

Aus dem Institut für Kreislaufforschung und Sportmedizin
der Deutschen Sporthochschule Köln

Effekte von Apfelsaftschorle und Aronia-Mischfruchtsaft auf Gesundheit und Leistung im Kontext von akuter Belastung und Training

An der Deutschen Sporthochschule Köln
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Naturwissenschaft

angenommene Dissertation

vorgelegt von

Sarah Valder

aus

Köln

Köln 2025

Erste*r Gutachter*in:	Prof. (FH) PD Dr. Christian Brinkmann
Zweite*r Gutachter *in:	Prof. Dr. Dr. Patrick Diel
Vorsitzende*r des Promotionsausschusses:	Univ.-Prof. Dr. Mario Thevis
Datum der Disputation:	19.05.2025

Eidesstattliche Versicherungen gem. § 7 Abs. 2 Nr. 9 der Promotionsordnung der Deutschen Sporthochschule Köln, 09.07.2024:

Hierdurch versichere ich:

Ich habe diese Arbeit selbständig und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen und technischen Hilfen angefertigt; sie hat noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegen. Wörtlich übernommene Textstellen, auch Einzelsätze oder Teile davon, sind als Zitate kenntlich gemacht worden.

Hierdurch erkläre ich, dass ich die „Leitlinien guter wissenschaftlicher Praxis“ der Deutschen Sporthochschule Köln eingehalten habe.

03.06.2025



Datum, Sarah Valder

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Freunden und Personen bedanken, die mich in der zurückliegenden Zeit bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof (FH) PD Dr. Christian Brinkmann, der mich als externe Wissenschaftlerin an der Deutschen Sporthochschule Köln in seine Arbeitsgruppe aufgenommen und auf eine sehr empathische Art unterstützt hat. Mit der Bearbeitung dieser Themenstellung war es mir möglich, an der Deutschen Sporthochschule im Fachbereich der Sporternährung forschen zu dürfen. Die gemeinsame Arbeit, der enge Austausch und vertraute Kommunikation haben mich fachlich gefördert, aber auch menschlich wachsen lassen.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Dr. Patrick Diel bedanken, der mich zwei Jahre in seine Arbeitsgruppe integriert hat und darauf basierend ist ein großer Teil der Ergebnisse dieser Arbeit entstanden.

Ein großer Dank geht ebenso an zahlreiche Kolleginnen und Kollegen der Deutschen Sporthochschule Köln. Herr Dr. Eduard Isenmann hat mich stets in allen Bereichen der hier präsentierten Forschung unterstützt und betreut. Ein wesentlicher Anteil der fachlichen und privaten Gespräche hat die Erstellung dieser Arbeit ermöglicht. Ebenso gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. Oliver Jan Quittmann, der immer auf sehr kreative und empathische Art mein fachliches, aber auch privates Denken gefördert hat. Der stetige Austausch zur Sporternährung und zu Forschungsergebnissen aus der Sportwissenschaft haben mich sehr bereichert. Weiterhin bin ich zu großem Dank gegenüber Frau Dr. Lena Riemer verpflichtet, die mit außerordentlichem Engagement und zahlreichen Arbeitsstunden Projekte dieser Arbeit begleitet hat. Ebenso hat Herr Dr. Argiris Vassiliadis mich stets unterstützt und zusammen mit Herrn Dr. Hans Braun die Arbeit an der Deutschen Sporthochschule in Köln ermöglicht. Herr Tihomir Kostov und Herr Friedrich Schick ist zu danken für die Hilfe in der Studiendurchführung und den fachlichen Input zu den Forschungsarbeiten. Frau Frederike Meuffels und Herr Leon Schwensfeier standen bei jeder Herausforderung in den Studien helfend zur Seite.

Ein ganz besonderer Dank geht an Frau Anika Voß, für die stetige Unterstützung im Labor, das Stemmen des größten Teils der durchzuführenden Blutabnahmen. Ebenso danke ich Frau Anke Schmitz, die tatkräftig bei der Entnahme der unzähligen Blutproben unterstützt hat. Weiterhin hervorzuheben ist die sehr kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit mit PD. Dr. Daniel Alexander Bizjak und Raphaela Staltner, die beide tatkräftig bei der Ergebnisausarbeitung unterstützt haben.

