

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel / Title

„Einfluss des Östrogenspiegels auf die
Leistungsfähigkeit junger, inaktiver Frauen bei
hochintensivem Krafttraining“

verfasst von / submitted by

Johanna Diewald BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien / Vienna, 2024

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 UG2002

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Daniel König

Kurzfassung

Einleitung: Unterschiede zwischen den Geschlechtern manifestieren sich in vielen Lebensbereichen, einschließlich der körperlichen Leistungsfähigkeit und der Reaktion auf Training. Die vorliegende Masterarbeit untersucht den Einfluss des Östrogenspiegels auf die Leistungsfähigkeit junger, inaktiver Frauen während eines hochintensivem Krafttrainings.

Ziel: Das primäre Ziel dieser Studie ist es, den Zusammenhang zwischen variierenden Östrogenspiegeln und der Trainingsleistung sowie der Reaktion auf oxidativen Stress bei Frauen zu untersuchen. Es soll festgestellt werden, ob höhere Östrogenwerte zu einer besseren sportlichen Leistung und einem größeren antioxidativen Potenzial führen.

Methoden: Für die Studie wurden 20 junge, inaktive Frauen im Alter von 18 bis 40 Jahren rekrutiert. Die Probandinnen durchliefen an sieben Interventionstagen ein strukturiertes, hochintensives Ganzkörper Krafttrainingszirkeltraining (HIIT). Zu verschiedenen Zeitpunkten wurden Blutproben entnommen, um Entzündungsmarker, oxidative Stressmarker sowie Sexualhormone zu analysieren. Die Trainingsleistung wurde anhand des Trainingsvolumens bewertet, welches durch die Kombination von bewegtem Gewicht und Wiederholungsanzahl jeder Übung ermittelt wurde. Die statistische Analyse wurde mittels ANOVA (SPSS 27) durchgeführt.

Ergebnisse: Frauen mit höheren Östrogenspiegeln erbrachten tendenziell eine bessere Leistung bei hochintensivem Krafttraining. Es gab jedoch keinen signifikanten Einfluss des Östradiolspiegels, der Menstruationszyklusphase oder der Verwendung hormoneller Kontrazeptiva auf die morgendlichen Basis-ROS-Werte oder deren Anstieg nach dem Training. Obwohl gewisse Trends erkennbar waren, erreichten diese keine statistische Signifikanz.

Zusammenfassung: Im Rahmen des Forschungsprojektes konnte ein positiver Zusammenhang zwischen Östrogen, oxidativem Stress und der Trainingsleistung nachgewiesen werden. Frauen mit höheren Östrogenspiegeln scheinen ein höheres antioxidatives Potential zu besitzen, welches ihnen möglicherweise Vorteile bei hochintensivem Krafttraining verschafft.

Abstract

Introduction: Gender differences manifest in many areas of life, including physical performance and response to training. This master's thesis investigates the impact of estrogen levels on the performance of young, inactive women during high-intensity strength training.

Objective: The primary objective of this study is to examine the relationship between varying estrogen levels and training performance, as well as the response to oxidative stress in women. The aim is to determine whether higher estrogen levels lead to better athletic performance and greater antioxidant potential.

Methods: For the study, 20 young, inactive women aged 18 to 40 were recruited. The participants underwent a structured, high-intensity full-body circuit strength training (HIIT) over seven intervention days. Blood samples were taken at various points to analyze inflammatory markers, oxidative stress markers, and sex hormones. Training performance was assessed based on training volume, calculated by the combination of weight lifted and the number of repetitions for each exercise. Statistical analysis was conducted using ANOVA (SPSS 27).

Results: Women with higher estrogen levels tended to perform better in high-intensity strength training. However, there was no significant influence of estradiol levels, menstrual cycle phase, or use of hormonal contraceptives on morning baseline ROS values or their increase after training. Although certain trends were observed, they did not reach statistical significance.

Conclusion: The research project demonstrated a positive relationship between estrogen, oxidative stress, and training performance. Women with higher estrogen levels seem to have a greater antioxidant potential, which may give them advantages in high-intensity strength training.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Östrogen	11
1.1.1	Chemische Zusammensetzung von Östrogen	12
1.1.2	Biosynthese von Estradiol	13
1.1.3	Physiologische Wirkung von Östrogen	13
1.2	Krafttraining.....	17
1.2.1	Definition hochintensives Intervalltraining HIIT	17
1.2.2	Physiologische Wirkmechanismen von HIIT	18
1.2.3	Parameter zur Messung der Leistung bei Krafttraining	20
1.2.4	Sportphysiologisch relevante Unterschiede zwischen Männern und Frauen	22
1.2.5	Östrogen und Leistungsfähigkeit	24
1.3	Oxidativer Stress.....	26
1.3.1	Entstehung von Sauerstoffradikale ROS	26
1.3.2	Oxidativer Stress.....	27
1.3.3	Physiologische Auswirkungen von oxidativem Stress.....	27
1.3.4	Wirkmechanismen gegen oxidativen Stress	28
1.3.5	Oxidativer Stress und (intensives) Krafttraining	28
1.4	Gründe der Untersuchung	30
1.5	Ziele der Untersuchung	31
1.5.1	Untersuchung von oxidativem Stress	32
1.5.2	Messung von 17-Beta-Östradiol E2.....	32
1.5.3	Einfluss auf die Stressreaktion nach dem Training	32
2	Methoden	33
2.1	Studiendesign	33
2.1.1	Probandinnenkollektiv	34

2.2	Blutproben und Laborparameter	36
2.2.1	Beschreibung der Auswertung der Laborparameter	37
2.3	Beschreibung Krafttrainingszirkel.....	37
2.3.1	Beschreibung der Auswertung der Krafttrainingsleistung	40
3	Ergebnisse.....	42
3.1	Demographische und anthropometrische Daten	42
3.2	Östradiol	43
3.3	Einfluss von Östradiol, Menstruationszyklusphase und hormoneller Kontrazeptiva auf die HIIT-Trainingsleistung.....	44
3.3.1	Östrogen und HIIT-Trainingsleistung	44
3.3.2	Menstruationszyklusphase und HIIT-Trainingsleistung	46
3.3.3	Hormonelle Kontrazeptiva und HIIT-Trainingsleistung	46
3.4	Einfluss von Östradiol, Menstruationszyklusphase und hormoneller Kontrazeptiva auf die morgendlichen Nüchternwerte der ROS	46
3.4.1	Östrogen und morgendlichen Nüchternwerte der ROS	47
3.4.2	Menstruationzyklusphase und morgendlichen Nüchternwerte der ROS	47
3.4.3	Hormonelle Kontrazeptiva und morgendlichen Nüchternwerte der ROS	47
3.5	Einfluss von Östradiol, Menstruationszyklusphase und hormoneller Kontrazeptiva auf den ROS-Anstieg nach HIIT	48
3.5.1	Östrogen und ROS-Anstieg nach HIIT	48
3.5.2	Menstruationszyklusphase und ROS-Anstieg nach HIIT	49
3.5.3	Hormonelle Kontrazeptiva und ROS-Anstieg nach HIIT	50
4	Diskussion	51
4.1	Limitationen	54
5	Literaturverzeichnis.....	57
6	Abbildungsverzeichnis	62
7	Tabellenverzeichnis	62
8	Eidesstaatliche Erklärung	63

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Markus Gassner, MSc und Herrn Univ.-Prof. Dr. Daniel König, welche mit fachlicher Expertise, wertvollen Anregungen und kontinuierlicher Unterstützung maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss meiner Masterarbeit beigetragen haben.

Des Weiteren möchte ich den Probandinnen, welche sich bereit erklärt haben, an dieser Studie teilzunehmen, meinen herzlichen Dank aussprechen. Ihre Bereitschaft und ihr Engagement waren grundlegend für die Durchführung dieser Untersuchung.

Nicht zuletzt möchte ich mich von ganzem Herzen bei meinem Partner, meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die immer ein offenes Ohr für mich hatten und mich mit aufmunternden und unterstützenden Worten begleitet haben. Ihr habt mir den Rücken gestärkt und mir die Kraft gegeben, es durchzuziehen.

1 Einleitung

Die wissenschaftliche Erforschung der Unterschiede zwischen den Geschlechtern in verschiedenen Lebensbereichen, insbesondere in sportlicher Hinsicht, hat in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Umso komplexer sich jedoch die Themen, welche sich mit ebendiesen Geschlechterunterschieden befassen, gestalten, desto geringer ist die Menge an Daten und Wissen, welche dazu verfügbar sind. Ähnlich verhält es sich auch mit dem dieser Masterarbeit gewidmetem Thema – Östrogen und Leistungsfähigkeit.

Östrogene sind primär als Hormone des weiblichen Fortpflanzungssystems bekannt. Doch ihr Einfluss auf den menschlichen Körper ist mannigfaltig und komplex. Neben psychologischen Einflüssen erstreckt sich ihre Wirkung auf zahlreiche physiologische Prozesse, beispielsweise auf die Muskelkraft, die kardiovaskuläre Gesundheit und den Stoffwechsel.

In Anbetracht der bekannten Unterschiede in der körperlichen Leistungsfähigkeit zwischen den Geschlechtern und der Rolle von Östrogen im weiblichen Körper, ist es von wissenschaftlichem Interesse, die Beziehung zwischen Östrogenspiegel und sportlicher Leistungsfähigkeit zu verstehen.

Die vorliegende Masterarbeit widmet sich deshalb dem Thema „Einfluss des Östrogenspiegels auf die Leistungsfähigkeit junger inaktiver Frauen bei hochintensivem Krafttraining“. Die Arbeit untersucht spezifisch, inwiefern der Östrogenspiegel die Leistungsfähigkeit bei hochintensivem Krafttraining und die Anfälligkeit für oxidativen Stress beeinflusst. Zudem wird analysiert, ob hormonelle Schwankungen während des Menstruationszyklus und die Einnahme hormoneller Kontrazeptiva eine Rolle spielen.

Die empirische Untersuchung dieser Fragestellung erfolgt durch eine methodische Analyse von Blutproben, um Entzündungs- und oxidative Stressmarker sowie Sexualhormone am jeweiligen Interventionstag zu bestimmen. Ergänzend dazu durchlaufen die Probandinnen ein hochintensives Intervalltraining (HIIT) in Form eines Krafttrainingszirkeltrainings, um Veränderungen in der Leistungsfähigkeit zu dokumentieren und deren Zusammenhang mit hormonellen Schwankungen zu analysieren.

Die vorliegende Arbeit ist in mehrere Kapitel gegliedert, welche in systematischer Weise zur Beantwortung der aufgeworfenen Fragestellungen beitragen. Beginnend mit der Darlegung der theoretischen Grundlagen zu Östrogen, Krafttraining und oxidativem Stress, folgt eine detaillierte Betrachtung der Methodik sowie des gewählten Studiendesigns. Im

Anschluss werden die Ergebnisse präsentiert und im Kontext der bestehenden wissenschaftlichen Literatur diskutiert. Dabei werden Parallelen und Unterschiede zu bisherigen Studien aufgezeigt. Abschließend werden die wesentlichen Erkenntnisse der Studie zusammengefasst und ein Ausblick möglicher Implikationen für die Praxis sowie weitere Forschungsperspektiven aufgezeigt.

Im Gesamten bietet diese Masterarbeit einen umfassenden Einblick in die komplexen Wechselwirkungen zwischen Hormonen und sportlicher Leistungsfähigkeit und leistet einen wertvollen Beitrag für die Allgemeinheit sowie für die Sportwissenschaft.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, das Verständnis für den Einfluss von Östrogen auf die sportliche Leistungsfähigkeit zu vertiefen und dadurch zukünftige Forschungsperspektiven anzuregen.

1.1 Östrogen

Die weiblichen Sexualhormone, insbesondere Östrogene, nehmen eine entscheidende Rolle im physiologischen Prozess des weiblichen Körpers ein. Die folgenden Kapitel widmen sich den verschiedenen Aspekten der Östrogene, einschließlich ihrer physiologischen Funktion, ihrer chemischen Zusammensetzung und Biosynthese, ihrer Rezeptorbindung und ihrer Wirkungsmechanismen.

Östrogene sind eine Gruppe von Sexualhormonen, welche hauptsächlich bei Frauen, aber auch in geringeren Maßen bei Männern, produziert werden. Es handelt sich dabei um Steroidhormone, welche primär in den Eierstöcken (Ovarien) und der Plazenta, aber auch in den Nebennieren und im Fettgewebe gebildet werden. Östrogene spielen eine Schlüsselrolle bei der Regulierung des weiblichen Fortpflanzungssystems, der Entwicklung sekundärer Geschlechtsmerkmale, der Knochengesundheit und der kardiovaskulären Funktionen. Ihre Produktion und Freisetzung wird durch komplexe Feedback-Mechanismen reguliert, die auf zentralen (Hypothalamus und Hypophyse) und peripheren (Eierstöcke) Ebenen wirken (Aktories et al., 2017).

Eine Vielzahl wissenschaftlicher Studien hat die Bedeutung von Östrogenen für die reproduktive Gesundheit, die Knochen- und Muskelgesundheit, das kardiovaskuläre System und andere Aspekte des menschlichen Körpers untersucht.

Zum Beispiel zeigt die Arbeit von Fischer & Haffner-Luntzer (2022) nicht nur die Zusammenhänge zwischen niedrigen Östrogenspiegeln und einem erhöhten Risiko für Osteoporose bei postmenopausalen Frauen sondern auch, dass Veränderungen der Immunzellen zur Entwicklung der postmenopausalen Osteoporose beitragen.

Der Östrogenspiegel bezieht sich auf die Konzentration von Östrogenen im Blutkreislauf und unterliegt natürlichen Schwankungen im Verlauf des Menstruationszyklus der Frau (Nelson & Bulun, 2001).

Zudem führt ein Östrogenmangel zu einem Rückgang der Skelettmuskulatur und dessen Funktionalität durch offensichtliche Auswirkungen auf die Signalwege der Proteinsynthese und des Proteinabbaus, apoptotische Signalwege und kontraktile Proteinmodifikationen. Die Morphologie und Funktion der Mitochondrien ist bei Östrogenmangel beeinträchtigt, während das Vorhandensein von Östrogen mit reduziertem oxidativem Stress, erhöhter Atmungsfunktion und membranstabilisierenden Eigenschaften in Verbindung gebracht wird. Die Anpassungsfähigkeit der Muskeln nach Belastung oder Schädigung ist ohne

Östrogen eingeschränkt, vermutlich aufgrund seiner schützenden Wirkung auf Satellitenzellen und dessen Einfluss auf die zelluläre Apoptose (Pellegrino et al., 2022).

Östrogene können die Gefäßfunktion beeinflussen, indem sie auf die Östrogenrezeptoren in den Endothelzellen und auch in den glatten Muskelzellen der Gefäße wirken. Zudem führen Östrogene zur Freisetzung von Stickstoffmonoxid und Prostacyclin, welche beide gefäßerweiternd wirken und können der Produktion von Endothelin und Angiotensin II entgegenwirken, welche wiederum gefäßverengend wirken (Newson, 2018). Diese und viele weitere Studien unterstreichen die vielfältigen Funktionen von Östrogen und dessen Bedeutung für die Gesundheit.

1.1.1 Chemische Zusammensetzung von Östrogen

In der nachfolgenden Abbildung 1 erfolgt die formelhaft, grafische Darstellung des Aufbaus der Verbindung von Estradiol, Estron und Estriol.

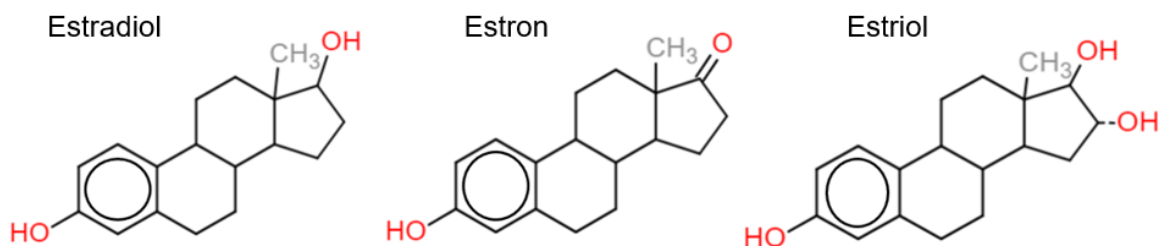


Abbildung 1: Strukturformel Estradiol, Estron und Estriol (mod. n. Aktories et al., 2017, S. 614)

Die chemische Zusammensetzung von Östrogenen basiert auf ihrem Steroid-Grundgerüst. Östrogene zeichnen sich durch das Vorhandensein eines aromatischen Rings A und das Fehlen einer Methylgruppe zwischen dem A- und B-Ring des Steroidmoleküls, welches aus vier Ringen (A, B, C, D) besteht, aus. Die wichtigsten Östrogene im weiblichen Körper sind Estradiol, Estron und Estriol. Unter diesen ist Estradiol, auch Östradiol oder 17 β-Estradiol bezeichnet, das am häufigsten vorkommende und biologisch aktivste Östrogen und wird hauptsächlich in den Ovarien produziert. Estron besitzt circa ein Drittel und Estriol etwa ein Zehntel der biologischen Aktivität von Estradiol. Ersteres wird ebenfalls in den Eierstöcken produziert, aber auch aus der Umwandlung von Androgenen im Fettgewebe und anderen Geweben aufgebaut. Die unterschiedlichen biologischen Eigenschaften beruhen auf den verschiedenen Bindungsaffinitäten zu den Östrogenrezeptoren. Estron wirkt nahezu ausschließlich durch seine Umwandlung zu Estradiol, während Estriol aufgrund seiner hohen Konzentration, welches insbesondere während der Schwangerschaft produziert wird, als voll wirksames Hormon agiert (Aktories et al., 2017).

1.1.2 Biosynthese von Estradiol

Die Biosynthese von Estradiol wird durch männliche Sexualhormone, insbesondere Androgene, reguliert. Diese Regulation erfolgt durch die Hormonausschüttung des Hypothalamus und der Hypophyse. Das Gonadotropin-Releasing-Hormon (GnRH) wird vom Hypothalamus freigesetzt und stimuliert die Produktion von luteinisierendem Hormon (LH) und follikelstimulierendem Hormon (FSH) in der Hypophyse (Vaupel et al., 2015).

In den Ovarien erfolgt die Synthese von Estradiol in spezialisierten Zelltypen. Die Thekazellen sind für die Produktion von Androgenen verantwortlich, welche durch das LH reguliert wird. Diese Synthese erfolgt durch eine schrittweise enzymatische Umwandlung von Cholesterin. Nach Abspaltung der Seitenkette des Cholesterins zwischen den Kohlenstoffatomen 20 und 22 wird Pregnenolon gebildet. Dieses wird weiter zu Progesteron umgewandelt, dann zu Androstendion und schließlich zu Testosteron (Cui et al., 2013).

