscular mechanisms. *Advances in experimental medicine and biology*. Vol. 384.
- Ganio M. S., Klau J. F., Casa D. J., Armstrong L. E., Maresh C. M., (2009). Effect of caffeine on sport- specific endurance performance: A systematic review. *Journal of strength and conditioning research*. Vol. 23 (1)/ 315-324.
- Glaister M., Howatson G., Abraham C. S., Lockey R. A., Goodwin J. E., Foley P. and McInnes G., (2008). Caffeine supplementation and multiple sprint running performance. *Medical Science in Sports Exercise* Vol. 40: 1835-1840.
- Glaister M. & Gissane C., (2018). Caffeine and physiological responses to submaximal exercise: A Meta- Analysis. *International Journal of Sports Physiology Performance* Vol. 13 (4): 402-411.
- Goldstein E. R., Ziegenfuss T., Kalman D., Kreider R., Campbell B., Wilborn C., Taylor L., Willoughby D., Stout J., Graves B. S., Wildman R., Ivy J. L., Spano M., Smith A. E., Antonio J. (2010). International society of sports nutrition position stand: caffeine and performance. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 7:5.
- Graham T. E., Hibbert E. & Sathasivam P., (1998). Metabolic and exercise endurance effects of coffee and caffeine ingestion. *Journal of Applied Physiology* Vol. 85: 883-889.
- Graham T. E. (2001). Caffeine and Exercise Metabolism, Endurance and Performance. *Sports Medicine*, Vol. 31, S. 785-807.
- Grgic J. & Mikulic P., (2017). Caffeine ingestion acutely enhances muscular strength and power but not muscular endurance in resistance-trained men. *European Journal of Sport Science*. Vol 17, S. 1029-1036.

- Haff G. G., Lehmkuhl M. J., McCoy L. B., & Stone M. H., (2003). Carbohydrate Supplementation and Resistance Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol.17(1), S. 187–196.
- Haldi J. & Wynn W., (1946). Action of drugs on efficiency of swimmers. *American Association for Health, Physical Education and Recreation*, Vol. 17 (2), S. 96-101.
- 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. *Journal of Strength and Conditioning*. Vol. 38(4), S. 42-49
- Hollmann W., (1977). *Zentrale Themen der Sportmedizin*. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Hottenrott K., Neumann G., (2010). *Trainingswissenschaft: Ein Lehrbuch in 14 Lektionen*. Meyer und Meyer Verlag. Band 7, (S.157)
- Hudson G. M., Green J. M., Bishop P. A. & Richardson M. T. (2008). Effects of caffeine and aspirin on light resistance training performance, perceived exertion, and pain perception. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 22(6)/1950–1957.
- Jacobson B. H., Weber M. D., Claypool I. and Hunt L. E., (1992). Effect of caffeine on maximal strength and power in elite male athletes. *British Journal of Sports Medicine* Vol. 26: 276-280.
- Jenkins N. T., Trilk J. L., Singhal A., O'Connor P. J. and Cureton K. J., (2008). Ergogenic effects of low doses of caffeine on cycling performance. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism* Vol. 18:328-342.
- Mosso A. (1915). *Fatigue*. London: Allen & Unwin Ltd
- S. Machado D. G., Unal G., Andrade S. M., Moreira A., Altimari L. R., Brunoni A. R., Perrey S., Mauger A. R., Bikson M., Okano A. H., (2018). Effect of transcranial direct current stimulation on exercise performance: a systematic review and meta-analysis. *Brain Stimulation*
- MacIntosh B. R. and Rassier D. E. (2002). What is fatigue? *Canadian Journal of applied physiology*. Vol. 27(1), S. 42-55.
- Nehlig A., Daval J. L., Debry G., (1992). Caffeine and the central nervous system: mechanisms of action, biochemical, metabolic and psychostimulant effects. *Brain Research Reviews*, Vol. 17 (1992) S. 139-170.

- Pasman W. J., van Baak M. A., Jeukendrup A. E. & de Haan A., (1995). The effect of different dosages of caffeine on endurance performance time. *International Journal of Sports Medicine*. Vol. 16, S. 225-230.
- Price D. D., Finniss D. G. & Benedetti F., (2008). A comprehensive review of the Placebo effect: Recent advances and current thought. *Annual review of psychology* Vol. 59, S. 565-590.
- Richardson D. L., and Clarke N. D., (2016). Effect of coffee and caffeine ingestion on resistance exercise performance. *Journal of strength and conditioning research*. Vol. 30 (10), S. 2892- 2900.
- Rivers W. H. R., Webber H. N. (1907). The action of caffeine on the capacity of muscular work. Psychological Laboratory, Cambridge.
- Salatto R. W., Arevalo J. A., Brown L. E., Wiersma L. D., & Coburn J. W., (2018). Caffeine's effects on upper- body resistance exercise workout. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 00(00)/ S. 1–6.
- Silva V. L., Messias F. R., Zanchi N.E., Gerlinger- Romero F., Duncan M. J., Guimarães-Ferreira L.†. (2015). Effects of acute caffeine ingestion on resistance training performance and perceptual responses during repeated sets to failure. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, S. 2- 19.
- Schmidt R. F., Lang F., Heckmann M., (2010). Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie. Springer Medizin Verlag.
- Schoenfeld B. J., (2010). The mechanisms of muscle hypertrophy and their application in resistance training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol. 24(10), S. 2857-2872.
- Southward K., Rutherford-Markwick K., Badenhorst C., & Ali A., (2018). The Role of Genetics in Moderating the Inter-Individual Differences in the Ergogenicity of Caffeine. *Nutrients*,10, 1352.
- Stein J. A., Ramirez M., Heinrich K. M., (2019). The effects of acute caffeine supplementation on performance in trained CrossFit athletes. *Sports* Vol. 7(4).
- Striegel H., Furian T., Niess A. M. & Horstmann T., (2004). Änderungen in der Behandlung von Leistungssportlern durch die Liste der verbotenen Substanzen 2004. *Sports Orthopaedics and Traumatology* Vol. 20(1); S. 39-41.