Vielen Dank an meine Freunde Melanie Nadig, Lennart Kunz, Michaela Mark, Marvin Rohde, Bianca und Thomas Werdelmann sowie Tina Zeinlinger, an die ich mich jederzeit wenden konnte.

Ebenso danke ich meiner Familie für den Rückhalt und die Unterstützung bei all meinen Vorhaben.

Inhaltsverzeichnis

Publikationen der Dissertation	I
Weitere Publikationen.....	I
Zusammenfassung	III
Abstract	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Wissenschaftlicher Hintergrund	3
2.1 Körperliche Aktivität im Sport	3
2.2 Einmalige akute körperliche Belastung und Training - Definition und Abgrenzung	5
2.3 Potenzielle physiologische Wechselwirkungen von Inhaltsstoffen der Apfelsaftschorle sowie des Aronia-Mischfruchtsafts und Sport	6
2.3.1 Zucker	6
2.3.1.1 Monosaccharide - Vorkommen und Eigenschaften	7
2.3.1.2 Monosaccharide - mögliche Effekte auf sportliche Leistung und Gesundheit	8
2.3.2 Sekundäre Pflanzenstoffe - Polyphenole	10
2.3.2.1 Polyphenole - Darstellung antioxidativer Wirkmechanismen und mögliche Effekte auf sportliche Leistung und Gesundheit	12
2.3.2.2 Polyphenole - Darstellung anti-inflammatorischer Wirkmechanismen und mögliche Effekte auf sportliche Leistung und Gesundheit.....	14
2.3.2.3 Polyphenole - Darstellung vasodilatatorischer Wirkmechanismen und mögliche Effekte auf sportliche Leistung und Gesundheit	15
2.3.2.4 Polyphenole - Darstellung anti-diabetischer und intestinal mikrobiotischer Wirkmechanismen und mögliche Effekte auf sportliche Leistung und Gesundheit	15
2.3.3 Mineralstoffe - Kalium, Calcium, Magnesium, Eisen Zink, Kupfer	17
2.3.3.1 Kalium - Eigenschaften, Konzentration in den Studiengetränken und mögliche physiologische Wirkungen	17
2.3.3.2 Calcium - Eigenschaften, Konzentration in den Studiengetränken und mögliche physiologische Wirkungen	18
2.3.3.3 Magnesium - Eigenschaften, Konzentration in den Studiengetränken und mögliche physiologische Wirkungen	19
2.3.3.4 Eisen, Zink und Kupfer - Eigenschaften, Konzentration in den Studiengetränken und mögliche physiologische Wirkungen	19
2.3.4 Vitamine.....	20
2.4 Aktueller Forschungsstand zu sport- und gesundheitsbezogenen Wirkungen von apfel- und aroniasaftbasierten Getränkesupplementierungen	22
2.4.1 Aktueller Forschungsstand zu Apfelsaft und Apfelsaftschorle	22
2.4.2 Aktueller Forschungsstand zu Aroniasaft und aroniasaftbeinhaltenden Mischfruchtsäften	23
3 Zielsetzung.....	25
4 Veröffentlichungen	25

4.1	Publikation 1: Effect of Sugar- and Polyphenol-Rich, Diluted Cloudy Apple Juice on the Intestinal Barrier after Moderate Endurance Exercise and in Ultra-Marathon Runners. <i>Nutrients</i> 2024 Apr 30;16(9):1353. doi: 10.3390/nu16091353.....	26
4.2	Publikation 2: The Influence of a Polyphenol-Rich Red Berry Fruit Juice on Recovery Process and Leg Strength Capacity after Six Days of Intensive Endurance Exercise in Recreational Endurance Athletes. <i>Nutrients</i> 2024 May 9;16(10):1428. doi: 10.3390/nu16101428	28
4.3	Publikation 3: Effects of two weeks of daily consumption of polyphenol-rich red berry fruit juice, with and without high-intensity concurrent training, on health-related variables in individuals with pre-diabetes mellitus. (under review)	30
5	Diskussion.....	32
5.1	Ergebnisdiskussion	32
5.2	Methodendiskussion	39
6	Fazit und Ausblick	45
7	Literaturverzeichnis	49
8	Anhang	viii
8.1	Messparameter und Inhaltsstoffe der Studiengetränke	viii
8.2	Original-Publikationen.....	x