Die Umwandlung von Androgenen zu Estradiol findet in den Granulosazellen statt. Nachdem das Testosteron in die Granulosazellen transportiert wird, stimuliert FSH die Aktivität der Aromatase, welche den letzten Schritt der Estradiolsynthese antreibt. Diese enzymatische Umwandlung wurde auch in anderen Geweben wie Fettgewebe, Brust, Knochen und testikulären Sertolizellen nachgewiesen. Estradiol, welches in den Ovarien produziert wird, gelangt eher in den Blutkreislauf, während außerhalb der Gonaden produziertes Estradiol eher lokal wirkt (Aktories et al., 2017).

Die tägliche Estradiolproduktion bei Frauen schwankt zyklusabhängig zwischen 25-100µg (90-350nmol). Ein positiver Rückkopplungsmechanismus bewirkt in der ersten Zyklushälfte einen Anstieg, was die LH- und FSH-Ausschüttung erhöht und den Eisprung induziert. Während einer Schwangerschaft kann die Estradiolproduktion auf bis zu 30mg/Tag steigen. Nach der Menopause sinkt die Produktion auf 5-10µg/Tag. Männer produzieren im Vergleich dazu täglich zwischen 2-25µg Estradiol (Aktories et al., 2017).

1.1.3 Physiologische Wirkung von Östrogen

Der Wirkungsmechanismus von Estradiol beruht auf seiner Bindung an Östrogenrezeptoren, welche vorwiegend intrazellulär lokalisiert sind. Etwa 69% des Estradiols im Blut bindet an das sexualhormonbindende Globulin (SHBG) und circa 30% an Albumin, während nur ungefähr 1% frei zirkuliert. Die Verfügbarkeit von freiem Estradiol ist ausschlaggebend für dessen Wirksamkeit, da es sich nur in dieser freien Form an Östrogenrezeptoren binden kann (Aktories et al., 2017).

Es gibt zwei Arten von Östrogenrezeptoren. Estrogenrezeptor-Alpha (ER α) und Estrogenrezeptor-Beta (ER β). Beide werden gewebespezifisch exprimiert. ER α kommt vor allem in Gebärmutter, Scheide, Brustdrüsen, Knochen, glatter Muskulatur (periphere Blutgefäße) und Hypothalamus vor. ER β ist besonders in Prostata, Hoden, Eierstocken, Lunge, Herz, Thymus, Milz und in einigen bestimmten Hirnregionen vorzufinden. Die Östrogenrezeptoren sind im inaktiven Zustand im Zytoplasma von Zellen lokalisiert und an Hitzeschockproteine gebunden. Wenn Estradiol sich an einen Rezeptor bindet, kommt es zu einer Konformationsänderung, welche anschließend zur Freisetzung dieses Hitzeschockproteins führt. Der Hormon-Rezeptor-Komplex wandert daraufhin in den Zellkern und bindet sich an Estrogen-responsive Elemente der DNA, um die Aktivierung von Zielgenen zu regulieren. Durch genetische Inaktivierung der Östrogenrezeptoren in Mausmodellen konnte gezeigt werden, dass ER α die physiologischen Östrogenwirkungen auf die Brustdrüsenentwicklung, die Erhaltung der Knochendichte, das Fortpflanzungsverhalten, den Glukosestoffwechsel, das Herz-Kreislauf-System und die Hypothalamus-Hypophysen-Achse vermittelt. Im Gegensatz dazu ist ER β an der Regulation des Eisprungs, bestimmter Aspekte des Fortpflanzungsverhaltens und der Immunantwort beteiligt (Aktories et al., 2017).

Sexualspezifisch betrachtet wirken Östrogene im weiblichen Körper, besonders im Fortpflanzungstrakt. Dort fördern sie das Wachstum der Zellen, verbessern die Blutzufuhr und helfen dabei, Wasser, Elektrolyte und Aminosäuren zu speichern. Zudem fördern sie die Herstellung von Proteinen. Sie haben also eine aufbauende (anabole) Wirkung (Aktories et al., 2017). Bei geschlechtsreifen Frauen spielt Estradiol eine wesentliche Rolle im Menstruationszyklus, welcher aus drei Phasen besteht: der Follikelphase, der Ovulationsphase und der Lutealphase. Während der Follikelphase steigt der Estradiolspiegel, was die Freisetzung von GnRH, LH und FSH erhöht und die Reifung der Follikel fördert. Primordialfollikel reifen zu Primärfollikeln heran. Diese vermehren sich durch die Bildung von Granulosazellen und synthetisieren Estradiol. Estradiol unterstützt die Reifung der Follikel zu Sekundärfollikeln, welche von Thekazellen gebildet werden. Die Synthese von Androgenen durch die Thekazellen unterstützt die Produktion von Estradiol. Der steigende Estradiolspiegel führt zu einem negativen Rückkopplungsmechanismus auf die Hypothalamus-Hypophysen-Achse, wodurch die weitere Reifung von Follikeln unterdrückt wird (*Anatomie Physiologie I care*, 2015).

In der Ovulationsphase reift ein Follikel zum Graaf-Follikel heran, welcher Estradiol in großen Mengen produziert. Dies löst eine positive Rückkopplung aus, die zu einem sprunghaften LH-Anstieg und schließlich zum Eisprung führt. Der zurückbleibende Follikel

wird zum Gelbkörper (Corpus luteum), der wiederum Progesteron synthetisiert. Der Estradiolspiegel sinkt und die LH-Ausschüttung wird reduziert (*Anatomie Physiologie I care*, 2015).

In der Lutealphase bilden Granulosa- und Thekazellen den Gelbkörper, welcher für die Produktion von Progesteron verantwortlich ist. Progesteron ist weiters für die sekretorische Umwandlung der Gebärmutter Schleimhaut zuständig. Am Ende der Lutealphase kommt es zu einem Abfall des Progesteronspiegels, dem darauffolgenden Einsetzen der Blutung und dem Beginn eines neuen Zyklus (*Anatomie Physiologie I care*, 2015). Die kombinierte Östrogen- und Progesteronwirkung bewirkt außerdem, dass das Sekret des Gebärmutterhalses dünnflüssig und fadenziehend wird, was die Spermienbewegung erleichtert (Aktories et al., 2017).

Die folgende Abbildung 2 veranschaulicht die Hormonkonzentrationen im Serum während des Zyklus sowie die Veränderungen an der Gebärmutter Schleimhaut (Endometrium).

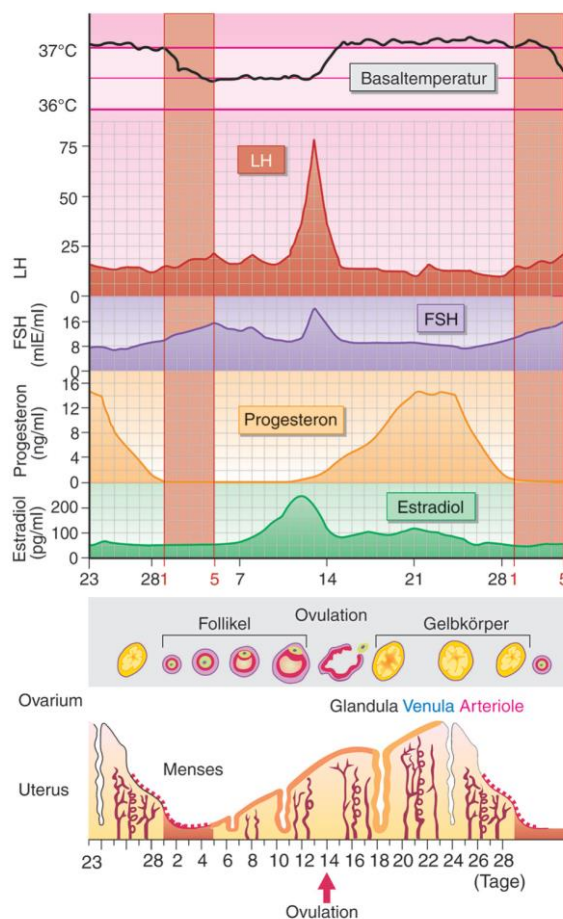


Abbildung 2: Hormonkonzentrationen im Serum während des Zyklus & Veränderungen am Endometrium
Quelle: Aktories et al. (2017, S. 631)

Bei hormoneller Verhütung wird synthetisches Östrogen (wie Ethinylestradiol) verwendet, um den natürlichen Hormonzyklus zu beeinflussen. Die Einnahme von hormonellen Kontrazeptiva führt dazu, dass die Östrogen- und Gestagenspiegel im Körper ansteigen, was verschiedene Effekte mit sich bringt. Zum einen wird der Menstruationszyklus beeinflusst, da hormonelle Kontrazeptiva die Gonadotropinausschüttung (FSH und LH) unterdrücken, wodurch der Eisprung verhindert wird. Zum anderen finden Veränderungen in Beschaffenheit des Endometriums statt, was die Einnistung einer befruchteten Eizelle erschwert. Außerdem wird das Cervicalsekret durch die Verwendung hormoneller Kontrazeptiva verdickt, was die Spermienpenetration behindert (Aktories et al., 2017).

Die Auswirkungen von Östrogenen gehen aber auch über die Geschlechtsorgane und deren Zyklus hinaus. Sie spielen eine wichtige Rolle im Knochenstoffwechsel, indem sie die Knochenfestigkeit unterstützen und dementsprechend Osteoporose vorbeugen. Östrogene fördern die Aufnahme von Calcium aus dem Darm und seine Einlagerung in die Knochen. Sie hemmen auch den Abbau von Knochengewebe, indem sie die Aktivität und Anzahl der Osteoklasten reduzieren. Darüber hinaus unterstützen sie die Bildung von Stoffen, die den Knochenabbau hemmen. Vor allem Frauen während ihrer Postmenopause leiden unter dem damit verbundenen Rückgang der Östrogenproduktion. Im Herz-Kreislauf-System führen Östrogene zu einer Erweiterung der kleinen Blutgefäße und einer verbesserten Durchblutung. Sie können auch die Produktion von Stickstoffmonoxid erhöhen, was eine erweiternde Wirkung auf die Blutgefäße hat und den Blutdruck senkt. Zudem wirkt Östrogen auf den Stoffwechsel, indem es eine Reduktion von LDL-Cholesterin und eine Erhöhung von HDL-Cholesterin bewirkt, was das Risiko von Herz-Kreislauf-Erkrankungen verringern kann. Außerdem regulieren Östrogene den Blutzuckerspiegel und können die Ansammlung von Bauchfett verhindern. In der Haut fördern sie die Pigmentierung und können die Talgproduktion hemmen. Psychische Effekte wie Stimmungsschwankungen können ebenfalls durch Östrogene beeinflusst werden, was sie zu einer wichtigen Komponente bei der Behandlung von Wechseljahresbeschwerden macht (Aktories et al., 2017).

Trotz der vielen positiven Eigenschaften von Östrogenen kann ein Übermaß derselben zu gesundheitlichen Problemen wie beispielsweise Thrombosen aufgrund erhöhter Gerinnungsfaktoren, Wassereinlagerungen sowie übermäßiger Proliferation des Endometriums führen. Zu wenig Östrogen wiederum erhöht, wie bereits dargelegt, das Risiko für Osteoporose und kann bei der Frau Wechseljahresbeschwerden wie zum Beispiel Hitzewallungen und urogenitale Probleme verursachen (Aktories et al., 2017).

1.2 Krafttraining

Der folgende Abschnitt thematisiert Aspekte hochintensiven Intervalltrainings (HIIT), wobei zunächst eine Definition sowie eine Erläuterung der physiologischen Wirkmechanismen erfolgt. Zudem werden Parameter zur Leistungsmessung, geschlechtsspezifische Unterschiede in der sportlichen Leistung sowie der Einfluss von Östrogen auf die Leistungsfähigkeit behandelt.

1.2.1 Definition hochintensives Intervalltraining HIIT

Hochintensives Intervalltraining HIIT (engl. high intensity interval training) charakterisiert sich durch das Wechseln kurzer hochintensiver Phasen mit Phasen der Erholung oder leichten Übungen. Ziel des hochintensiven Intervalltrainings besteht unter anderem darin, die Stoffwechselaktivität zu verbessern, die Muskelkraft zu erhöhen und das Herz-Kreislauf-System zu stärken (HIIT, o. J.; Ito, 2019).

Das Konzept des Intervalltrainings zur Verbesserung der Gesundheit und der Leistungsfähigkeit, nicht nur unter Leistungssportlern und Leistungssportlerinnen, sondern auch im rehabilitativen Kontext wird seit Jahrzehnten angewandt und weiterentwickelt. Dennoch besteht laut Coates et al. (2023) das Problem einer klaren Definition, insbesondere für die Klassifizierung der Intensität. Es gibt keine gemeinsame Definition des Begriffs "hochintensives Intervalltraining" (HIIT), obwohl er weit verbreitet ist.

In ihrer Publikation aus dem Jahr 2023 beschreiben Coates et al., dass HIIT im Leistungskontext als intermittierendes Training oberhalb des Bereichs hoher Intensität charakterisiert werden kann. Als Abgrenzungskriterien werden Indikatoren wie die zweite Laktatschwelle, der maximale Laktat-Steady-State oder der Laktat-Turnpoint genannt. Im Kontext der Gesundheit kann HIIT als intermittierendes Training mit moderater Intensität charakterisiert werden. Die Kategorisierung von HIIT erfolgt primär anhand der hohen Intensität und basiert auf verschiedenen Indikatoren, die in den maßgeblichen Richtlinien für die öffentliche Gesundheit, wie beispielsweise den Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO), definiert sind (Bull et al., 2020). Die genannten Indikatoren umfassen die wahrgenommene Anstrengung, die Sauerstoffaufnahme sowie die Herzfrequenz.

Im Bereich des Krafttrainings kann hochintensives Intervalltraining mit verschiedenen Kräftigungsübungen an Geräten, mit freien Gewichten oder dem eigenen Körpergewicht als Belastungskomponente durchgeführt werden, welche durch kurze Erholungspausen unterbrochen werden.

1.2.2 Physiologische Wirkmechanismen von HIIT

Während eines hochintensiven Intervalltrainings kommt es zu einer Vielzahl an physiologischen Reaktionen im Körper. Im Folgenden wird auf die positiven kardiovaskulären und metabolischen Effekte sowie die relevanten Mechanismen eingegangen.

Während des HIIT wird Glykogengranulat in der Skelettmuskulatur durch Glykolyse abgebaut. Weiters werden Katecholamine (Adrenalin, Noradrenalin und Dopamin) freigesetzt und es kommt zu einem erhöhten Scherstress in den Gefäßen sowie einer gesteigerten autonomen Nervenaktivität durch HIIT. All dies trägt zu einer erhöhten aeroben und metabolischen Kapazität bei (Ito, 2019).

Durch die intensive Bewegung im HIIT ist die Aktivität der Skelettmuskelzellen und Arterien erhöht. Die Glykolyse führt zur Abnahme des Glykogengehalts und zur Freisetzung der AMP-aktivierten Proteinkinase (AMPK) aus dem Glykogenpartikel, was zu einer höheren Aktivität und veränderten Lokalisierung führt. Außerdem führt die körperliche Aktivität in einem glykogenarmen Zustand nach der Glykolyse zur Phosphorylierung und Aktivierung des Peroxisom-Proliferator-aktivierten Rezeptor- γ -Koaktivators 1- α (PGC-1 α). Schließlich kann osmotischer Stress, welcher mit einer schnellen Veränderung des Glykogengehalts und einer erhöhten Glukosekonzentration einhergeht, mitogen-aktivierte Proteinkinasen (MAPK) wie p38 aktivieren. Diese können PGC-1 phosphorylieren und aktivieren. Ein weiteres Ziel von p38 ist Interleukin 6 (IL-6), welches AMPK als eines der potenziellen Ziele anspricht. Diese Veränderungen in der Muskelsignalgebung führen außerdem zu einer verbesserten Verwertung der zirkulierenden Fettsäuren (FA). Der erhöhte Katecholaminspiegel fördert den Fettstoffwechsel durch Aktivierung des Hitzeschockproteins über die Proteinkinase A. Ein weiteres zelluläres Ziel von Katecholaminen ist das cAMP-Response-Element-bindende Protein (CREB). HIIT kann aufgrund seiner relevanten Effekte der erhöhten Aktivität des zentralen Nervensystems die Phosphorylierung und Aktivierung von CREB sowohl in den trainierten Muskeln als auch in den nicht rekrutierten Muskeln während der Beanspruchung erhöhen und führt somit zu einer muskulären Stimulation, welche die Aktivität der AMPK in Muskelzellen erhöht. Dies wiederum führt zu einer Zunahme der mRNA und des Proteins von PGC-1 α , was die Expression von mitochondrialen Sauerstoffenzymen erhöht und zur Verbesserung der aeroben Kapazität beiträgt (Ito, 2019).

Weiters resultiert die Durchführung von hochintensivem Intervalltraining in einer signifikanten Erhöhung der Cortisolspiegel im Blut. Cortisol spielt eine zentrale Rolle bei der

Mobilisierung von Energiequellen, indem es den Abbau von Proteinen und Fetten zur Bereitstellung von Glukose fördert, was während intensiver körperlicher Aktivität notwendig ist. Ein erhöhter Cortisolspiegel stabilisiert den Blutzuckerspiegel, was insbesondere für Personen mit Typ-1-Diabetes von Bedeutung ist, da er einen Abfall des Blutzuckerspiegels nach dem Training verhindern kann. Des Weiteren verfügt Cortisol über entzündungshemmende Eigenschaften, welche dazu beitragen, Entzündungsprozesse zu regulieren und die Erholung nach intensiven Trainingseinheiten zu fördern. Der Cortisolanstieg stellt einen Bestandteil der physiologischen Stressantwort des Organismus dar, welche die Adaption an hohe Belastungen sowie die Resilienz gegenüber künftigen Stressoren fördert. In der Konsequenz unterstützt Cortisol die Erholung und Anpassung des Körpers nach intensiven Trainingseinheiten, wodurch letztlich die Leistungsfähigkeit gesteigert wird (Boutcher, 2011).

Gleichzeitig steigt bei intensiver körperlicher Belastung die Laktatkonzentration im Blut aufgrund der verstärkten anaeroben Energiebereitstellung, was zu einer Übersäuerung der Muskulatur führt und eine wichtige Stimulation für Muskelanpassungen darstellt. Es beginnen Reparatur- und Regenerationsprozesse in den beanspruchten Muskelfasern, um Schäden zu reparieren und das Muskelwachstum zu fördern (Coates et al., 2023).