- Temple J. L. and Ziegler A. M. (2011). Gender Differences in Subjective and Physiological Responses to Caffeine and the Role of Steroid Hormones. *Journal of Caffeine Research Vol 1, Nr. 1, S. 41 – 48.*
- Westcott W., (2012). Resistance training is medicine: effects of strength training on health. *Current sports medicine reports. Vol. 11, Nr. 4, S 209-216*
- Wiles J.D., Bird S.R., Hopkins J. and Riley M., (1992). Effect of caffeinated coffee on running speed, respiratory factors, blood lactate and perceived exertion during 1500-m treadmill running. *British Journal of Sports Medicine Vol. 26: 116-120.*
- Wonisch M., Marko C., Niebauer J., Pokan R., Schmid P., Wiesinger E., (2012). Bedeutung des Krafttrainings zur Prävention und Rehabilitation internistischer Erkrankungen. *Wiener klinische Wochenschrift 124: 326-333*
- Wonisch M., Hofmann P., Förster H., Hörtnagl H., Ledl-Kurkowski E., Pokan R., (2017). *Kompendium der Sportmedizin. Springer Verlag; 2. Auflage; S. 271-305.*
- Woolf K. W., Bidwell W. K. and Carlson A. G., (2008). The effect of caffeine as an ergogenic aid in anaerobic exercise. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism Vol. 18: 412-429.*

## 6 Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Chemische Summenformel von Koffein.....                | 20 |
| Abbildung 2: Kalottenmodell von ATP.....                            | 21 |
| Abbildung 3: Activation level before and after EMS stimulation..... | 31 |
| Abbildung 4: Flow Chart Prisma.....                                 | 35 |

## 7 Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: <i>Darstellung des Koffeingehalts ausgewählter Getränke</i> ..... | 24 |
| Tabelle 2: <i>Koffeingehalt verschiedener Getränke und Soft-Drinks</i> ..... | 25 |
| Tabelle 3: <i>Scale of perceived exertion</i> .....                          | 32 |
| Tabelle 4: <i>Ratio – Property Scale</i> .....                               | 33 |
| Tabelle 5: <i>Repetitions in Reserve</i> .....                               | 34 |
| Tabelle 6: <i>Studienüberblick</i> .....                                     | 36 |
| Tabelle 7: <i>Participant review / relative caffeine dosis</i> .....         | 50 |

## 8 Abkürzungsverzeichnis

|                |  |
|----------------|--|
| 1RM.....       | Einwiederholungsmaximum                      |
| AC .....       | <i>Ellbogenbeugen</i>                        |
| AH CAF .....   | <i>Koffeinkapseln</i>                        |
| AHR.....       | aryl hydrocarbon receptor                    |
| BP.....        | <i>Bankdrücken</i>                           |
| bpm .....      | <i>Herzschläge pro Minute</i>                |
| BS.....        | <i>Nackenkniebeuge</i>                       |
| BW.....        | <i>Körpergewicht</i>                         |
| Ca.....        | <i>Kalzium</i>                               |
| CAFF .....     | <i>Koffein</i>                               |
| CAFF+TAU.....  | <i>Koffein und Taurin</i>                    |
| COF .....      | <i>Tassenkaffee</i>                          |
| DEC.....       | <i>dekoffeinierter Kaffee</i>                |
| DL.....        | <i>Kreuzheben</i>                            |
| DNS.....       | <i>Desoxyribonukleinsäure</i>                |
| EMS.....       | <i>Elektromuskelstimulation</i>              |
| LE .....       | <i>Kniestrecker</i>                          |
| LP.....        | <i>Beinpresse</i>                            |
| MP .....       | <i>Schulterdrücken</i>                       |
| MVC .....      | <i>Maximale willkürliche Kontraktion</i>     |
| PLAC .....     | <i>Placebo</i>                               |
| Prone Row..... | <i>liegend rudern</i>                        |
| Reps .....     | <i>Wiederholungen</i>                        |
| RIR .....      | <i>Wiederholungen in Reserve</i>             |
| RTF .....      | <i>Wiederholungen zum Muskelversagen</i>     |
| tDCS.....      | <i>Transkranielle Gleichstromstimulation</i> |
| WADA.....      | <i>World Anti Doping Agency</i>              |
| ZNS .....      | <i>Zentralnervensystem</i>                   |

## Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit *selbstständig verfasst habe* und nur die ausgewiesenen Hilfsmittel verwendet habe. Diese Arbeit wurde weder an einer anderen Stelle eingereicht (z. B. für andere Lehrveranstaltungen) noch von anderen Personen (z. B. Arbeiten von anderen Personen aus dem Internet) vorgelegt.