Publikationen der Dissertation

Publikation 1:

Valder S*, Staltner R*, Bizjak DA, Esatbeyoglu T, Herdegen V, Köpsel M, Kostov T, Bergheim I, Diel P. Effect of Sugar- and Polyphenol-Rich, Diluted Cloudy Apple Juice on the Intestinal Barrier after Moderate Endurance Exercise and in Ultra-Marathon Runners. *Nutrients*. 2024 Apr 30;16(9):1353. doi: 10.3390/nu16091353. Impact Factor 4,8 (2024)

Publikation 2:

Valder S, Habersatter E, Kostov T, Quenzer S, Herzig L, von Bernuth J, Matits L, Herdegen V, Diel P, Isenmann E. The Influence of a Polyphenol-Rich Red Berry Fruit Juice on Recovery Process and Leg Strength Capacity after Six Days of Intensive Endurance Exercise in Recreational Endurance Athletes. *Nutrients*. 2024 May 9;16(10):1428. doi: 10.3390/nu16101428. Impact Factor 4,8 (2024)

Publikation 3:

Valder S, Schick F, Pietsch N, Wagner T, Urban H, Lindemann P, Riemer L, Quenzer S, Herdegen V, Diel P, Isenmann E, Brinkmann C. Effects of two weeks of daily consumption of polyphenol-rich red berry fruit juice with and without high-intensity concurrent training, on health-related variables in individuals with pre-diabetes mellitus. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*. 2025 May 10; 104121. doi:10.1016/j.numecd.2025.104121. Impact Factor 3,3 (2024).

Weitere Publikationen

Valder S, Brinkmann C. Exercise for the Diabetic Gut—Potential Health Effects and Underlying Mechanisms. *Nutrients*. 2022 Feb. 15;14(4):813. doi: 10.3390/nu14040813. Impact Factor 4,8 (2024)

Valder S, Brinkmann C. Is intake of fruit juice useful in exercise-induced hypoglycemia prevention in individuals with type 1 diabetes mellitus? *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2022 Oct 21;13:1045639. doi: 10.3389/fendo.2022.1045639. Impact Factor: 3,9 (2024)

Bizjak DA, Schulz SVW, John L, Schellenberg J, Bizjak R, Witzel J, **Valder S**, Kostov T, Schalla J, Steinacker JM, et al. Running for Your Life: Metabolic Effects of a 160.9/230 km Non-Stop Ultramarathon Race on Body Composition, Inflammation, Heart Function, and Nutritional Parameters. *Metabolites*. 2022; 12(11):1138. doi: 10.3390/metabo12111138. Impact Factor 3,4 (2024)

Yuliandra T, Touveliou K, de la Torre X, Botrè F, Loke S, Isenmann E, **Valder S**, Diel P, Parr MK. Urinary Excretion of Ecdysterone and Its Metabolites Following Spinach Consumption. *Mol Nutr Food Res*. 2023 Jul;67(14): e2200518. doi: 10.1002/mnfr.202200518. Impact Factor: 4,5 (2024)

Staltner R*, **Valder S***, Wodak MF, Köpsel M, Herdegen V, Esatbeyoglu T, Kostov T, Diel P, Bergheim I. Sugar-sweetened beverage but not diluted cloudy apple juice consumption induces post-prandial endotoxemia in healthy adults. *npj Science of Food* 2024 June 21; 8 (38). doi: 10.1038/s41538-024-00283-w. Impact Factor: 6,3 (2024)

* geteilte Erstautorenschaft

Zusammenfassung

Ein hoher Anteil an möglichst frischem Obst und Gemüse pro Tag gilt als Basis für eine ausgewogene Ernährungsweise. Dies wird sowohl für sich omnivor ernährende gesunde Erwachsene im Alter von 18 bis 65 Jahren als auch für Sportler*innen empfohlen, um bei einer energiebedarfsdeckenden Ernährungsweise auch eine bedarfsdeckende Nährstoffzufuhr für Mineralstoffe und Vitamine zu erreichen. Unter anderem können Konsumhemmnisse wie die notwendige Zubereitungszeit, eine nur begrenzte Haltbarkeit und hohe Einkaufspreise im Vergleich zu anderen Lebensmitteln den Verzehr von frischem Obst und Gemüse reduzieren. In diesem Zusammenhang könnte der Verzehr von Fruchtsaft einen Beitrag leisten, die empfohlenen fünf Portionen Obst und Gemüse pro Tag zu erreichen und die Konsumhemmnisse zu umgehen.