Nach dem Training setzt ein Nachbrenneffekt ein. Die über den Ruhezustand hinausgehende Sauerstoffaufnahme nach intensiver Belastung wird als überschüssiger Sauerstoffverbrauch nach dem Training (EPOC) bezeichnet. EPOC wird während der langsamen Erholungsphase mit dem Abbau von Laktat und H^+ , einer erhöhten Lungen- und Herzfunktion, einer erhöhten Körpertemperatur, Katecholamineffekten und einer Glykogenresynthese in Verbindung gebracht (Boutcher, 2011).

Durch den im HIIT signifikant ansteigenden Sauerstoffverbrauch, ausgelöst durch den gesteigerten Energiebedarf während intensiven Übungsphasen, steigt die Herzfrequenz (Coates et al., 2023). Dadurch erhöht sich das Herzminutenvolumen (HMV), was zu Scherstress in den Arterien führt und eine Verbesserung der Endothelfunktion sowie der Pulswellenreflexion bewirkt (Ito, 2019).

Regelmäßig durchgeführtes hochintensives Intervalltraining verbessert signifikant die kardiorespiratorische Fitness, gemessen durch einen Anstieg des maximalen Sauerstoffverbrauchs (VO_{2max}), was unabhängig von Alter, Geschlecht und der Nachbeobachtungszeit mit einer Reduktion des Risikos für Morbidität und Mortalität verbunden ist (Coates et al., 2023).

Zusammenfassend führt HIIT zu einer Vielzahl von positiven Anpassungen im Körper, welche die aerobe Leistungsfähigkeit verbessern und die muskuläre Gesundheit fördern können. Zudem kann es auch die anaerobe Toleranz verbessern, indem es die Fähigkeit des Körpers erhöht, Laktat eher zu tolerieren und abzubauen und somit die anaerobe Leistungsfähigkeit zu verbessern (Coates et al., 2023; Ito, 2019). Diese Effekte machen hochintensives Intervalltraining zu einer effektiven Trainingsmethode zur Leistungssteigerung und Förderung der allgemeinen Gesundheit.

Die grafische Darstellung in Abbildung 3 präsentiert die positiven kardiovaskulären und metabolischen Effekte sowie die relevanten Mechanismen, welche durch hochintensives Intervalltraining aktiviert werden.

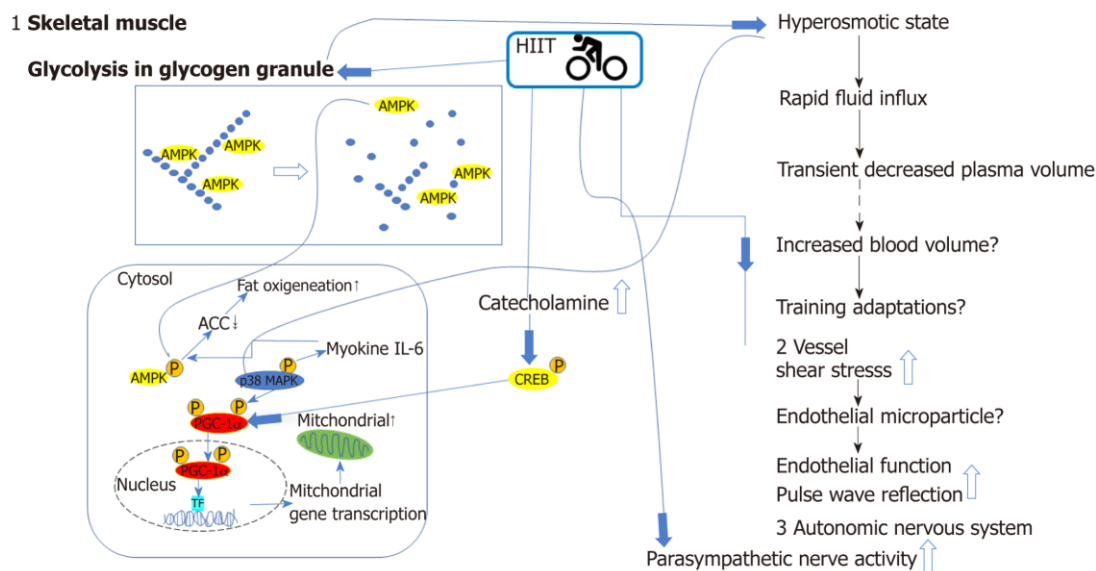


Abbildung 3: Grafische Darstellung der durch hochintensives Intervalltraining aktivierten positiven kardiovaskulären und metabolischen Effekte.
Quelle: Ito (2019, S. 184)

1.2.3 Parameter zur Messung der Leistung bei Krafttraining

Die Messung der Leistung im Krafttraining kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Dabei kann die erbrachte Leistung beispielsweise über die Laktatkonzentration oder über verschiedenste Entzündungsmarker im Blut, über Blutdruck und Herzfrequenz, Krafttests, die wahrgenommene Anstrengung und viele weitere Parameter widerspiegelt werden. Im Folgenden wird lediglich auf die im Rahmen der Studie angewandten Parameter zur Messung der Leistung eingegangen.

Das American College of Sports Medicine (ACSM) definiert etwa Intensitätskategorien „leicht“, „mäßig“ und „stark“ auf Grundlage von Prozentsätzen der Herzfrequenzreserve (HRR), der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO₂max), des metabolischen Äquivalents (METs) oder der Bewertung der wahrgenommenen Anstrengung (engl. Rating of Perceived Exertion = RPE) auf einer 20-Punkte-Skala. Zusätzlich legt das ACSM die Kategorien „sehr leicht“ und „nahezu maximal bis maximal“ mit entsprechenden relativen und absoluten Schwellenwerten fest, die unter bzw. über den drei erstgenannten Kategorien liegen (Liguori et al., 2022).

Hochintensives Intervalltraining bewegt sich in den beiden Kategorien „stark“ und „nahezu maximal bis maximal“. Erstere geht mit einer RPE von 14-17 von möglichen 20 RPE einher, was einer maximalen Herzfrequenz (HFmax) von 77-95%, einer HRR von 60-89% und einer VO₂max von 64-90% entspricht. Belastungen ab dieser Kategorie werden von der zweiten Laktatschwelle (LT₂), dem maximalen Laktat-Steady-State (MLSS) oder dem Laktat-Turnpoint (LTP) nach unten abgegrenzt. Darüber hinaus wird die Kategorie „nahezu maximal bis maximal“ mit ≥ 18 von 20 RPE, $\geq 95\%$ HFmax, $\geq 90\%$ HRR und einer VO₂max von $\geq 91\%$ beschreiben (Coates et al., 2023; Liguori et al., 2022).

Der RPE erweist sich als äußerst hilfreicher Indikator für die Intensität von hochintensivem Intervalltraining, da sich die Erhebung als besonders einfach und praktisch erweist und vielseitig angewendet werden kann. Coates et al. (2023) merken jedoch an, dass die subjektiv wahrgenommene Anstrengung vor allem bei kurzen Intervalltrainingseinheiten mit sehr hoher Intensität gewisse Limitationen aufweisen kann.

In diesem Kontext ist es für die Umsetzung eines hochintensiven Ganzkörper Krafttrainingszirkeltrainings (HIIT), wie es in der vorliegenden Studie durchgeführt wurde, wichtig, die individuelle Maximalkraft der Testpersonen zu eruieren.

Die Maximalkraft wird als die größtmögliche Kraft definiert, die ein Muskel oder eine Muskelgruppe willkürlich gegen einen Widerstand ausüben kann. Sie stellt einen zentralen Parameter im Krafttraining dar und dient sowohl der Leistungsbewertung als auch der Trainingssteuerung (Gail et al., 2015). Die Maximalkraft wird häufig als Einwiederholungsmaximum (1RM = engl. Repetition Maximum) gemessen, welches die maximale Last in Kilogramm angibt, die einmal überwunden werden kann. Hierfür kommen standardisierte Hantelscheiben oder ein elektrischer Dynamometer zum Einsatz (Pauls, 2011). Im Rahmen der Studie wurde zur Ermittlung der individuellen Trainingsgewichte der Probandinnen vor dem ersten Interventionstag ein 5-RM-Maximalkrafttest durchgeführt. Dieser misst das höchstmögliche Gewicht, welches eine Person fünfmal korrekt ausführen

kann. Es handelt sich hierbei um eine Alternative zum 1-RM-Krafttest, insbesondere im Gesundheits- und Fitnesssport, da er weniger belastend und sicher ist. Der 5-RM-Krafttest stellt ein zusätzliches Instrument zur Leistungsbewertung und Festlegung der Trainingsintensität dar (Gail et al., 2015).

Ein weiterer Ansatz zur Messung der Leistung im Krafttraining besteht darin, die reaktive Sauerstoffspezies (ROS) zu messen, welche bei intensivem Training durch oxidativen Stress freigesetzt werden.

ROS-Messungen können indirekt über Biomarker wie Malondialdehyd (MDA), Superoxid-Dismutase (SOD) und Glutathionperoxidase (GPx) erfolgen. Diese Biomarker können im Blut, Urin sowie in Muskelbiopsieproben gemessen werden. In der für diese Masterarbeit angewandten Studie wurden ROS mittels Elektronenspinresonanz (EPR) ermittelt. Bei der EPR-Spektroskopie interagieren Elektronen mit einem äußeren Magnetfeld und erzeugen charakteristische Signale, die durch den Paramagnetismus der ROS entstehen. Durch die Analyse dieser Signale können Informationen über Konzentration, Art und Reaktivität der ROS erhalten werden. Die EPR-Spektroskopie ermöglicht eine direkte Messung von ROS in Echtzeit und bietet Einblicke in die oxidative Stressreaktionen und ihre Auswirkungen auf zellulärer Ebene (Dikalov et al., 2018).

Zusammenfassend gibt es viele verschiedene Parameter zur Messung der Leistung bei Krafttraining kombiniert in hochintensivem Intervalltraining, wobei PRE und die Messung von ROS im Blut für die Analyse in der durchgeführten Studie angewandt wurden.

1.2.4 Sportphysiologisch relevante Unterschiede zwischen Männern und Frauen

In einer aktuellen Übersichtsarbeit von Hunter et al. (2023) haben es sich die Autoren und Autorinnen zur Aufgabe gemacht, eine Konsenserklärung zu erstellen, welche die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse und Mechanismen für die geschlechtsspezifischen Unterschiede in der sportlichen Leistung darstellt. In ihrer Arbeit gingen sie auf die anatomischen und physiologischen Unterschiede zwischen Männern und Frauen ein, die für die geschlechtsspezifischen Unterschiede in sportlicher Leistung und der Reaktion auf körperliches Training ausschlaggebend sind. Zudem thematisierten sie die Rolle der Sexualsteroidhormone Testosteron und Östradiol. Im Rahmen ihrer Forschung konnten sie folgende immer wiederkehrende, wissenschaftlich fundierte Ergebnisse bestätigen:

Männliche Athleten zeigen in der Regel eine höhere sportliche Leistung als weibliche Athletinnen in Sportarten und Aktivitäten, die eine aerobe Ausdauer, Muskelkraft, Kraft und

Geschwindigkeit erfordern. Dies ist auf die biologischen Unterschiede zwischen Männern und Frauen zurückzuführen, die zu einer etwa 10% bis 30%igen Geschlechterdifferenz in der sportlichen Leistung führen. Die Größenordnung dieser Differenz ist jedoch von den Anforderungen der jeweiligen Sportart und den beteiligten biologischen Systemen abhängig. Die Unterschiede sind insbesondere in Sportarten ausgeprägt, welche auf muskuläre Kraft angewiesen sind, wie beispielsweise Gewichtheben und Sprungdisziplinen (Hunter et al., 2023).

Die Leistungsunterschiede zwischen den Geschlechtern manifestieren sich erstmals mit Beginn der Pubertät, konkret um das zwölfte Lebensjahr. Sie fallen mit dem Anstieg der körpereigenen Sexualsteroidhormone zusammen, insbesondere des Testosterons bei Männern. Dieses steigt bis zum Erwachsenenalter um das 30-fache an und ist 15-mal höher als bei erwachsenen Frauen. Vor der Pubertät ist der Geschlechterunterschied minimal (Hunter et al., 2023).

Die direkten und indirekten Auswirkungen von Testosteron auf die sportliche Leistung bei Männern während der Pubertät im Vergleich zu Frauen sind vielfältig. Dazu gehören ein geringerer Körperfettanteil, eine höhere Hämoglobinkonzentration und -masse, größere Lungen und Atemwege, sowie eine größere ventrikuläre Masse und Herzmuskelkontraktilität, längere Gliedmaßen und eine größere Körpergröße. Männer weisen daher im Durchschnitt eine um 5% bis 10% höhere maximale Sauerstoffaufnahme (VO₂max) als Frauen auf. Zudem besitzt das männliche Geschlecht eine größere Skelettmuskelmasse aufgrund der erhöhten Muskelfaserquerschnittsfläche, insbesondere der schnellen Typ-II-Fasern (Hunter et al., 2023).

Männer und Frauen weisen ähnliche spezifische Kraft und Leistung bei Muskelfasern vom Typ I und Typ II auf. Allerdings weisen Typ-II-Fasern eine höhere maximale Verkürzungsgeschwindigkeit auf und kontrahieren somit schneller. Frauen besitzen im Allgemeinen einen größeren Anteil an Typ-I-Fasern. Ihre Muskeln kontrahieren weniger schnell, was zu einer höheren Ermüdungswiderstandsfähigkeit führt (Hunter et al., 2023).

Das Sexualhormon Östradiol, welches vor allem dem weiblichen Geschlecht zugutekommt und zyklusabhängigen Schwankungen unterliegt, besitzt nicht die gleiche anabole Wirkung wie Testosteron, ist jedoch essenziell für die Aufrechterhaltung der Körperzusammensetzung, einschließlich der Skelettmuskulatur, Knochen- und Fettmasse sowie des Proteinstoffwechsels von Sehnen und Bändern (Hunter et al., 2023).

Hunter et al. (2023) betonen, dass sowohl bei früheren als auch bei aktuellen Forschungsstudien zu sportlicher Leistung, akuter Belastung und körperlichem Training

mehr Männer als Frauen getestet wurden, oder nicht zwischen den Geschlechtern unterschieden wurde. Folglich ist weniger über die Physiologie der Athletinnen, die Grenzen ihrer sportlichen Leistungsfähigkeit und die akute und adaptive Reaktion von Frauen auf Bewegung und Training im Vergleich zu Männern bekannt.

Ein möglicher Grund dafür könnte die Komplexität der Zyklusschwankungen bei Frauen, aber auch die Verwendung hormoneller Verhütungsmittel sein. Die Schwierigkeit, diese Faktoren zu berücksichtigen und in Studien zu kontrollieren, führt wahrscheinlich dazu, dass weniger Frauen in sportwissenschaftlichen Untersuchungen einbezogen werden.

1.2.5 Östrogen und Leistungsfähigkeit

Östrogene beeinflussen nicht nur die weibliche Fortpflanzung und den Menstruationszyklus, sondern haben auch vielseitige Auswirkungen auf den gesamten Organismus.

Sie weisen antioxidative Wirkmechanismen auf, wodurch möglicherweise in weiterer Folge das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen gesenkt werden kann (Xiang et al., 2021). Es stellt sich jedoch die Frage, ob und inwiefern Östrogen auch die Leistungsfähigkeit bei hochintensivem Krafttraining beeinflusst. Eine mögliche Kausalität diesbezüglich wird in einem späteren Abschnitt dargelegt, welcher sich mit oxidativem Stress und Sauerstoffradikalen beschäftigt.

In der bisherigen Forschung beschäftigten sich verschiedenste Studien mit dem Einfluss zyklischer Schwankungen des Östrogenspiegels auf die Leistungsfähigkeit von Frauen im Kontext Krafttraining. Colenso-Semple et al. (2023) machten es sich deshalb zum Ziel ihrer Übersichtsarbeit, die Evidenz verschiedener Metaanalysen und systematischen Reviews zum Einfluss der Menstruationsphase auf die akute Leistungsfähigkeit und die chronische Adaptation an Krafttraining zu untersuchen und kritisch zu bewerten. Ihrer Untersuchung nach spiegeln die eingeschlossenen Arbeiten zu den angeblichen Auswirkungen der weiblichen Geschlechtshormone auf relevante Aspekte des Widerstandstrainings, einschließlich Kraft, Trainingsleistung und Hypertrophie sehr unterschiedliche Resultate wider. Zwei Metaanalysen und eine systematische Übersichtsarbeit kommen zu dem ähnlichen Ergebnis, dass Aufgrund der nahezu vernachlässigbaren Effektgrößen, der großen Variabilität zwischen den Studien und der großen Anzahl von Studien mit geringer Qualität, keine allgemeinen Empfehlungen in Bezug auf den Menstruationszyklus und Leistungsfähigkeit gegeben werden können und sollten (Blagrove et al., 2020; McNulty et al., 2020; Meignié et al., 2021). Ebenso kritisieren Thompson et al. (2020) in ihrer systematischen Übersichtsarbeit, dass die von ihnen untersuchten Artikeln

widersprüchliche Ergebnisse liefern und häufig durch eine geringe Teilnehmerinnenzahl und methodische Probleme eingeschränkt sind. Dennoch lassen sich aus den vorliegenden Daten gewisse Schlussfolgerungen ziehen, die darauf hindeuten, dass weibliche Hormone die Reaktionen auf das Krafttraining beeinflussen können. Beispielsweise schildern Haines et al. (2018) in ihrer Studie, dass die ER- α -Aktivierung der Skelettmuskulatur als Reaktion auf eine exzentrische Belastung die mit der Myogenese zusammenhängende Genexpression hochreguliert und zwar unabhängig der wechselnden Serum-Östradiol, die während des Menstruationszyklus auftreten.

In Bezug auf die sportliche Leistungsfähigkeit kann Östrogen eine Rolle bei der Regulation der Körperzusammensetzung spielen. In Studien konnte nachgewiesen werden, dass Östrogen den Fettstoffwechsel beeinflusst und somit einen Einfluss auf die Energiebereitstellung während des Trainings ausübt (Hunter et al., 2023; Ikeda et al., 2019).

Des Weiteren kann Östrogen eine Rolle bei der Anpassungs- und Erholungsfähigkeit der Muskeln nach anstrengender körperlicher Betätigung oder chemischer Schädigung spielen und somit die Muskelregeneration nach dem Training unterstützen. Diese Wirkung ist höchstwahrscheinlich auf die regulierende und schützende Wirkung auf die Anzahl und Funktion der Satellitenzellen zurückzuführen, die voraussichtlich durch den Einfluss auf die zelluläre Apoptose entsteht (Pellegrino et al., 2022).

Darüber hinaus berichten unter anderem Pellegrino et al. (2022), dass Östrogen Auswirkungen auf die Knochengesundheit hat, was besonders relevant für Sportarten ist, welche eine starke Belastung der Knochen mit sich bringen. Östrogenmangel erhöht das Risiko von Osteoporose, was wiederum die sportliche Leistungsfähigkeit beeinträchtigen kann.

Obgleich diese Erkenntnisse gewisse Fortschritte darstellen, bleiben dennoch zahlreiche Fragen offen, insbesondere im Hinblick auf die genauen Mechanismen, durch welche Östrogen die sportliche Leistungsfähigkeit beeinflusst, sowie auf die individuelle Variation der Reaktionen von Östrogen. Um ein umfassendes Verständnis für die Rolle von Östrogen in der sportlichen Leistungsfähigkeit von Frauen zu entwickeln, sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich. Dazu gehören Längsschnittstudien, um die langfristigen Effekte von Östrogenschwankungen auf die Leistungsfähigkeit und Anpassung an Krafttraining untersuchen zu können, sowie die Erhöhung der Stichprobengröße und die Einbeziehung einer breiteren demografischen Vielfalt, um repräsentative und generalisierbare Ergebnisse zu erhalten. Eine weitere wesentliche Maßnahme ist die Förderung einer engen interdisziplinären Zusammenarbeit von Expertinnen und Experten

aus den Bereichen der Sportwissenschaft, Endokrinologie, Genetik und Ernährungswissenschaft. Nur durch eine solche Zusammenarbeit kann die Rolle von Östrogen in einem ganzheitlichen Kontext erforscht werden.

1.3 Oxidativer Stress

In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt eine Auseinandersetzung mit der Entstehung und den physiologischen Auswirkungen von Sauerstoffradikalen (engl. Reactive Oxygen Species = ROS) sowie oxidativem Stress im menschlichen Körper. Dabei werden auch jene Mechanismen thematisiert, welche diesen Stress bekämpfen. Des Weiteren werden die Bedeutung von oxidativem Stress bei intensivem Krafttraining sowie mögliche geschlechtsspezifische Unterschiede, insbesondere in Bezug auf den Östrogenspiegel, näher erörtert.

1.3.1 Entstehung von Sauerstoffradikale ROS

Sauerstoffradikale, auch reaktive Sauerstoffspezies (engl. Reactive Oxygen Species = ROS) werden im menschlichen Körper im Rahmen physiologischer Stoffwechselprozesse, primär während der Zellatmung in den Mitochondrien, gebildet. Die Sauerstoff-enhaltenden Moleküle besitzen eine hohe chemische Reaktionsbereitschaft und entstehen durch die Aufnahme von Elektronen durch den Sauerstoff. Während dieses Prozesses wird ein Teil des Sauerstoffes zu Superoxidanionen und Wasserstoffperoxid umgewandelt, beide sind ROS. Superoxidanionen (O_2^-) und Wasserstoffperoxid (H_2O_2) spielen eine wichtige Rolle bei der Signalübertragung im Gehirn. ROS entstehen aber auch im Rahmen der Immunabwehr. Hier ist die Aktivität der Enzyme NADPH-Oxidase und Xanthinoxidase von Bedeutung. Beide Enzyme kommen in verschiedenen Zelltypen vor und tragen zur Bildung von ROS bei. Sie reagieren zum Beispiel auf äußere Reize und helfen bei der Bekämpfung von Bakterien, Viren und Parasiten. Zudem bestehen ROS auch in exogenen Quellen wie UV-Strahlung, Zigarettenrauch, Umweltverschmutzung und chemischen Toxinen. Sauerstoffradikale entstehen also während normaler Stoffwechselprozesse und spielen eine wichtige Rolle bei der Zellsignalisierung, der Immunantwort und anderen zellulären Funktionen. Allerdings können hohe ROS-Level auch zu oxidativem Stress führen. Durch intensive körperliche Aktivität steigen Sauerstoffradikale im Blut an und bei chronisch erhöhten ROS-Werten steigt das Risiko für DNA-Schädigung und chronische Erkrankungen (DocCheck, o. J.; Powers et al., 2020; Powers & Jackson, 2008).

1.3.2 Oxidativer Stress

Der menschliche Körper produziert während seiner täglichen Stoffwechselprozesse ständig freie Sauerstoffradikale. Von diesen sind circa 95% ROS, darunter Superoxidanionen (O_2^-), Wasserstoffperoxid (H_2O_2), freie Hydroxylradikale ($-OH$) und Peroxynitrit ($ONOO^-$). Normalerweise stehen das oxidative System des Körpers und dessen antioxidative Abwehrsystem in einem dynamischen Gleichgewicht. Wird dieses Gleichgewicht gestört, kommt es zu pathologischen Schäden. Dieser Prozess wird als oxidativer Stress bezeichnet (Xiang et al., 2021).

1.3.3 Physiologische Auswirkungen von oxidativem Stress

Wie bereits angeführt, gehört die mitochondriale Atmungskette zu der Hauptquelle für ROS. Wenn die Mitochondrien keine normale oxidative Phosphorylierung durchführen können, werden vermehrt ROS produziert. Die erzeugten ROS schädigen Organellen wie die Mitochondrien und die Zellmembran sowie die DNA, Proteine und Lipide der Organellenkomponenten, was schließlich zum Zelltod führt. Dadurch erhöht sich wiederum die Produktion mitochondrialer ROS und ein Teufelskreis entsteht. Langanhaltender oxidativer Stress ist mit der Entstehung und Progression verschiedener Krankheiten verbunden, darunter Krebs, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, neurodegenerative Erkrankungen und Diabetes. Durch Schädigung der DNA wird beispielsweise das Risiko von Mutationen und genetischen Veränderungen erhöht, welche wiederum das Krebsrisiko erhöhen können. In Zusammenhang mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen können andauernd erhöhte ROS-Werte schließlich zur Störung der Gewebezellen führen, wie zum Beispiel eine Dysfunktion der Endothelzellen, Vaskulitis und der Anhäufung von Low-Density-Lipoprotein (LDL) an der Arterienwand (Powers et al., 2020; Powers & Jackson, 2008; Xiang et al., 2021).

ROS gelten allerdings nicht ausschließlich als potenziell schädliche Stoffwechselprodukte. Sie dienen auch als Botenstoffe zur Regulierung von Zellwachstum und Apoptose (Zelltod), indem sie bei der Beseitigung von beschädigten oder nicht mehr funktionsfähigen Zellen fungieren, da sie den programmierten Zelltod, durch einen gezielten Anstieg freier Radikale regulieren können (Xiang et al., 2021). Neben der Aktivierung von Signalwegen kann in geringen Mengen auftretender oxidativer Stress zu Hormesis führen und adaptive Abwehrmechanismen stimulieren, was wiederum zu einer gesteigerten Widerstandsfähigkeit des Körpers gegenüber zukünftigem Stress führen kann. Des Weiteren kann ein moderates Maß an oxidativem Stress die Genexpression antioxidativer Enzyme und Moleküle erhöhen, was zu einer verstärkten antioxidativen Abwehr führt. Dies

kann langfristig zu einem verbesserten Schutz vor oxidativem Stress und den damit verbundenen Krankheiten führen (Powers et al., 2020; Powers & Jackson, 2008).

1.3.4 Wirkmechanismen gegen oxidativen Stress

Um sich gegen oxidativen Stress zu schützen, wirkt ein gut organisiertes System von Antioxidantien im menschlichen Körper. Das intrazelluläre antioxidative Abwehrsystem umfasst Superoxid Dismutasen (SOD), Katalase (CAT), Glutathionperoxidasen (GPx) und andere nicht-enzymatische Antioxidantien wie reduziertes Glutathion (GSH), Harnsäure oder Bilirubin. Des Weiteren stehen dem menschlichen Organismus über die Nahrung aufnehmbare Antioxidantien wie Vitamin C, Vitamin E, β -Carotin sowie sekundäre Pflanzenstoffe (Flavonoide) zur Verfügung. Antioxidantien können die Bildung von ROS hemmen oder die durch ROS verursachten Schäden reduzieren (Xiang et al., 2021). Zum Beispiel wandelt der Wirkstoff Katalase die ROS in weniger aktive Moleküle um und verhindern dadurch die Umwandlung dieser weniger aktiven Spezies in eine schädlichere Form (Powers & Jackson, 2008).

Zudem besitzt Östrogen eine schützende Wirkung gegen oxidativen Stress, indem es verschiedene Mechanismen beeinflusst. Einerseits reduziert Östrogen die Bildung von ROS und erhöht dessen Abbau. Dies geschieht beispielsweise durch die Regulierung der Expression von Enzymen wie den NADPH-Oxidasen, die eine Hauptquelle für ROS darstellen. Östrogen kann die Ausprägung der Untereinheiten von NADPH-Oxidasen reduzieren und dadurch die Produktion von Superoxidanionen (O_2^-) hemmen. Zudem erhöht Östrogen die Expression und Aktivität von antioxidativen Enzymen wie Superoxid Dismutase (SOD), Glutathionperoxidasen (GPx) und Glutathion-Synthaseenzymen (GSH), die ROS neutralisieren und die Zellschädigung verhindern. Stickstoffmonoxid (NO) hat eine direkte antioxidative Wirkung und trägt zur Aufrechterhaltung der vaskulären Funktion und der Gefäßgesundheit bei. Östrogen erhöht die Aktivität des Enzyms der Endothelstickstoffmonoxid-Synthase (eNOS) und steigert die Produktion von NO aus den Endothelzellen (Kander et al., 2017; Xiang et al., 2021).

1.3.5 Oxidativer Stress und (intensives) Krafttraining

Oxidativer Stress entsteht, wenn die ROS-Konzentration die körpereigenen Abwehrkapazitäten übersteigt. Regelmäßige körperliche Aktivität führt zu gesundheitlichen Vorteilen, während intensive oder langanhaltende körperliche Betätigung zu einem akuten Anstieg der ROS-Produktion führt, wie durch erhöhte Biomarker für oxidative Schäden im Blut und in der Skelettmuskulatur belegt ist. Die Tatsache, dass Muskeltraining oxidativen Stress fördert, erscheint paradox, da regelmäßiges Training das einzige

Gesundheitsverhalten ist, das mit einem Rückgang der Gesamtmortalität beim Menschen in Verbindung gebracht wird. Obwohl sportinduzierter oxidativer Stress kurzfristig Anpassungsmechanismen auslösen kann, besteht bei anhaltender Dysbalance die Gefahr einer Beeinträchtigung der Enzymfunktion, einer Schwächung des Immunsystems und einer damit einhergehenden erhöhten Wahrscheinlichkeit chronischer Erkrankungen (Powers et al., 2020).

Muskelzellen enthalten sowohl enzymatische als auch nicht-enzymatische Antioxidantien, die als komplexe Einheit zusammenwirken, um ROS zu regulieren. Innerhalb der Faser sind diese Antioxidantien strategisch im gesamten Zytoplasma und innerhalb verschiedener Organellen, zum Beispiel den Mitochondrien, aufgeteilt. Darüber hinaus existieren enzymatische und nicht-enzymatische Antioxidantien sowohl im extrazellulären als auch im vaskulären Raum. Kollektiv schützen diese Antioxidantien die Muskelzellen vor oxidativem Schaden während Phasen erhöhter ROS-Produktion, wie bei intensivem oder langanhaltenden Training (Powers & Jackson, 2008). Die intrazellulären Orte der ROS-Produktion in der kontrahierenden Skelettmuskulatur sind nach wie vor ein aktives Forschungsgebiet. Es gibt immer mehr Hinweise darauf, dass NADPH eine wichtige Quelle für die ROS-Produktion während des Trainings darstellt (Powers et al., 2020; Xiang et al., 2021).

Zudem zeigt die Forschung, dass oxidativer Stress eine komplexe Rolle bei der Signalübertragung spielt und verschiedene physiologische Prozesse beeinflussen kann, einschließlich Hypertrophieeffekten und Trainingsanpassungen. ROS können als Signalmoleküle wirken und verschiedene zelluläre Prozesse regulieren, einschließlich der Genexpression, die für die Anpassung an Trainingseinheiten wichtig ist (Di Meo et al., 2019). Moderate Mengen an oxidativem Stress können zum Beispiel den mTOR-Signalweg (mechanistic Target of Rapamycin) aktivieren, was zu einer verstärkten Proteinsynthese und Muskelhypertrophie führen kann (Powers et al., 2020).

Der Körper reagiert auf oxidativen Stress, indem er seine antioxidativen Verteidigungsmechanismen verstärkt. Eine angemessene Menge an oxidativem Stress, ausgelöst durch intensives Krafttraining, kann die Expression antioxidativer Enzyme erhöhen, was langfristig zu einer verbesserten Trainingsanpassung, einer erhöhten Muskelhypertrophie und einer verringerten Schädigung durch oxidativen Stress führen kann (Di Meo et al., 2019; Powers et al., 2020).

Die Folgen des trainingsinduzierten oxidativen Stresses sind nach wie vor ein kontrovers diskutiertes Thema. Theoretisch ist die trainingsinduzierte ROS-Produktion ein

zweischneidiges Schwert, wobei ein moderates Maß an ROS-Produktion während des Trainings eine positive physiologische Anpassung in der aktiven Skelettmuskulatur fördert (mitochondriale Biogenese, Synthese von antioxidativen Enzymen und Stressproteinen), während ein hohes Maß an ROS-Produktion zu einer Schädigung makromolekularer Strukturen wie Proteine, Lipide und DNA führt (Powers et al., 2020). Festzuhalten gilt, dass die Menge und Dauer des oxidativen Stresses sowie die individuelle Anpassungsfähigkeit des Körpers eine entscheidende Rolle spielen. Übermäßig oxidativer Stress kann die Muskelkontraktion während des Trainings beeinträchtigen, aber auch die Regenerationsprozesse zwischen Trainingseinheiten verlängern und die Trainingsleistung vermindern (Di Meo et al., 2019; Powers et al., 2020).

Zudem wird auch das Geschlecht mit Unterschieden im oxidativen Stress in Verbindung gebracht. Unter physiologischen Bedingungen scheinen Frauen weniger anfällig für diesen zu sein. Dies könnte auf die antioxidativen Eigenschaften von Östrogen, geschlechtsspezifische Unterschiede in der NADPH-Oxidase-Aktivität oder andere noch zu definierende Mechanismen zurückzuführen sein (Kander et al., 2017). Der Östrogenspiegel kann demnach möglicherweise schützende Effekte im Kontext von hochintensivem Krafttraining bei Frauen haben.

Die vorliegende Masterarbeit soll beleuchten, wie sich hochintensives Krafttraining auf den Hormonstatus der Frau auswirkt und welchen spezifischen Einfluss der Östrogenspiegel auf die Leistungsfähigkeit mit sich bringt.

1.4 Gründe der Untersuchung

Der Zusammenhang zwischen Östrogen und der Leistungsfähigkeit während hochintensiven Krafttrainings wurde in der bisherigen Forschung nur unzureichend behandelt. Frühere Forschungsergebnisse liefern gemischte Erkenntnisse über den Einfluss von Östrogen auf die Leistungsfähigkeit im Krafttraining.

Einige Studien deuten darauf hin, dass ein hoher Östrogenspiegel mit verbesserten Anpassungsmechanismen nach Krafttraining assoziiert ist und somit einen Vorteil für Sportlerinnen mit sich bringen kann. Powers et al. (2020) weisen darauf hin, dass oxidative Stressreaktionen während körperlicher Aktivität auftreten können und muskuläre Anpassungen beeinflussen können. Es wird angenommen, dass Östrogen hier eine schützende Wirkung haben könnte, was wiederum für die Leistungsfähigkeit relevant ist.

Untermuert werden kann diese Annahme mit der Arbeit von Xiang et al. (2021), welche die schützende Wirkung von Östrogen in Bezug auf Herz-Kreislauf-Erkrankungen durch die Reduktion von oxidativem Stress betonen. Sie beschreiben, dass eine wichtige Beziehung zwischen dem Geschlecht und oxidativem Stress besteht. Dafür ziehen sie eine Studie von Barp et al. (2002) heran, welche zeigt, dass männliche Ratten ein höheres Maß an oxidativem Stress aufweisen als weibliche Ratten. Eine andere In vivo-Studie bestätigt, dass junge Männer höhere biochemische oxidative Stressmarker aufweisen als gleichaltrige Frauen (Kander et al., 2017). Zudem belegen klinische und experimentelle Daten, dass Frauen ein größeres antioxidatives Potenzial haben als Männer (Reckelhoff et al., 2019).

Zusammenfassend sind Frauen weniger anfällig für oxidativen Stress und verfügen über ein stärkeres antioxidatives Stresspotenzial als Männer, was wiederum zeigt, dass ein enger Zusammenhang zwischen weiblichem Östrogen und Antioxidantien besteht. Ob der Östrogenspiegel wiederum Einfluss auf die Leistungsfähigkeit junger inaktiver Frauen hat, wurde nicht analysiert.

Diesbezüglich gibt es nach wie vor Kontroversen und Unsicherheiten, die weiterer Untersuchungen bedürfen. Colenso-Semple et al. (2023) liefern interessante Einblicke in den Einfluss des Menstruationszyklus auf die akute Kraftleistung oder die Anpassung an Widerstandstraining. Sie betonen, dass es keine überzeugenden Beweise dafür gibt, dass zyklische Schwankungen der weiblichen Geschlechtshormone einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben. Zudem kritisieren die Autoren die oft unzureichende Methodologie in der bestehenden Literatur. Sie betonen die Notwendigkeit, die Qualität der methodischen Ansätze in Studien zu verbessern, um zuverlässige Schlussfolgerungen über den Einfluss des Menstruationszyklus auf die Leistungsfähigkeit und muskuläre Anpassungen zu ziehen.

1.5 Ziele der Untersuchung

Das Hauptziel dieser Masterarbeit ist die systematische Analyse der Auswirkungen des weiblichen Sexualhormons Östrogen auf die Leistungsfähigkeit bei jungen, inaktiven Frauen während hochintensivem Krafttraining. Konkret sollen Zusammenhänge zwischen dem Östrogenspiegel, adaptiven Reaktionen auf das Krafttraining und der erzielten Trainingsleistung hergestellt werden. Zur Analyse werden Blutproben sowie die erbrachten Trainingsleistungen der Probandinnen herangezogen.

Die, in Zusammenhang mit der Masterarbeit stehend, durchgeführte Studie bietet mehrere Ansätze, welche zur Klärung des Östrogeneinflusses auf hochintensives Krafttraining herangezogen werden können:

1.5.1 Untersuchung von oxidativem Stress

In der durchgeführten Studie werden oxidative Stressparameter wie ROS (reactive oxygen species) und Malondialdehyd (MDA) analysiert. Da Östrogen, wie bereits erörtert, als schützend für das Herz-Kreislauf-System betrachtet wird, kann spekuliert werden, dass der antioxidative Effekt von Östrogen, den durch hochintensives Krafttraining entstehenden oxidativen Stress mindert.