Ernährungsphysiologisch werden die Wirkungen von Fruchtsaft jedoch kontrovers diskutiert. Eine hohe potenzielle Zuckeraufnahme steht einer Zufuhr von sekundären Pflanzenstoffen gegenüber, sodass die physiologischen Effekte im gesundheits- und sportbezogenen Kontext noch nicht eindeutig erscheinen. Basierend auf einer limitierten Datenlage in Verbindung mit Apfelsaftschorle und Aronia-Mischfruchtsaft besteht die Notwendigkeit, deren ernährungsphysiologische Effekte in Wechselwirkung mit akuter körperlicher Belastung und Training zu untersuchen. Hinsichtlich einer hohen bzw. zunehmenden Beliebtheit im Konsum bieten die Apfelsaftschorle und Superfoods wie die Aroniabeere und deren Saft einen Forschungsgegenstand, der mit dieser Arbeit erstmals wissenschaftlich betrachtet wurde.

In Verbindung mit dem Konsum von Apfelsaftschorle und Aronia-Mischfruchtsaft und der Aufnahme der enthaltenen nutritiven Inhaltsstoffe wurden in dieser Dissertation erstmalig die physiologischen Wechselwirkungen durch körperliche Bewegung als akute Belastung sowie Training in Bezug auf die sportliche Leistung und Gesundheit betrachtet. Im Mittelpunkt dieser Arbeit standen die einmalige Applikation von Apfelsaftschorle im Vergleich zu einem Placebo und Wasser nach einer moderat-intensiven sowie extremen Ausdauerbelastung bei unspezifisch trainierten Sportler*innen bzw. Ultra-Marathonläufer*innen und die nachfolgenden Inflammations- und Regenerationsvorgänge mit Einfluss auf die Darmbarrierefunktion. Es ist gezeigt worden, dass die physiologischen Wirkungen auf die Darmbarrierefunktion durch die Aufnahme von Apfelsaftschorle im Kontext einer moderat-intensiven und einer extremen Ausdauerbelastung unterschiedlich sind. Besonders die Wirkung der in der Apfelsaftschorle enthaltenen Zuckerarten scheint durch die Fruchtsaftmatrix (FSM) beeinflusst worden zu sein. Weiterhin ließen sich Hinweise auf eine veränderte Immunfunktion durch einen Anstieg in der CD14-Proteinkonzentration nach Apfelsaftschorlen-Supplementierung in Folge der moderat-intensiven Laufbelastung identifizieren.

Des Weiteren wurden die antioxidativen, anti-inflammatorischen und regenerationsunterstützenden Wirkungen sowie die Effekte auf die Beinkraft eines Aronia-Mischfruchtsafts in kurzzeitig-wiederholender Supplementierung vergleichend zu einem Placebo im Rahmen eines hochintensiven Intervalltrainings (HIIT) bei Freizeit-Läufer*innen

untersucht. Das HIIT-Protokoll umfasste vier Intervalleinheiten mit einer Intensität von 120 % der individuellen anaeroben Schwelle, ermittelt über Dmax-Methode (LT(D)), und zwei moderat-intensive Dauerläufe mit einer Intensität von 65 % der LT(D). Unter Einfluss des Aronia-Mischfruchtsafts wurden Tendenzen für einen positiven Effekt auf die Beinkraft bei den Ausdauersportler*innen, jedoch keine antioxidativen, anti-inflammatorischen und regenerationsunterstützenden Auswirkungen ermittelt.