1.5.2 Messung von 17-Beta-Östradiol E2

Durch die Untersuchung des Hormonstatus, insbesondere von 17-Beta-Östradiol E2 im Serum, welches zu den wichtigsten Östrogenen gehört, kann dieses Forschungsprojekt wesentlich dazu beitragen, den Zusammenhang zwischen Östrogenspiegel, Krafttrainingsleistung und Regeneration umfassender als bislang bekannt zu verstehen. Ein höherer Östrogenspiegel könnte möglicherweise mit einer besseren Leistung in Verbindung stehen.

1.5.3 Einfluss auf die Stressreaktion nach dem Training

Das Forschungsvorhaben der durchgeführten Studie zielt in erster Linie darauf ab, den Einfluss von verschiedenen Getränken auf die Stressreaktionen nach einem als Zirkeltraining durchgeführten, hochintensiven Krafttraining, zu verstehen. Ein höherer Östrogenspiegel könnte eine beeinflussende Rolle auf die Stressreaktion haben und die Auswahl antioxidativ wirkender Getränke könnte diesen Effekt unterstützen.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass diese Ansätze auf einer Hypothese basieren, da die durchgeführte Studie nicht spezifisch auf den Einfluss von Östrogen abzielt, jedoch Östrogen neben dem Lebensmitteleinfluss ein Hauptuntersuchungsgegenstand ist. Die angewandten Methoden und Parameter bieten somit eine Grundlage, um mögliche Zusammenhänge zwischen dem Östrogenspiegel und der Leistungsfähigkeit junger, inaktiver Frauen bei hochintensivem Krafttraining zu erforschen.

2 Methoden

Im folgenden Abschnitt wird die Methodik zur Durchführung, der für die Masterarbeit angewandten Studie, detailliert beschrieben. Dabei wird auf das gewählte Studiendesign, sowie das Probandinnenkollektiv und deren Ein- und Ausschlusskriterien näher eingegangen. Fernerhin werden die angewandten Verfahren der Studie erläutert.

2.1 Studiendesign

Die Studie wurde 2022 als randomisierte, kontrollierte, Cross-over Interventionsstudie im Studienzentrum „Nutrition and Training Laboratory“ (NuTraLab, Universität Wien, Zieglergasse 6, 1070 Wien) durchgeführt.

Die Studie zielt darauf ab, den Einfluss verschiedener Getränke auf oxidative Stress- und Entzündungsreaktionen nach einem intensiven Krafttrainingszirkel zu untersuchen. Dabei wurden Grüntee (Matcha), Kaffee, Granatapfelsaft, Orangensaft, fettarme Kuhmilch, ein zuckerhaltiges Getränk (jeweils 250 mL) sowie 250 mL Leitungswasser als Kontrolle zwei Stunden vor einem HIIT Krafttrainingszirkeltraining eingenommen. Die Getränke wurden in iso-kalorischen, verzehrüblichen Portionen verabreicht, mit Ausnahme von Grüntee und Kaffee.

Für die Fallzahlschätzung wurde eine Pilotstudie von Zeng et al. (2020) herangezogen, in welcher jeweils 17 von 34 Probandinnen Haferflocken und Milch vor einem HIIT-Krafttraining konsumierten und 17 weitere ausschließlich das HIIT-Krafttraining absolvierten und somit als Kontrolle fungierten. Dabei ergab sich ein signifikant geringerer reaktiver Sauerstoffspezies-Spiegel direkt nach körperlicher Aktivität nach dem Konsum von Haferflocken. Durch eine G-Power Analyse inklusive Sicherheitszuschlag ($n=4$) ergab sich eine Notwendigkeit von 24 Probandinnen pro Interventionstag für die in dieser Masterarbeit angewandte Studie. Das ausgewählte Studiendesign orientiert sich ebenfalls an der bereits erwähnten Arbeit von Zeng et al. (2020).

Am Vortag jeder Intervention wurden die Probandinnen gebeten, auf sportliche Aktivitäten zu verzichten, sowie den Konsum von Alkohol und die Einnahme von Medikamenten und Nahrungsergänzungsmitteln zu vermeiden. Anschließend erschienen die Teilnehmerinnen nach einer zwölfstündigen Nüchternphase morgens im Studienzentrum. Dort nahmen sie zwei Stunden vor jedem Training in zufälliger Reihenfolge eines der vorher festgelegten Getränke zu sich, so dass jedes Getränk einmal konsumiert wurde. Nach einer zweistündigen Ruhephase absolvierten die Teilnehmerinnen unter sportwissenschaftlicher

Anleitung ein hochintensives Ganzkörper Krafttrainingszirkeltraining (HIIT) mit fünf verschiedenen Kraftübungen (Ruderzug, Brustpresse, Beinbeuger, Latzug, Beinpresse).

Um eine ausreichende Regeneration für die Probandinnen zu gewährleisten, fand zwischen den Interventionstagen eine Wash-Out-Periode von mindestens sieben Tagen statt.

Die Eingangsuntersuchung wurde vor dem ersten Interventionstag durchgeführt und umfasste zwei Termine. Im Rahmen des ersten Termins erfolgte eine Messung der Körperzusammensetzung der Teilnehmerinnen sowie die Erhebung eines Fragebogens und einer Einverständniserklärung. Des Weiteren wurde ein Einschulungstraining sowie ein 5-RM (engl. Repetition Maximum) Maximalkrafttest durchgeführt, um die individuellen Trainingsgewichte jeder Probandin zu ermitteln. Am zweiten Tag des Screenings wurde eine Blutabnahme durchgeführt. An jedem der folgenden sieben Studientage betrug das Trainingsgewicht bei jeder Übung 50% der Maximalkraft. Die Studientage selbst waren abgesehen von den unterschiedlichen Getränken vollkommen ident und fanden in randomisierter Reihenfolge statt.

2.1.1 Probandinnenkollektiv

Im Rahmen der durchgeführten Studie wurden bestimmte Ein- und Ausschlusskriterien festgelegt, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse aussagekräftig sind und mögliche Einflussfaktoren auf die Forschungsergebnisse minimiert werden.

Die teilnehmenden Personen sollten weiblich sein und sich in einem Alter von 18 bis 40 Jahren befinden, um eine homogene Stichprobe zu gewährleisten und mögliche Alters- und Geschlechterunterschiede auszuschließen. Ihr Body-Mass-Index (BMI) liegt zu diesem Zeitpunkt zwischen 18,5 und 25 kg/m² (Normalgewicht), um mögliche Auswirkungen von Adipositas oder Untergewicht auf die Ergebnisse zu minimieren.

Die Teilnehmerinnen sollten bisher kein regelmäßiges Krafttraining (höchstens einmal pro Woche) und keine regelmäßige körperliche Aktivität (höchstens zwei Stunden pro Woche) durchgeführt haben, da Effekte vorheriger Trainingsroutinen und Anpassungen die Ergebnisse möglicherweise beeinflussen könnten. Zudem wurde erwartet, dass die Probandinnen seit mindestens sechs Monaten Nichtraucherinnen seien.

Es sollte keine dokumentierten Unverträglichkeiten gegenüber den in der Studie verwendeten Getränken vorhanden sein, um Störfaktoren bei der Interpretation der Ergebnisse zu vermeiden. Ebenso sollte eine gute Verträglichkeit von Blutabnahmen gegeben sein, da diese im Rahmen der Studie erforderlich waren.

Außerdem mussten die Teilnehmerinnen eine körperliche Belastung, welche ein 30-minütiges Krafttraining umfasst, auf nüchternen Magen tolerieren können.

Das Vorhandensein einer oder mehrerer akuter oder chronischer Erkrankungen galt als Ausschlusskriterium, um sicherzustellen, dass potenzielle Krankheitszustände bei intensiver körperlicher Belastung die Probandin nicht gefährden. Zudem sollte kein Eisen- oder Hämoglobinmangel vorliegen.

Ein weiteres Ausschlusskriterium war die regelmäßige Einnahme von Medikamenten, mit Ausnahme hormoneller Kontrazeptiva, um mögliche Wechselwirkungen mit den zu untersuchenden Interventionen zu minimieren.

Die vorliegenden Ein- und Ausschlusskriterien wurden sorgfältig gewählt. Sie sollten sicherstellen, dass die Studienteilnehmerinnen eine homogene Gruppe darstellen und die Ergebnisse der Studie zuverlässig interpretiert werden können.

Um die Probandinnen für ihren Zeitaufwand entsprechend zu entschädigen, wurde ihnen ein kostenloser medizinischer Gesundheitscheck inklusive umfassender Labortests angeboten. Dieser diente auch dazu, die Gesundheit der Teilnehmerinnen vor Beginn der Studie zu überprüfen und sicherzustellen, dass sie für die Teilnahme geeignet waren. Zusätzlich wurde eine kostenlose Analyse der Körperzusammensetzung mittels bioelektrischer Impedanzanalyse durchgeführt. Eine solche Analyse informiert die Teilnehmerinnen über deren Körperfettanteil, Muskelmasse und andere relevante Parameter. Nach erfolgreichem Abschluss der Studie erhielten die Teilnehmerinnen außerdem eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 175€. Während der gesamten Studiendauer wurden die Teilnehmerinnen von Sport- und Ernährungswissenschaftlern und -wissenschaftlerinnen betreut. Am letzten Studientag erhielten die Probandinnen individuell abgestimmte Trainings- und Ernährungspläne, die speziell auf ihre Bedürfnisse sowie zeitlichen und räumlichen Gegebenheiten zugeschnitten sind. Die Teilnehmerinnen profitierten so auch über das Ende der Studie hinaus von den erworbenen Kenntnissen und Empfehlungen.

Die umfassende Aufwandsentschädigung sollte sicherstellen, dass die Teilnehmerinnen nicht nur angemessen für ihren Einsatz entschädigt werden, sondern auch während der gesamten Studiendauer optimal betreut und unterstützt werden.

2.2 Blutproben und Laborparameter

An jedem der sieben Interventionstage wurden vier Blutproben entnommen, um Entzündungs- und oxidative Stressmarker sowie Sexualhormone zu analysieren. Die Abnahme wurde von entsprechend geschultem, medizinischen Fachpersonal durchgeführt. Die venöse Blutabnahme bedingt einen Einstich der Nadel in die Armvene im Bereich der Armbeuge. Alle Messungen erfolgten unter strenger Einhaltung hygienischer Standards, und alle Proben wurden ordnungsgemäß entsorgt, sobald die entsprechenden Parameter ausgewertet wurden. Die letzte Blutentnahme des Tages fand 15 Minuten nach dem Training statt, um sicherzustellen, dass alle relevanten Daten gesammelt werden konnten. In Abbildung 4 wird der Zeitpunkt der Blutabnahmen sowie die jeweiligen Interventionen grafisch dargestellt und ein Überblick über das Studiendesign geboten.

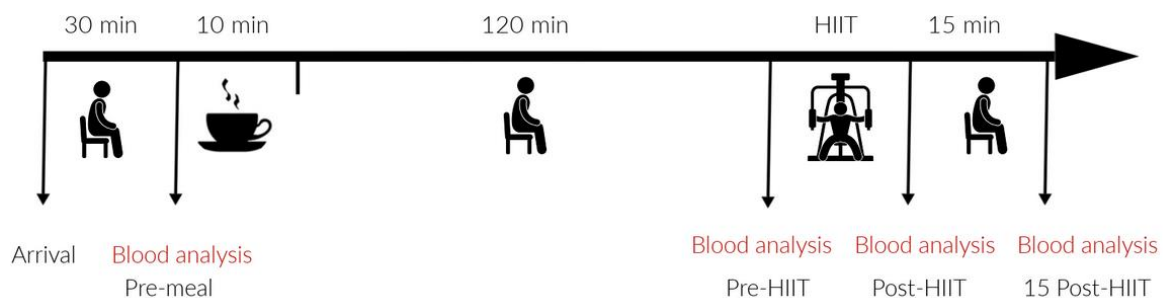


Abbildung 4: Überblick Studiendesign. HIIT: hochintensives Intervalltraining
Quelle: (Gassner, 2024)

Am zweiten Termin der Eingangsuntersuchung wurde den Probandinnen nüchtern Blut entnommen und ein umfassendes metabolisches Profil erstellt, welches Insulin, Glukose, HbA1c, HOMA-IR, Triglyceride, Gesamtcholesterin, HDL-Cholesterin, LDL-Cholesterin und hs-CRP umfasst. Zusätzlich wurden Sicherheitsparameter wie Blutbild, Senkung, Leberwerte (GOT, GPT, γ -GT) und Nierenwerte (Kreatinin, Harnstoff) untersucht. Für die Blutproben wurde Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA) als Gerinnungshemmer verwendet. Die Proben wurden bei -80°C eingefroren und gelagert.

Während der Interventionsphase der Studie wurden die folgenden Parameter aus den Blutproben analysiert:

- ROS (EPR)
- HS-IL6 (ELISA, EDTA-Plasma)
- HS-CRP (ELISA, EDTA-Plasma)
- FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power Assay, EDTA-Plasma)

- Malondialdehyd (EDTA-Plasma)
- Proteincarbonyle (EDTA-Plasma)
- 17 beta Östradiol E2 (Serum)

Für die zugrundeliegende Fragestellung der Masterarbeit, ob der Östrogenspiegel Einfluss auf die Leistungsfähigkeit junger, inaktiver Frauen bei hochintensivem Krafttraining hat, wurden vor allem die Laborparameter ROS, Malondialdehyd und 17 beta Östradiol E2 herangezogen.

2.2.1 Beschreibung der Auswertung der Laborparameter

Die statistische Auswertung der Laborparameter erfolgte mittels SPSS 27 (IBM). Als statistische Methode wurde eine ANOVA (Analysis of Variance) durchgeführt.

Eine ANOVA (Analysis of Variance) ist ein statistisches Verfahren, welches dazu dient, Unterschiede zwischen den Mittelwerten mehrerer Gruppen zu testen. Die Analyse dient der Bestimmung, ob die beobachteten Unterschiede in den Daten statistisch signifikant sind (Field, 2017). Das Signifikanzniveau wurde mit 0,05 festgelegt.

2.3 Beschreibung Krafttrainingszirkel

Die folgende Abbildung 5 präsentiert den Ablauf des in der Studie angewandten Krafttrainingszirkels sowie die Reihenfolge der durchzuführenden Übungen, beginnend mit dem Ruderzug (engl. rowing).

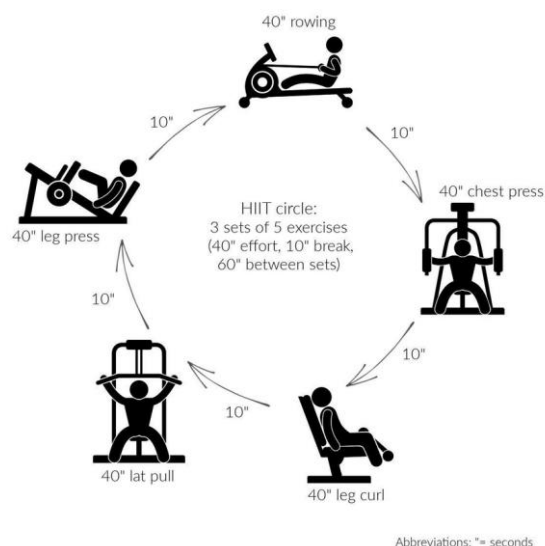


Abbildung 5: Ablauf Krafttrainingszirkel
Quelle: (Gassner, 2024)

Die Studienteilnehmerinnen durchliefen an jedem der sieben Studientage einen spezifischen Krafttrainingszirkel, welcher gezielt verschiedene Muskelgruppen beanspruchen soll und eine adäquate, im Optimalfall hochintensive Belastung hervorruft. Das Krafttrainingszirkeltraining orientierte sich in seinem Aufbau an einem Konzept für hochintensives Intervalltraining (HIIT) im Kraftbereich, welches zuvor von Bizheh et al. (2011) angewandt wurde.

Der Zirkel bestand aus insgesamt fünf unterschiedlichen Übungen, welche aufeinanderfolgend in drei Sätzen zu jeweils 40 Sekunden Belastungszeit durchgeführt wurden. Zwischen den einzelnen Übungen erhielten die Probandinnen eine Pausenzeit von 10 Sekunden, um einen reibungslosen Übergang von einer Übung zur nächsten zu ermöglichen. Nach Abschluss jedes Satzes folgte eine Erholungspause von einer Minute, welche als Regenerationszeit diente, um für den nächsten Satz bereit zu sein.

Um eine standardisierte Trainingsumgebung zu gewährleisten, wurden sämtliche Übungen mithilfe von maschinell geführten Krafttrainingsgeräten ausgeführt, welche eine präzise Kontrolle der Bewegungsausführung und eine gezielte Belastung der Muskulatur ermöglichen. Ziel jeder Übung für die Probandinnen war, ein Maximum an Wiederholungen in jedem Satz durchzuführen. Dabei wurde das Gewicht der Geräte von dem betreuenden Sportwissenschaftler, der betreuenden Sportwissenschaftlerin konstant angepasst, sowohl innerhalb einer Trainingseinheit als auch zwischen den Trainingseinheiten. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Anzahl der Wiederholungen pro Übung und Satz im gewünschten Bereich von circa 20 Wiederholungen bleibt. Falls die Probandinnen diese Zahl deutlich über- oder unterschritten, wurde zur Anpassung der Trainingsintensität das Gewicht entsprechend erhöht oder reduziert.

An jedem Studientag wurde das subjektive Belastungsempfinden der Probandinnen mittels Borg-Skala (Skala von 6-20) erfragt. Dies geschah sowohl vor Beginn des Zirkels als auch unmittelbar nach jedem Satz. Diese protokollierten Informationen ermöglichten eine objektive Bewertung der Belastung und Ermüdung der Teilnehmerinnen während des Trainings.

Vor Beginn des Krafttrainingszirkels absolvierten die Probandinnen gemeinsam mit dem betreuenden Sportwissenschaftler, der betreuenden Sportwissenschaftlerin ein standardisiertes Aufwärmprogramm. Dieses Programm umfasste verschiedene Übungen zur Aktivierung und Mobilisierung der Gelenke (Unterarmkreisen, Hüftkreisen, Kniekreisen usw.) sowie zur Steigerung der Durchblutung und Aktivierung der Muskulatur (Hampelmänner, Kniehebelauf, Seitstütz usw.). Anschließend erfolgte ein

Aufwärmdurchgang an den Krafttrainingsgeräten, bei welchem die Probandinnen die im HIIT-Krafttraining stattfindenden Übungen zwar in gleicher Reihenfolge und Zeit wie im eigentlichen Zirkel durchführten, jedoch mit nur 50% des eigentlichen Trainingsgewichts. Dies diente dazu, die Muskulatur auf das bevorstehende Training vorzubereiten und die Bewegungsmuster zu wiederholen.

Die Übungen des Krafttrainingszirkels wurden stets in der gleichen Reihenfolge (Ruderzug – Brustpresse – Beinbeuger – Latzug – Beinpresse) und in folgender Ausführung durchgeführt:

Ruderzugmaschine:

Die Teilnehmerinnen nehmen eine aufrechte Sitzposition ein, wobei das Gesäß stabil auf dem Sitz bleibt und die Wirbelsäule in neutraler Ausrichtung gehalten wird. Die Schultern werden leicht nach hinten unten gezogen, während die Hände die Griffe etwas unterhalb der Schulterhöhe umfassen.

Während der Durchführung werden die Arme gegen den Widerstand gebeugt, wobei die Ellbogen nach hinten geführt werden und die Schulterblätter nach hinten unten gezogen werden. Anschließend erfolgt eine langsame Streckbewegung der Arme, wobei der Blick gerade und der Nacken in einer neutralen Position gehalten wird. An diesem Gerät wird besonders die Rückenmuskulatur und hintere Schultermuskulatur (m. latissimus dorsi, m. deltoideus pars clavicularis, m. trapezius, m. infraspinatus) beansprucht.

Brustpressmaschine:

Es wird eine aufrechte Sitzposition eingenommen, wobei das Gesäß Kontakt zum Sitz behält und die Wirbelsäule in neutraler Ausrichtung gehalten wird. Die Schultern werden leicht nach hinten unten gezogen, während die Hände die Griffe etwas unterhalb der Schulterhöhe umfassen.

Bei der Durchführung werden die Arme gegen den Widerstand gestreckt und dann kontrolliert gebeugt. Während der gesamten Bewegungsausführung bleiben die Schultern stabil, um die Brustmuskulatur (m. pectoralis major) effektiv zu beanspruchen. Der Blick richtet sich nach vorne, während Rücken und Nacken an die Rückenlehne gedrückt werden.

Beinbeugermaschine:

Die Probandinnen sitzen mit dem Rücken an der Rückenlehne, während beide Beine auf einem Polster auf Höhe der Achillessehne zu etwa 95% gestreckt aufliegen. Der zweite

Polster liegt auf dem Schienbein auf. Das Gesäß bleibt während der Ausführung in Kontakt mit dem Sitz, und die Wirbelsäule befindet sich in Neutralposition.

Während der Durchführung werden die Beine maximal gebeugt, um einen Bewegungsumfang von mindestens 90 Grad zu erreichen und anschließend wieder zu 95% gestreckt. Hier wird vor allem die Muskulatur der hinteren Oberschenkel (m. biceps femoris) belastet.

Latzugmaschine:

Die Teilnehmerinnen nehmen eine aufrechte Sitzposition ein, wobei das Gesäß stabil auf dem Sitz bleibt und die Wirbelsäule in Neutralposition gehalten wird. Die Schultern werden leicht nach hinten unten gezogen, während die Hände schulterbreit im Obergriff an der Latzugstange vor dem Körper platziert sind.

Die Arme werden gegen den Widerstand gebeugt, wobei die Ellbogen nach unten gezogen werden. Die Schultern bleiben während der gesamten Bewegung stabil, um eine effiziente Beanspruchung der Rückenmuskulatur (m. latissimus dorsi, m. trapezius pars ascendens, m. rhomboideus minor, m. rhomboideus major, m. teres major) zu gewährleisten. Die Stange wird bis zum Brustbein gezogen, wobei die Bewegung über die Ellbogen gesteuert wird.

Beinpresse:

Fußgelenke, Knie und Hüftgelenke der Probandinnen befinden sich in einer Linie. Der Rücken und das Gesäß bleiben während der Übungsausführung fest auf der Sitz- bzw. Rückenlehne, während die Füße auf der Platte positioniert sind und die Fußspitzen leicht nach außen zeigen.

Bei der Durchführung drücken die Teilnehmerinnen aus einer Kniewinkelposition von zumindest 90 Grad ihren Körper von der Platte weg, während sie ausatmen und die Bauchmuskulatur anspannen. Es wird vor allem die Oberschenkelmuskulatur (m. quadrizeps femoris, m. biceps femoris) und die Gesäßmuskulatur (m. gluteus maximus) beansprucht.

2.3.1 Beschreibung der Auswertung der Krafttrainingsleistung

Die Auswertung der Krafttrainingsleistung, insbesondere das Trainingsvolumen, wurde durch eine einfache Berechnungsmethode durchgeführt. Die erbrachte Trainingsleistung der Probandinnen wurde anhand des Trainingsvolumens berechnet, welches durch das bewegte Gewicht multipliziert mit der Wiederholungsanzahl jeder Kraftübung definiert war.

$$\text{Last (kg)} \times \text{Wiederholung (WH)} = \text{Trainingsvolumen (kg)}$$

Ein Beispiel für die Berechnung des Trainingsvolumens (kg) bietet folgende Beschreibung:

Bewegt eine Probandin bei der Kraftübung Beinbeuger im ersten Satz eine Last von 35kg zu 23 Wiederholungen, im zweiten Satz zu 22 Wiederholungen und im dritten Satz zu 20 Wiederholungen, wird das Trainingsvolumen der einzelnen Sätze addiert und ergibt das Gesamttrainingsvolumen der jeweiligen Kraftübung.

$$35\text{kg} \times 23 + 35\text{kg} \times 22 + 35\text{kg} \times 20 = 2275\text{kg}$$

In diesem Beispiel bewegt die Probandin an einem Interventionstag ein Gesamttrainingsvolumen von 2275kg bei der Übung Beinbeuger und 4796kg bei der Übung Beinpresse. Bei der Übung Rudern erreicht sie 1336,5kg, Brustpresse 540kg und Latzug 891kg.

Die jeweiligen Ergebnisse der Kraftübungen wurden in drei Kategorien zusammengeführt:

- Upper Body Performance (Rudern + Brustpresse + Latzug)
- Lower Body Performance (Beinbeuger + Beinpresse)
- Total Daily Performance (Upper Body Performance + Lower Body Performance)

Die Probandin erreichte demnach eine Upper Body Performance von 2767,5kg, eine Lower Body Performance von 7071kg und einen Total Daily Performance von 9838,5kg an diesem Tag.

Die statistische Auswertung erfolgte mittels SPSS 27 (IBM). Als statistische Methode wurde eine ANOVA (Analysis of Variance) durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden für die weitere Analyse, kombiniert mit Ergebnissen der Entzündungs- und oxidativer Stressmarker sowie der Sexualhormone, herangezogen.

3 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt der Masterarbeit werden die Ergebnisse der vorliegenden Studie geschildert. Beginnend mit einer statistischen Darstellung der demografischen und anthropometrischen Daten der Probandinnen, um ein besseres Verständnis der Studienpopulation zu ermöglichen, erfolgt im Anschluss eine Untersuchung, inwiefern unterschiedliche Östradiol-Quartile, Menstruationszyklusphasen und die Verwendung hormoneller Kontrazeptiva die Leistung bei hochintensivem Intervalltraining (HIIT) beeinflussen. Zudem wird eruiert, ob diese Faktoren einen Einfluss auf die morgendlichen Nüchternwerte der ROS besitzen und/oder den ROS-Anstieg nach dem Training beeinflussen.

Durch die strukturierte Darstellung und detaillierte Analyse der Daten in den folgenden Abschnitten wird ein umfassendes Bild der komplexen Interaktionen zwischen hormonellen Faktoren und sportlicher Leistungsfähigkeit sowie oxidativem Stress bei Frauen vermittelt.

3.1 Demographische und anthropometrische Daten

Die untersuchte Stichprobe setzte sich aus Frauen im Alter von 20 bis 37 Jahren zusammen. Das Durchschnittsalter der Teilnehmerinnen betrug 26,45 ($\pm 4,06$) Jahre. Das durchschnittliche Körpergewicht der Probandinnen lag bei 58,99 kg ($\pm 6,82$) mit einem Minimum von 46,25 kg und einem Maximum von 70,75 kg. Die durchschnittliche Körpergröße betrug 1,70 m ($\pm 0,06$) bei einem durchschnittlichen Body-Mass-Index (BMI) von 21,0 kg/m² ($\pm 1,88$) mit Werten zwischen 18,78 kg/m² und 24,95 kg/m². Die mittlere Körperfettmasse der Teilnehmerinnen lag bei 27,5 % ($\pm 3,86$) und die durchschnittliche fettfreie Körpermasse (engl. Lean Body Mass, LBM) bei 58,6 % ($\pm 16,44$). Die Skelettmuskelmasse (engl. Skeletal Muscle Mass, SMM) betrug im Durchschnitt 19,3 kg ($\pm 2,32$). Der Taillenumfang (engl. Waist Circumference, WC) betrug im Mittel 0,7 m ($\pm 0,07$) und der durchschnittliche Phasenwinkel, ein Indikator für die Zellintegrität und Zellfunktion, wurde mit 5,1 ° ($\pm 0,38$) angegeben. Die nachfolgende Tabelle 1 bietet eine zusammenfassende Übersicht über die demografischen und anthropometrischen Daten des Probandinnenkollektivs.

Table 1: Demografische und anthropometrische Daten des Probandinnenkollektivs

Variable	Mean $\pm$ SD	MIN	MAX
Age (years)	26,45 $\pm$ 4,06	20	37
Bodyweight (kg)	58,99 $\pm$ 6,82	46,25	70,75
Height (m)	1,7 $\pm$ 0,06	1,56	1,79
BMI (kg/m ²)	21,0 $\pm$ 1,88	18,78	24,95
Fat mass (%)	27,5 $\pm$ 3,86	21,8	34,6
LBM (%)	58,6 $\pm$ 16,44	34,42	77,90
SMM (kg)	19,3 $\pm$ 2,32	15,01	22,83
WC (m)	0,7 $\pm$ 0,07	0,58	0,87
Phase angle (°)	5,1 $\pm$ 0,38	4,3	5,9

BMI: body mass index; LMB: lean body mass; SMM: skeletal muscle mass; WC: waist circumference

3.2 Östradiol

Um die Ergebnisse der Auswertung von 17-Beta-Östradiol E2 im Serum nachvollziehbar miteinander vergleichen zu können und den Einfluss unterschiedlicher Östradiolspiegel auf die HIIT-Trainingsleistung, die morgendlichen Nüchternwerte der ROS und den ROS-Anstieg nach dem Training zu untersuchen, wurden die Östradiolwerte der insgesamt 20 Probandinnen in Quartile unterteilt. Durch jeweils vier Blutproben an sieben Studientagen ergaben sich 560 gültige Werte. In Quartil 1 wurden die niedrigsten 25% der Östrogenwerte zusammengefasst, in Quartil 4 wiederum die höchsten 25% der untersuchten Werte. Die Quartile sind wie folgt definiert:

Q1: 5,00 – 21,99 (pg/ml)

Q2: 22,00 – 58,99 (pg/ml)

Q3: 59,00 – 112,74 (pg/ml)

Q4: 112,25 – 384,00 (pg/ml)

Der Wert 5,00 war der am niedrigsten gemessene und 384,00 der am höchsten gemessene Wert von Östradiol E2 (pg/ml). Quartil 4 wurde für die jeweiligen Auswertungen als Referenz angewandt.

3.3 Einfluss von Östradiol, Menstruationszyklusphase und hormoneller Kontrazeptiva auf die HIIT-Trainingsleistung

In diesem Abschnitt wurde untersucht, wie unterschiedliche Östradiolquartile, Zyklusphasen und die Verwendung hormoneller Verhütungsmittel die Leistung bei hochintensivem Intervalltraining (HIIT) beeinflussen. Die Ergebnisse geben Aufschluss darüber, ob und wie diese Faktoren die körperliche Leistungsfähigkeit modifizieren.

3.3.1 Östrogen und HIIT-Trainingsleistung

Die Analyse der HIIT-Trainingsleistung zeigte signifikante Unterschiede in Abhängigkeit der Östradiolquartile. Dafür wurden die verschiedenen Quartile den Variablen Upper Body Performance, Lower Body Performance und Total Daily Performance gegenübergestellt. Die Ergebnisse der statistischen Analyse ergaben, dass Frauen mit Östrogenwerten in Quartil 2 eine signifikant ($p < 0,03$) höhere Oberkörperkraftleistung erbrachten als Frauen mit Östrogenwerten in Quartil 4 (siehe Tabelle 2). Der Unterschied betrug im Durchschnitt +309,68 kg. In Abbildung 6 wird die erbrachte Oberkörperkraftleistung zwischen den Quartilen grafisch dargestellt.

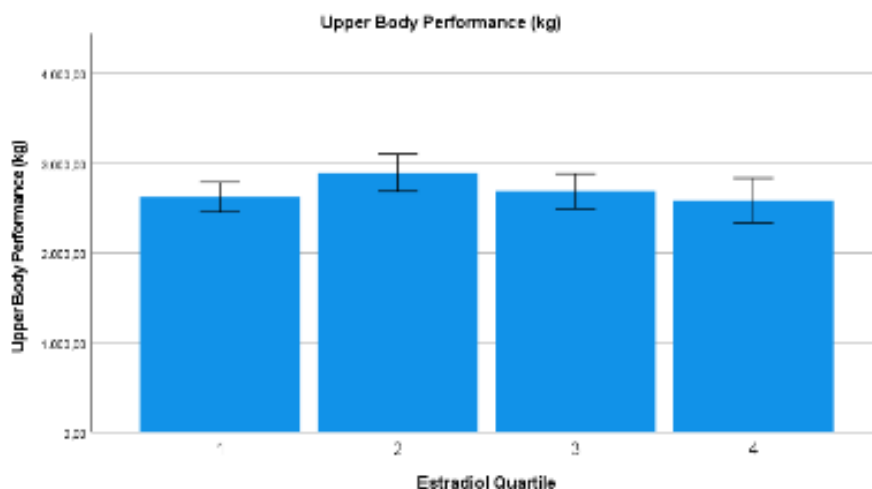


Abbildung 6: Oberkörperkraftleistung und Quartile

Keine signifikanten Unterschiede konnten hinsichtlich der Unterkörperkraftleistung und der Gesamtkraftleistung festgestellt werden. Die aneinander folgenden Tabellen 2, 3 und 4 präsentieren die Ergebnisse der jeweils abhängigen Variablen Upper Body Performance, Lower Body Performance und Total Daily Performance.

Tabelle 1: Estradiolquartil und Oberkörperkraftleistung

Parameterschätzungen		
Abhängige Variable: Upper Body Performance (kg)		
Parameter	RegressionskoeffizientB	Sig.
Konstanter Term	2585,36	<,001
[Estradiol_Quartile=1]	35,16	0,81
[Estradiol_Quartile=2]	309,68	0,03
[Estradiol_Quartile=3]	103,04	0,47
[Estradiol_Quartile=4]	0 ^a	.
a. Dieser Parameter wird auf null gesetzt, da er redundant ist.		

Tabelle 2: Estradiolquartil und Unterkörperkraftleistung

Parameterschätzungen		
Abhängige Variable: Lower Body Performance (kg)		
Parameter	RegressionskoeffizientB	Sig.
Konstanter Term	6623,7	<,001
[Estradiol_Quartile=1]	510,7	0,12
[Estradiol_Quartile=2]	196,8	0,55
[Estradiol_Quartile=3]	186,64	0,57
[Estradiol_Quartile=4]	0 ^a	.
a. Dieser Parameter wird auf null gesetzt, da er redundant ist.		

Tabelle 3: Estradiolquartil und Gesamtkraftleistung

Parameterschätzungen		
Abhängige Variable: Total daily performance (kg)		
Parameter	RegressionskoeffizientB	Sig.
Konstanter Term	9209,07	<,001
[Estradiol_Quartile=1]	545,87	0,2
[Estradiol_Quartile=2]	506,47	0,23
[Estradiol_Quartile=3]	289,68	0,49
[Estradiol_Quartile=4]	0 ^a	.
a. Dieser Parameter wird auf null gesetzt, da er redundant ist.		

3.3.2 Menstruationszyklusphase und HIIT-Trainingsleistung

Zusätzlich zu den Östradiolwerten wurde der Einfluss der Menstruationszyklusphase (Follikel- vs. Lutealphase) auf die HIIT-Trainingsleistung untersucht. Hierbei konnten keine signifikanten Unterschiede in der Oberkörper-, Unterkörper- und Gesamtkraftleistung zwischen den beiden Phasen festgestellt werden. Obwohl die Leistungswerte, wie aus Tabelle 5 ersichtlich, in der Follikelphase (1) tendenziell höher waren als in der Lutealphase (2), genügen die Unterschiede nicht, um als statistisch signifikant ($p < 0,05$) zu gelten.

Tabelle 4: Menstruationszyklusphase und Kraftleistung

Zusammenfassung von Fällen			
Mittelwert			
MenstrualPhase	Upper Body Performance (kg)	Lower Body Performance (kg)	Total daily performance (kg)
1	2779,34	6985,92	9765,26
2	2640,24	6779,43	9419,67

3.3.3 Hormonelle Kontrazeptiva und HIIT-Trainingsleistung

Ebenso wurde der Einfluss hormoneller Verhütung auf die Trainingsleistung untersucht. Insgesamt nahmen sechs der 20 Studienteilnehmerinnen hormonelle Kontrazeptiva zu sich. Die restlichen 70% der Probandinnen verhüteten zum Zeitpunkt der Intervention nicht hormonell. Im Durchschnitt erreichten Probandinnen, welche auf hormonelle Kontrazeptiva verzichteten, eine um 0,16% höhere Oberkörperkraftleistung. Demgegenüber zeigten die Teilnehmerinnen, die hormonelle Verhütungsmittel einnahmen, im Mittel eine höhere Unterkörperkraft um 5,37% sowie der Gesamtkraft um 3,85% im Vergleich zu den 14 Probandinnen, welche nicht hormonell verhüteten. Die statistische Auswertung ergab jedoch keine signifikanten Unterschiede ($p < 0,05$) in der Oberkörper- ($p = 0,97$) und Unterkörperkraftleistung ($p = 0,13$) sowie der Gesamtleistung ($p = 0,25$) zwischen Frauen, die hormonell verhüteten, und jenen, die dies nicht taten.

3.4 Einfluss von Östradiol, Menstruationszyklusphase und hormoneller Kontrazeptiva auf die morgendlichen Nüchternwerte der ROS

Der vorliegende Abschnitt der Arbeit befasst sich mit dem Einfluss von Östradiol, Menstruationszyklusphasen und hormoneller Kontrazeptiva auf die morgendlichen

Nüchternwerte der reaktiven Sauerstoffspezies (ROS). Die Kenntnis solcher grundlegenden oxidativen Stresslevel ist essenziell, um die allgemeine Verfassung der Teilnehmerinnen besser verstehen zu können.

3.4.1 Östrogen und morgendlichen Nüchternwerte der ROS

Zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Östradiolquartile auf die Baseline-ROS-Werte wurde eine Regressionsanalyse angewandt. Die Quartile wurden dafür in vier Kategorien unterteilt, wobei das vierte Quartil als Referenz diente.