Ergänzend zu den antioxidativen Eigenschaften des Aronia-Mischfruchtsafts wurde dessen Einfluss auf das Körpergewicht und die Körperzusammensetzung, den Glukosestoffwechsel, den Zustand von oxidativem Stress, die Pulswellengeschwindigkeit und den peripheren Widerstand in einer Kohorte von Personen mit Prädiabetes mellitus mit oder ohne begleitendes Kraft- und Ausdauertraining analysiert. Das Training bestand aus einem angeleiteten hochintensiven Functional-Fitness-Krafttrainingsprogramm, welches eingebettet war in zwei 30-minütige Walkingeinheiten und jeweils in drei Einheiten pro Woche im 14-tägigen Interventionszeitraum unter kurzzeitig-wiederholender Einnahme des Aronia-Mischfruchtsafts oder eines Placebos als Cross-over-Studiendesign umgesetzt wurde. Unter Ruhebedingungen führte die Saft-Supplementation zu moderaten Verbesserungen des peripheren Gefäßwiderstands, unter begleitendem Einfluss des Trainings zu einem Erhalt der relativen Muskelmasse, während sich in der Placebogruppe keine Effekte bzw. eine leichte Abnahme der relativen Muskelmasse herausstellten.

Die erzielten Ergebnisse deuten im Kontext des Konsums der Apfelsaftschorle bei gesunden Sportler*innen eine verbesserte Immunfunktion und Resilienz nach akut moderat-intensiven und extremen Ausdauerbelastungen an, unter anderem aufgezeigt durch eine bessere Darmbarrierestabilität. Bei Ausdauersportler*innen bzw. Menschen mit Prädiabetes mellitus dagegen konnte die Einnahme eines polyphenolreichen Aronia-Mischfruchtsafts tendenziell zu einer verbesserten Kraftfähigkeit und einer erhaltenden Muskeladaptation beitragen. Ergänzend wurden bei nichttrainierenden Menschen mit Prädiabetes mellitus positive Auswirkungen auf den vaskulären Gesundheitszustand durch die Aronia-Mischfruchtsaft-Aufnahme festgestellt.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit sollten zukünftige Forschungsarbeiten in größeren und verschiedenen Probandenkollektiven längerfristige Supplementationen mit Apfelsaftschorle, Aronia-Mischfruchtsaft, aber auch Fruchtsaft allgemein durchführen und Standards hinsichtlich der Ausweisung der Fruchtsaft-Inhaltsstoffe, der dahinterstehenden Lebensmittelanalytik, Fruchtsaft-Dosierung, -Anwendungsdauer, begleitenden Ernährungserhebungen und Belastungsprotokolle etablieren. Nachgelagerte Zellkulturversuche könnten zum Verständnis der biologischen Mechanismen beitragen. Daraus hervorgehend könnte eine differenziertere Bewertung der Wechselwirkungen zwischen dem Konsum von Apfelsaftschorle sowie von Aronia-Mischfruchtsaft und akuter sowie trainingsorientierter Belastung bezüglich der sportlichen Leistung sowie der Gesundheit resultieren, beispielsweise unter Betrachtung des Timings der Zufuhr oder von Effekten der FSM. Weitergehend ließen sich sowohl die Apfelsaftschorle als auch der Aronia-Mischfruchtsaft ernährungsphysiologisch besser einordnen und auf diätetische

Zufuhrempfehlungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen könnte hingearbeitet werden, wenn körperliche Belastungen in verschiedenen Modalitäten berücksichtigt werden.

Abstract

A high daily intake of fresh fruit and vegetables is the basis of a balanced diet. For healthy adults aged 18-65 who eat an omnivorous diet, as well as for athletes, it is recommended to consume a diet that meets energy needs and the recommended daily intake of minerals and vitamins. The consumption of fresh fruit and vegetables may be limited by various obstacles, including the time required for preparation, the relatively short shelf life of these foods, and their relatively high purchase prices. In this context, fruit juice serves as a means of achieving the recommended five portions of fruit and vegetables per day while overcoming the barriers to consumption.

However, the nutritional and physiological effects of fruit juice are controversial. A potentially high sugar intake may conflict with the intake of phytochemicals. As such, the physiological effect on health and sports performance is not yet clear. Due to the limited data available on diluted cloudy apple juice and chokeberry juice, there is a need to investigate their nutritional and physiological effects concerning acute exercise and training. Given their increasing popularity, diluted cloudy apple juice and superfoods such as chokeberry and chokeberry juice serve as subjects of research that have been scientifically analyzed for the first time in this PhD thesis.