Die statistische Auswertung ergab im Vergleich zu den höchsten Östradiolwerten (Quartil 4) für die Quartile 1, 2 und 3 keine Signifikanz ($p < 0,05$), was darauf hindeutet, dass keine signifikanten Unterschiede in den Baseline-ROS-Werten zwischen den Quartilen bestehen. Dies lässt den Schluss zu, dass der Östradiolspiegel keinen signifikanten Einfluss auf die morgendlichen Nüchternwerte der ROS nimmt.

3.4.2 Menstruationszyklusphase und morgendlichen Nüchternwerte der ROS

In Bezug auf den Einfluss der Menstruationszyklusphasen auf die morgendlichen Nüchternwerte der ROS konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Für die statistische Auswertung wurde die Lutealphase (2) als Referenz angenommen.

Die morgendlichen Nüchternwerte der ROS waren in der Follikelphase (1) mit $0,02 \mu\text{mol}/\text{min}$ höher als in der Lutealphase (2), jedoch nicht signifikant ($p = 0,51$). Die Menstruationsphase hat somit keinen signifikanten Einfluss auf die Baseline-ROS-Werte.

3.4.3 Hormonelle Kontrazeptiva und morgendlichen Nüchternwerte der ROS

Schließlich wurde der Einfluss der Verwendung hormoneller Verhütungsmittel auf die Baseline-ROS-Werte untersucht. Dazu wurde die Gruppe jener Frauen mit hormoneller Verhütung als Referenzwert angenommen.

Der negative Regressionskoeffizient von $-0,06 \mu\text{mol}/\text{min}$ für Frauen, welche keine hormonellen Kontrazeptiva verwenden, lässt auf eine im Durchschnitt geringere Baseline-ROS-Konzentration schließen, ist jedoch nicht signifikant ($p = 0,09$). Diese Beobachtung, wie in Tabelle 6 dargestellt, weist lediglich auf einen Trend hin, welcher jedoch nicht ausreicht, um eine statistisch signifikante Schlussfolgerung ($p < 0,05$) zu ziehen.

Tabelle 5: Hormonelle Kontrazeptiva und morgendlichen Nüchternwerte der ROS

Parameterschätzungen		
Abhängige Variable: Baseline_ROS		
Parameter	RegressionskoeffizientB	Sig.
Konstanter Term	1,11	<,001
[hormonalcontraception=no]	-0,06	0,09
[hormonalcontraception=yes]	0 ^a	.
a. Dieser Parameter wird auf null gesetzt, da er redundant ist.		

3.5 Einfluss von Östradiol, Menstruationszyklusphase und hormoneller Kontrazeptiva auf den ROS-Anstieg nach HIIT

Abschließend wurde der Einfluss von Östradiol, Menstruationszyklusphasen und der Verwendung hormoneller Kontrazeptiva auf die morgendlichen Nüchternwerte der reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) sowie deren Anstieg nach einem High-Intensity Interval Training (HIIT) untersucht. Die Analyse wurde mittels Regressionsmodellen (Allgemeines lineares Modell univariat, SPSS) durchgeführt, um die Beziehungen zwischen diesen Faktoren und den ROS-Werten zu quantifizieren. Um Unterschiede in der ROS-Produktion messen zu können, wurden die ROS-Werte vor dem Training (pre-HIIT), unmittelbar nach dem Training (post-HIIT) sowie 15 Minuten nach dem Training (15 post-HIIT) erhoben und ausgewertet.

Diese Ergebnisse sollen dazu beitragen, die Auswirkungen hormoneller Schwankungen und der Anwendung hormoneller Verhütungsmittel auf die oxidativen Stressreaktion nach körperlicher Belastung besser zu verstehen.

3.5.1 Östrogen und ROS-Anstieg nach HIIT

Im Rahmen der Analyse des Einflusses unterschiedlicher Östradiolquartile auf den ROS-Anstieg nach HIIT wurde das vierte Quartil erneut als Referenz herangezogen.

Der durchschnittliche Anstieg der ROS von pre-HIIT zu post-HIIT betrug 0,11 $\mu\text{mol}/\text{min}$ ($p=0,02$). Im Vergleich dazu war der Regressionskoeffizient für das niedrigste Östradiolquartil (1) um 0,09 $\mu\text{mol}/\text{min}$ höher, jedoch nicht signifikant ($p=0,16$), was auf einen möglichen, aber nicht statistisch gesicherten Trend zu höheren ROS-Werten bei niedrigem Östradiol hinweist.

Die Untersuchung des Einflusses der Östradiolquartile auf den Anstieg der ROS 15 Minuten nach dem HIIT zeigte ein konstantes Niveau von $0,05 \mu\text{mol}/\text{min}$ ($p=0,30$), was auf keinen signifikanten Einfluss der Östradiolquartile auf den ROS-Anstieg 15 Minuten nach dem HIIT hinweist. Auch hier konnten keine signifikanten Regressionskoeffizienten festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass die Östrogenspiegel keinen signifikanten Einfluss auf die ROS-Änderungen haben.

3.5.2 Menstruationszyklusphase und ROS-Anstieg nach HIIT

Zusätzlich zu den Östradiolwerten wurde der Einfluss der Menstruationszyklusphase (Follikel- und Lutealphase) auf den Anstieg der ROS-Werte nach einem HIIT untersucht. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Zyklusphasen und den ROS-Anstiegswerten von pre-HIIT zu post-HIIT festgestellt werden. Wie in Abbildung 7 ersichtlich, zeigten beide Phasen gleiche ROS-Anstiege ($0,13 \mu\text{mol}/\text{min}$).

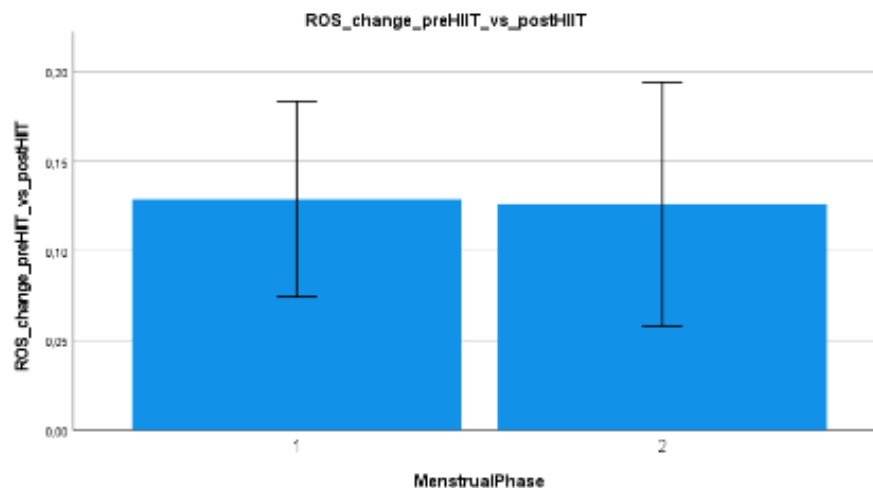


Abbildung 7: Menstruationszyklusphase und ROS-Anstieg pre-HIIT zu post-HIIT

Während die Analyse von pre-HIIT zu post-HIIT keine signifikanten Ergebnisse ergab, spiegelte die Auswertung von pre-HIIT zu 15 Minuten post-HIIT eine Änderung des ROS-Werte wider. In der ersten Zyklusphase, der Follikelphase (1), war der Anstieg der ROS mit $0,08 \mu\text{mol}/\text{min}$ geringer als in der zweiten Zyklusphase, der Lutealphase (2). Diese Beobachtung ist allerdings nicht signifikant, da $0,10 > 0,05$ ist und es sich hierbei lediglich um einen Trend handelt. Abbildung 8 veranschaulicht diesen Trend grafisch.

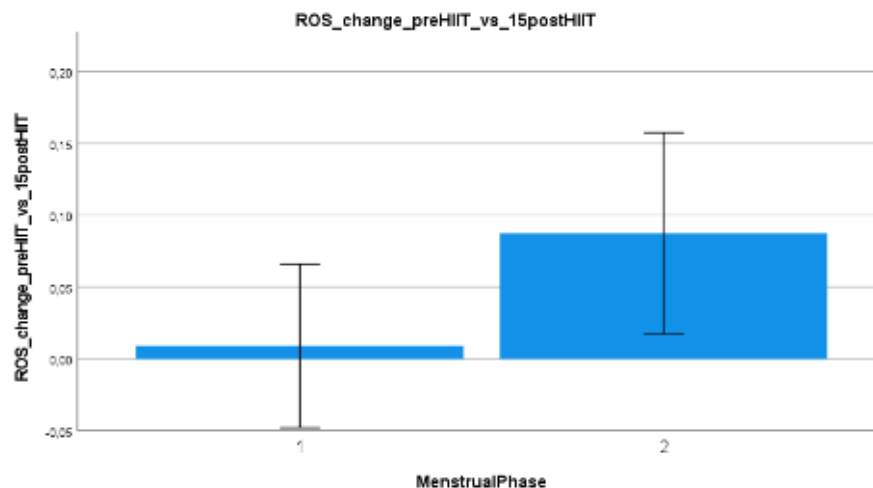


Abbildung 8: Menstruationszyklusphase und ROS-Anstieg pre-HIIT zu 15 Minuten post-HIIT

3.5.3 Hormonelle Kontrazeptiva und ROS-Anstieg nach HIIT

Schließlich wurde der Einfluss hormoneller Kontrazeptiva auf den ROS-Anstieg nach einem hochintensiven Intervalltraining untersucht. Dabei wurden die ROS-Werte von pre-HIIT zu post-HIIT sowie pre-HIIT zu 15 Minuten nach post-HIIT zwischen Frauen, welche hormonelle Verhütungsmittel verwenden, und solchen, die dies nicht tun, verglichen.

Die statistische Auswertung ergab, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen der Verwendung hormoneller Kontrazeptiva und dem ROS-Anstieg bestehen, weder unmittelbar nach dem HIIT noch 15 Minuten darauf.

Zusammenfassend zeigt die statistische Analyse der vorliegenden Studie, dass Frauen mit Östrogenwerten in Quartil 2 eine signifikant ($p < 0,03$) höhere Oberkörperkraftleistung erbrachten als Frauen mit Östrogenwerten in Quartil 4. Der Unterschied betrug im Durchschnitt +309,68 kg. Allerdings konnten keine signifikanten Einflüsse des Östradiolspiegels, der Menstruationszyklusphase oder der Verwendung hormoneller Kontrazeptiva auf die morgendlichen Baseline-ROS-Werte oder deren Anstieg nach einem hochintensiven Intervalltraining festgestellt werden. Obwohl einige Trends in den Daten erkennbar waren, waren diese statistisch nicht signifikant und sollten daher mit Vorsicht interpretiert werden.

4 Diskussion

Die zentrale Fragestellung der vorliegenden Masterarbeit lautet: „Welchen Einfluss hat der Östrogenspiegel auf die Leistungsfähigkeit junger inaktiver Frauen bei hochintensivem Krafttraining?“ Die Untersuchung zielte darauf ab, Unterschiede in der Trainingsleistung sowie dem oxidativen Stress in Abhängigkeit von variierenden Östrogenspiegeln, Menstruationszyklusphasen und hormoneller Kontrazeptiva zu analysieren. Die Beantwortung dieser Fragestellung ist von hoher Relevanz, da hormonelle Schwankungen potenziell signifikante Auswirkungen auf die sportliche Leistungsfähigkeit und das gesundheitliche Wohlbefinden von Frauen haben können.

Im Rahmen der Studie wurden verschiedene methodische Ansätze verwendet, um die Einflussfaktoren möglichst präzise zu erfassen und eine umfassende Analyse der Zusammenhänge zwischen hormonellen Veränderungen und sportlicher Leistungsfähigkeit zu gewährleisten. So wurden den Probandinnen sowohl vor als auch nach dem Sport Blutproben entnommen, um die Östrogenspiegel sowie Entzündungs- und oxidative Stressmarker in den unterschiedlichen Phasen des Menstruationszyklus zu bestimmen und deren Auswirkungen auf die Trainingsleistung zu untersuchen. Zusätzlich unterzogen sich die Teilnehmerinnen in regelmäßigen Abständen einem spezifischen Krafttrainingszirkeltraining, dessen Aufbau sich an einem Konzept für hochintensives Intervalltraining (HIIT) im Kraftbereich orientiert. Dadurch sollten Veränderungen in der Leistungsfähigkeit dokumentiert werden.

Es konnte festgestellt werden, dass tendenziell höhere Östrogenspiegel mit einer verbesserten Leistungsfähigkeit und einer reduzierten Anfälligkeit für oxidativen Stress einhergehen. Diese Beobachtungen sind konsistent mit bereits bestehender Literatur, welche darauf hinweist, dass Östrogene eine schützende Rolle gegen oxidativen Stress spielen und die Muskelregeneration sowie die Leistungsfähigkeit fördern können (Kander et al., 2017; Pellegrino et al., 2022; Xiang et al., 2021).

Die Ergebnisse der vorliegenden Masterarbeit korrelieren mit Studien, welche die antioxidative Wirkung von Östrogenen untersuchten und belegen, dass Frauen im Vergleich zu Männern eine geringere Anfälligkeit für oxidativen Stress aufweisen. Diese These wird durch die antioxidativen Eigenschaften von Östrogen, sowie Unterschiede in der NADPH-Oxidase-Aktivität gestützt (Kander et al., 2017). In einer Studie von Barp et al. (2002) wurden die oxidativen Stressmarker von männlichen und weiblichen Ratten verglichen. Dabei zeigte sich, dass die männlichen Ratten höhere Werte aufwiesen als die weiblichen.

Eine ähnliche Tendenz konnte bei Menschen beobachtet werden, wobei junge Männer höhere biochemische oxidative Stressmarker aufwiesen als gleichaltrige Frauen (Kander et al., 2017). Dies lässt den Schluss zu, dass Frauen aufgrund ihres hormonellen Profils und ihres größeren antioxidativen Potenzials weniger anfällig für oxidativen Stress sind (Reckelhoff et al., 2019). Östrogen kann durch die Aktivierung von Östrogenrezeptoren und die Förderung der Bildung von Stickstoffmonoxid (NO) die Gefäßfunktion verbessern und somit oxidativen Stress reduzieren (Newson, 2018). Nachdem es zunehmende Evidenz dafür gibt, dass NADPH eine wesentliche Quelle für die ROS-Produktion während des Trainings darstellt (Powers et al., 2020; Xiang et al., 2021) und das weibliche Geschlecht aufgrund seines Hormonprofils Unterschiede in der NADPH-Oxidase-Aktivität aufweist, indem Östrogen die Ausprägung der Untereinheiten von NADPH-Oxidasen reduziert und so die Produktion von Superoxidanionen (O_2^-) hemmt (Kander et al., 2017; Xiang et al., 2021), tragen diese Mechanismen zu einer verbesserten Trainingsleistung und verringerten ROS-Belastung bei. In Anbetracht der zuvor dargelegten Wirkungen von Östrogen lässt sich die Trendbeobachtung in Kapitel 3.5.1 in Verbindung bringen, welche, wenn auch nicht statistisch signifikant, einen Zusammenhang zwischen niedrigen Östradiolspiegeln und höheren ROS-Werten aufzeigt.

Hervorzuheben ist, dass die Leistungsfähigkeit während der Follikelphase (1) des Menstruationszyklus, in welcher der Östrogenspiegel seinen Höhepunkt erreicht, tendenziell erhöht, aber nicht signifikant war. Die Follikelphase ist durch eine erhöhte Produktion von 17- β -Estradiol gekennzeichnet, was eine tendenziell höhere Leistungsfähigkeit (vgl. Kapitel 3.3.2) und geringere ROS-Produktion (vgl. Kapitel 3.5.2) erklären könnte. Die Erkenntnisse der vorliegenden Masterarbeit weisen Parallelen zu Pellegrino et al. (2022) auf und lassen den Schluss zu, dass höhere Östrogenspiegel die mitochondriale Funktion verbessern und antioxidative Mechanismen verstärken. Des Weiteren lässt sich ableiten, dass unabhängig von schwankenden Östradiolspiegeln, weibliche Hormone die Reaktionen auf Krafttraining beeinflussen könnten, wie Haines et al. (2018) in ihrer Studie zeigen. Ihre Daten deuten darauf hin, dass die ER- α -Aktivierung der Skelettmuskulatur, als Reaktion auf eine exzentrische Belastung, die mit der Myogenese assoziierte Genexpression hochreguliert.

Zudem finden die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse Übereinstimmung mit bestehenden Studien, welche die Bedeutung von Östrogenen für die Muskel- und Knochengesundheit betonen. Beispielsweise beschreiben Fischer und Haffner-Luntzer (2022), dass niedrige Östrogenspiegel mit einem erhöhten Risiko für Osteoporose und einer

reduzierten Muskelmasse einhergehen. Dies unterstreicht die Bedeutung von Östrogenen für die körperliche Leistungsfähigkeit und die allgemeine Gesundheit von Frauen.

Aufgrund ihrer unzureichenden Signifikanz ($p < 0,05$) in Bezug auf die Menstruationszyklusphase (Follikel- vs. Lutealphase) und HIIT-Trainingsleistung bekräftigt die gegenwärtige Studie jedoch die Kritik von Colenso-Semple et al. (2023). In der vorliegenden statistischen Auswertung konnten keine signifikanten Unterschiede in der Oberkörper-, Unterkörper- und Gesamtkraftleistung zwischen den beiden Phasen festgestellt werden. Colenso-Semple et al. (2023) kommen in ihrer Übersichtsarbeit zu dem Schluss, dass aufgrund der geringen Effektgrößen, der hohen Variabilität zwischen den von ihnen eingeschlossenen Studien und der überwiegend niedrigen Qualität der bis dato verfügbaren Forschung keine allgemeinen Empfehlungen in Bezug auf den Menstruationszyklus und die Leistungsfähigkeit gemacht werden können.

In Bezug auf die Einnahme hormoneller Verhütungsmittel und die Trainingsleistung bestätigen die Ergebnisse der Masterarbeit die Aussagen aus der bestehenden Literatur, welche ebenfalls keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen hormonellen Kontrazeptiva und der Trainingsleistung feststellen konnten. Zum Beispiel fanden Elliott-Sale et al. (2020) in ihrer Übersichtsarbeit, in welcher 17 Studien eingeschlossen wurden, keinen signifikanten Effekt bezüglich der Einnahme von hormonellen Kontrazeptiva auf die Muskelkraft und die körperliche Leistungsfähigkeit bei Frauen. Ebenso konnte in der Untersuchung von Sung et al. (2022) kein Einfluss der Einnahme hormoneller Kontrazeptiva auf die Muskelkraft, die Muskeldicke, die Muskelfasergröße und die Muskelfaserzusammensetzung bei jungen Frauen festgestellt werden, die an einem zwölfwöchigen Krafttraining teilnahmen.

Eine Frage, welche noch weiterer empirische Untersuchungen bedarf, ist, ob die Einnahme hormoneller Kontrazeptiva Einfluss auf die ROS-Produktion nimmt. In diesem Kontext ist festzuhalten, dass die bisherige Forschung diesbezüglich nur unzureichende Ergebnisse liefert. Kander et al. (2017) beschreiben, dass Frauen im Allgemeinen eine geringere Anfälligkeit für oxidativen Stress aufweisen, was möglicherweise auf die antioxidativen Eigenschaften von Östrogen zurückzuführen ist. Da hormonelle Kontrazeptiva synthetische Hormone enthalten, könnte angenommen werden, dass diese eine ähnliche Schutzwirkung haben. Die vorliegende Masterarbeit konnte jedoch keine signifikante Änderung der ROS-Werte durch die Einnahme von hormonellen Kontrazeptiva nachweisen.

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit konnte eine kausale Beziehung zwischen Östrogen, oxidativem Stress und der Trainingsleistung nachgewiesen werden. Es kann

angenommen werden, dass Frauen mit höheren Östrogenspiegeln über ein größeres antioxidatives Potenzial verfügen. Dies könnte ihnen möglicherweise einen Vorteil im Kontext von hochintensivem Krafttraining verschaffen.

4.1 Limitationen

Obgleich die vorliegenden Resultate und die bestehende Literatur einen positiven Einfluss von Östrogen auf die Trainingsleistung sowie die Reduktion von oxidativem Stress nahelegen, ist weitere Forschung erforderlich, um die zugrunde liegenden Mechanismen vollständig zu verstehen. Es ist von entscheidender Bedeutung, die Variabilität der Ergebnisse in verschiedenen Studien zu berücksichtigen und methodische Verbesserungen vorzunehmen, um präzisere und verlässlichere Aussagen treffen zu können. Es wird empfohlen, größere und methodisch einheitlichere Studien durchzuführen, um die Beziehung zwischen Östrogen, oxidativem Stress und Trainingsleistung genauer zu untersuchen und geschlechtsspezifische Unterschiede besser zu verstehen.

Der Forschungsprozess dieser Arbeit weist einige Stärken auf. Insbesondere ist die methodisch saubere Durchführung der Tests sowie die sorgfältige Auswahl der Probandinnen hervorzuheben, durch welche eine homogene Studiengruppe gebildet wurde. Dennoch sind auch Limitationen zu berücksichtigen.

Wenn auch ein homogenes Probandinnenkollektiv nur junger, inaktiver Frauen für die Interpretation von Vorteil ist, schränkt es doch die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Populationen, wie beispielsweise ältere Frauen, oder Personen mit höherem Fitnessniveau ein. Eine breitere Stichprobenzusammensetzung könnte wertvolle Einblicke in die Unterschiede zwischen verschiedenen Gruppen liefern und zur Validierung der Ergebnisse beitragen.

Zudem stellt die relativ geringe Stichprobengröße eine wesentliche Einschränkung der aktuellen Studie dar. Mit einer Anzahl von lediglich 20 Probandinnen ist die statistische Aussagekraft begrenzt, sodass die Gefahr besteht, dass die Ergebnisse nicht generalisierbar sind. Insbesondere bei der Untersuchung hormoneller Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit und oxidative Stressreaktion könnten größere Stichproben erforderlich sein, um verlässliche und repräsentative Ergebnisse zu erhalten.

Ein weiterer limitierender Faktor ist die Berücksichtigung der Zyklusphasen. Hormonelle Schwankungen während des Menstruationszyklus sind komplex und individuell unterschiedlich. Die Variation der Östrogenspiegel innerhalb eines Zyklus kann durch

punktueller Messungen nicht vollständig erfasst werden. Um ein umfassenderes Bild der hormonellen Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit zu erhalten, wären langfristige Beobachtungen erforderlich.

Unklar ist zudem, ob sich die Probandinnen tatsächlich im Belastungsbereich eines hochintensiven Intervalltrainings (HIIT) befanden. HIIT lässt sich in „stark“ und „nahezu maximal bis maximal“ kategorisieren. Erstere Kategorie entspricht einer wahrgenommenen Anstrengung (RPE) von 14-17 auf einer Skala von 1-20, einer maximalen Herzfrequenz (HFmax) von 77-95% und einer maximalen Sauerstoffaufnahme (VO2max) von 64-90%. Die Kategorie „nahezu maximal bis maximal“ wird durch eine RPE von ≥ 18 , eine HFmax von $\geq 95\%$ und einer VO2max von $\geq 91\%$ charakterisiert (Coates et al., 2023; Liguori et al., 2022). In der vorliegenden Studie wurden lediglich die RPE-Werte der Probandinnen dokumentiert. Da diese nur eine subjektive Einschätzung präsentieren und keine direkten Messungen der tatsächlichen Herzfrequenz oder der maximalen Sauerstoffaufnahme durchgeführt wurden, welche genauere Indikatoren für die Trainingsintensität wären, bleibt es fraglich, ob die Probandinnen tatsächlich in dem in der Studie erwünschten Belastungsbereich eines hochintensiven Intervalltrainings trainiert haben. Obgleich das Training gemäß den analysierten Protokollen im hochintensiven Intervalltraining (HIIT) lag und die Messungen von RPE und ROS auf eine hohe Belastung hinwiesen, bleibt diese Frage offen. Für eine fundierte Bewertung wäre es empfehlenswert, in zukünftigen Studien zusätzliche Messungen wie Herzfrequenzmonitoring und Laktatmessungen während des Trainings miteinzubeziehen, um eine detailliertere Überprüfung der tatsächlichen Trainingsintensität zu ermöglichen.

Die Ernährung und der allgemeine Lebensstil der Probandinnen wurden in der vorliegenden Studie nur teilweise kontrolliert, obwohl bekannt ist, dass diese signifikante Auswirkungen auf die körperliche Leistungsfähigkeit und den oxidativen Stress haben können. Den Probandinnen wurde nahegelegt, am Vortag jeder Intervention auf sportliche Aktivitäten zu verzichten sowie den Konsum von Alkohol und die Einnahme von Medikamenten zu vermeiden. Zudem mussten die Probandinnen während der gesamten Studienphase auf Nahrungsergänzungsmittel verzichten. Sowohl der Einfluss der eigentlichen Intervention (Getränk) als auch die Ernährung am Vortag (24h Recall) inklusive der Aufnahme von antioxidativ relevanten Nährstoffen wie Vitamin C, E etc. wurde im Gesamtkontext statistisch berücksichtigt. Unterschiede in der Nahrungsaufnahme und die Aufnahme von Mikronährstoffen könnten jedoch die Ergebnisse der vorliegenden Masterarbeit beeinflusst haben, insbesondere in Bezug auf den oxidativen Stress. In zukünftigen Studien sollte eine

striktere Kontrolle oder zumindest eine Erfassung dieser Variablen vorgesehen werden, um mögliche Auswirkungen isoliert betrachten zu können.

In diesem Kontext sei auf eine weitere Überlegung hingewiesen, die nicht im Fokus der vorliegenden Untersuchung stand. Hatte das zuvor konsumierte Getränk Einfluss auf die Trainingsleistung während und nach dem durchgeführten hochintensiven Intervalltraining und könnte dadurch möglicherweise die Wirkung von Östrogen beeinflusst worden sein?

5 Literaturverzeichnis

- Aktories, K., Förstermann, U., Hofmann, F. B., & Starke, K. (2017). *Allgemeine und spezielle Pharmakologie und Toxikologie*. Germany: Urban & Fischer Verlag GmbH & Co. KG. Urban & Fischer Verlag GmbH & Co. KG.
- Anatomie Physiologie I care*. (2015). Georg Thieme Verlag.
- Barp, J., Araújo, A. S. R., Fernandes, T. R. G., Rigatto, K. V., Llesuy, S., Belló-Klein, A., & Singal, P. (2002). Myocardial antioxidant and oxidative stress changes due to sex hormones. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 35(9), 1075–1081. <https://doi.org/10.1590/S0100-879X2002000900008>
- Bizheh, N., & Jaafari, M. (2011). *The Effect of a Single Bout Circuit Resistance Exercise on Homocysteine, hs-CRP and Fibrinogen in Sedentary Middle Aged Men*.
- Blagrove, R. C., Bruinvels, G., & Pedlar, C. R. (2020). Variations in strength-related measures during the menstrual cycle in eumenorrheic women: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 23(12), 1220–1227. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2020.04.022>
- Boutcher, S. H. (2011). High-Intensity Intermittent Exercise and Fat Loss. *Journal of Obesity*, 2011, 868305. <https://doi.org/10.1155/2011/868305>
- Bull, F. C., Al-Ansari, S. S., Biddle, S., Borodulin, K., Buman, M. P., Cardon, G., Carty, C., Chaput, J.-P., Chastin, S., Chou, R., Dempsey, P. C., DiPietro, L., Ekelund, U., Firth, J., Friedenreich, C. M., Garcia, L., Gichu, M., Jago, R., Katzmarzyk, P. T., ... Willumsen, J. F. (2020). World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour. *British Journal of Sports Medicine*, 54(24), 1451–1462. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-102955>
- Coates, A. M., Joyner, M. J., Little, J. P., Jones, A. M., & Gibala, M. J. (2023). A Perspective on High-Intensity Interval Training for Performance and Health. *Sports Medicine*, 53(1), 85–96. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01938-6>
- Colenso-Semple, L. M., D'Souza, A. C., Elliott-Sale, K. J., & Phillips, S. M. (2023). Current evidence shows no influence of women's menstrual cycle phase on acute strength performance or adaptations to resistance exercise training. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5, 1054542. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1054542>

- Cui, J., Shen, Y., & Li, R. (2013). Estrogen synthesis and signaling pathways during aging: From periphery to brain. *Trends in Molecular Medicine*, 19(3), 197–209. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2012.12.007>
- Di Meo, S., Napolitano, G., & Venditti, P. (2019). Mediators of Physical Activity Protection against ROS-Linked Skeletal Muscle Damage. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(12), 3024. <https://doi.org/10.3390/ijms20123024>
- Dikalov, S. I., Polienko, Y. F., & Kirilyuk, I. (2018). Electron Paramagnetic Resonance Measurements of Reactive Oxygen Species by Cyclic Hydroxylamine Spin Probes. *Antioxidants & Redox Signaling*, 28(15), 1433–1443. <https://doi.org/10.1089/ars.2017.7396>
- DocCheck, M. bei. (o. J.). *Reaktive Sauerstoffspezies*. DocCheck Flexikon. Abgerufen 22. März 2024, von https://flexikon.doccheck.com/de/Reaktive_Sauerstoffspezies
- Elliott-Sale, K. J., McNulty, K. L., Ansdell, P., Goodall, S., Hicks, K. M., Thomas, K., Swinton, P. A., & Dolan, E. (2020). The Effects of Oral Contraceptives on Exercise Performance in Women: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.z.)*, 50(10), 1785–1812. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01317-5>
- Field, A. P. (2017). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. SAGE Publications.
- Fischer, V., & Haffner-Luntzer, M. (2022). Interaction between bone and immune cells: Implications for postmenopausal osteoporosis. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 123, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2021.05.014>
- Gail, S., Argauer, P., & Künzell, S. (2015). Validität eines 5-RM Krafttests im Gesundheits- und Fitnesssport. *Swiss Sports & Exercise Medicine*, 63(3). <https://doi.org/10.34045/SSEM/2015/21>
- Gassner, M. (2024). *Akuteinfluss unterschiedlicher Lebensmittel und Getränke auf die sportinduzierte oxidative Stress- und Entzündungsreaktion. (Bislang noch nicht publiziert)*.
- Haines, M., McKinley-Barnard, S. K., Andre, T. L., Gann, J. J., Hwang, P. S., & Willoughby, D. S. (2018). Skeletal Muscle Estrogen Receptor Activation in Response to Eccentric Exercise Up-Regulates Myogenic-Related Gene Expression Independent of Differing Serum Estradiol Levels Occurring during the Human Menstrual Cycle. *Journal of Sports Science & Medicine*, 17(1), 31–39.

- HIIT: Das steckt hinter High Intensity Interval Training!* (o. J.). Abgerufen 3. April 2024, von <https://www.akademie-sport-gesundheit.de/magazin/hiit-training-workouts-uebungen.html>
- Hunter, S. K., S. Angadi, S., Bhargava, A., Harper, J., Hirschberg, A. L., D. Levine, B., L. Moreau, K., J. Nokoff, N., Stachenfeld, N. S., & Berman, S. (2023). The Biological Basis of Sex Differences in Athletic Performance: Consensus Statement for the American College of Sports Medicine. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 55(12), 2328. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003300>
- Ikeda, K., Horie-Inoue, K., & Inoue, S. (2019). Functions of estrogen and estrogen receptor signaling on skeletal muscle. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 191, 105375. <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2019.105375>
- Ito, S. (2019). High-intensity interval training for health benefits and care of cardiac diseases—The key to an efficient exercise protocol. *World Journal of Cardiology*, 11(7), 171–188. <https://doi.org/10.4330/wjc.v11.i7.171>
- Kander, M. C., Cui, Y., & Liu, Z. (2017). Gender difference in oxidative stress: A new look at the mechanisms for cardiovascular diseases. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 21(5), 1024–1032. <https://doi.org/10.1111/jcmm.13038>
- Liguori, G., Feito, Y., Fountaine, C. J., & Roy, B. (2022). *American College of Sports Medicine. ACSM's guidelines for exercise testing and prescription* (11. Aufl.). Wolters Kluwer.
- McNulty, K. L., Elliott-Sale, K. J., Dolan, E., Swinton, P. A., Ansdell, P., Goodall, S., Thomas, K., & Hicks, K. M. (2020). The Effects of Menstrual Cycle Phase on Exercise Performance in Eumenorrheic Women: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 50(10), 1813–1827. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01319-3>
- Meignié, A., Duclos, M., Carling, C., Orhant, E., Provost, P., Toussaint, J.-F., & Antero, J. (2021). The Effects of Menstrual Cycle Phase on Elite Athlete Performance: A Critical and Systematic Review. *Frontiers in Physiology*, 12, 654585. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.654585>
- Nelson, L. R., & Bulun, S. E. (2001). Estrogen production and action. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 45(3), S116–S124. <https://doi.org/10.1067/mjd.2001.117432>

- Newson, L. (2018). Menopause and cardiovascular disease. *Post Reproductive Health*, 24(1), 44–49. <https://doi.org/10.1177/2053369117749675>
- Pauls, J. (2011). *Das große Buch vom Krafttraining* (1. Aufl.). Stiebner. <https://ubdata.univie.ac.at/AC08521790>
- Pellegrino, A., Tiidus, P. M., & Vandenboom, R. (2022). Mechanisms of Estrogen Influence on Skeletal Muscle: Mass, Regeneration, and Mitochondrial Function. *Sports Medicine*, 52(12), 2853–2869. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01733-9>
- Powers, S. K., Deminice, R., Ozdemir, M., Yoshihara, T., Bomkamp, M. P., & Hyatt, H. (2020). Exercise-induced oxidative stress: Friend or foe? *Journal of Sport and Health Science*, 9(5), 415–425. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2020.04.001>
- Powers, S. K., & Jackson, M. J. (2008). Exercise-Induced Oxidative Stress: Cellular Mechanisms and Impact on Muscle Force Production. *Physiological Reviews*, 88(4), 1243–1276. <https://doi.org/10.1152/physrev.00031.2007>
- Reckelhoff, J. F., Romero, D. G., & Yanes Cardozo, L. L. (2019). Sex, Oxidative Stress, and Hypertension: Insights From Animal Models. *Physiology*, 34(3), 178–188. <https://doi.org/10.1152/physiol.00035.2018>
- Sung, E.-S., Han, A., Hinrichs, T., Vorgerd, M., & Platen, P. (2022). Effects of oral contraceptive use on muscle strength, muscle thickness, and fiber size and composition in young women undergoing 12 weeks of strength training: A cohort study. *BMC Women's Health*, 22, 150. <https://doi.org/10.1186/s12905-022-01740-y>
- Thompson, B., Almarjawi, A., Sculley, D., & Janse De Jonge, X. (2020). The Effect of the Menstrual Cycle and Oral Contraceptives on Acute Responses and Chronic Adaptations to Resistance Training: A Systematic Review of the Literature. *Sports Medicine*, 50(1), 171–185. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01219-1>
- Vaupel, P., Schiabel, H.-G., Mutschler, E., & Thews, G. (2015). *Anatomie, Physiologie, Pathophysiologie des Menschen: 158 Tabellen* (7., vollst. überarb. und erw. Aufl.). Wiss. Verl.-Ges.
- Xiang, D., Liu, Y., Zhou, S., Zhou, E., & Wang, Y. (2021). Protective Effects of Estrogen on Cardiovascular Disease Mediated by Oxidative Stress. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/5523516>
- Zeng, Z., Jendricke, P., Centner, C., Storck, H., Gollhofer, A., & König, D. (2020). Acute Effects of Oatmeal on Exercise-Induced Reactive Oxygen Species Production

Following High-Intensity Interval Training in Women: A Randomized Controlled Trial.
Antioxidants, 10(1), 3. <https://doi.org/10.3390/antiox10010003>

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strukturformel Estradiol, Estron und Estriol (mod. n. Aktories et al., 2017, S. 614).....	12
Abbildung 2: Hormonkonzentrationen im Serum während des Zyklus & Veränderungen am Endometrium; Quelle: Aktories et al. (2017, S. 631)	15
Abbildung 3: Grafische Darstellung der durch hochintensives Intervalltraining aktivierten positiven kardiovaskulären und metabolischen Effekte; Quelle: Ito (2019, S. 184)	20
Abbildung 4: Überblick Studiendesign. HIIT: hochintensives Intervalltraining; Quelle: (Gassner, 2024)	36
Abbildung 5: Ablauf Krafttrainingszirkel; Quelle: (Gassner, 2024).....	37
Abbildung 6: Oberkörperkraftleistung und Quartile	44
Abbildung 7: Menstruationszyklusphase und ROS-Anstieg pre-HIIT zu post-HIIT	49
Abbildung 8: Menstruationszyklusphase und ROS-Anstieg pre-HIIT zu 15 Minuten post-HIIT	50

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Estradiolquartil und Oberkörperkraftleistung	45
Tabelle 2: Estradiolquartil und Unterkörperkraftleistung.....	45
Tabelle 3: Estradiolquartil und Gesamtkraftleistung	45
Tabelle 4: Menstruationszyklusphase und Kraftleistung	46
Tabelle 5: Hormonelle Kontrazeptiva und morgendlichen Nüchternwerte der ROS	48

8 Eidesstaatliche 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 noch von anderen Personen vorgelegt.