This PhD thesis was the first to investigate the physiological interactions between acute exercise and training and the consumption of diluted cloudy apple juice and mixed red berry fruit juice with chokeberry content with regards to athletic performance and health as well as nutrient absorption. This thesis examined the impact of a single administration of diluted cloudy apple juice, in comparison to placebo and water, on the subsequent inflammatory and regenerative processes, with a particular focus on their impact on intestinal barrier function. The study population comprised non-specifically trained athletes and ultra-marathon runners who had engaged in either moderate-intensity or extreme endurance exercise. The physiological effects of diluted cloudy apple juice on intestinal barrier function were shown to differ between moderate and extreme endurance exercise. In particular, the effect of the sugars in the diluted cloudy apple juice was found to be influenced by the fruit juice matrix (FSM). Additionally, evidence of altered immune function was observed, as shown by an increase in CD14 protein concentration following diluted cloudy apple juice supplementation after moderate-intensity running exercise.

Furthermore, a mixed red berry fruit juice with 25 % chokeberry was compared to placebo for its antioxidative, anti-inflammatory, and recovery-supporting effects, as well as its impact on lower limb strength, in the context of high-intensity interval training (HIIT) in recreational runners. The HIIT protocol consisted of four interval sessions at an intensity of 120 % of the individual anaerobic threshold as determined by the Dmax method (LT(D)) and two moderate-intensity continuous runs at an intensity of 65 % of the LT(D). The mixed red berry fruit juice

was observed to exert a beneficial effect on leg strength in endurance athletes. However, no antioxidant, anti-inflammatory, or regenerative effects were discerned.

In addition to the antioxidative properties of the mixed fruit juice with chokeberry content, its impact on body weight and body composition, glucose metabolism, oxidative stress status, pulse wave velocity, and peripheral resistance was analyzed in a cohort of individuals with prediabetes mellitus, during both a strength and endurance intervention and without a training intervention. The training consisted of two 30-minute walking intervals separated by a guided high-intensity functional fitness strength training program and was conducted three times per week over a 14-day intervention period. The training and non-training interventions were implemented in a cross-over study design with short-term, repeated intake of either mixed red berry fruit juice or a placebo. Under resting conditions, the juice supplementation led to moderate improvements in peripheral vascular resistance, while, with the added effect of training, it helped maintain relative muscle mass. In contrast, only a small non-significant decrease in relative muscle mass was observed in the placebo group.

Our results indicate that the consumption of diluted cloudy apple juice may enhance the immune function and resilience in healthy athletes after acute moderate-intensity and extreme endurance exercise. For instance, we were able to show an improvement in intestinal barrier stability. Furthermore, the consumption of polyphenol-rich mixed red berry fruit juice was observed to enhance strength and muscle adaptation in both endurance athletes and individuals with prediabetes. Moreover, the consumption of the mixed red berry fruit juice was linked to beneficial effects on vascular health in non-exercising individuals with prediabetes.

In view of the findings of this study, it is recommended that future research investigate the efficacy of long-term supplementation with diluted cloudy apple juice, mixed red berry fruit juice with chokeberry content, and fruit juice in general, in larger and more diverse subject groups. It is recommended that standards are established with regard to the labeling of fruit juice ingredients, food analysis, fruit juice dosage, duration of use, accompanying nutritional surveys, and exercise protocols. Subsequent cell culture experiments may contribute to a deeper understanding of the underlying biological mechanisms. This could result in a more differentiated assessment of the interactions between the consumption of diluted cloudy apple juice and mixed red berry fruit juice with chokeberry content and acute and training-oriented exercise with regard to athletic performance and health. For example, the effects of the timing of intake or the effects of FSM could be considered. Furthermore, both the diluted cloudy apple juice and the mixed red berry fruit juice with chokeberry content could be categorized better nutritionally. This would facilitate the formulation of more precise dietary intake recommendations for different population groups while taking into account the impact of physical stress in different modalities.

Abkürzungsverzeichnis

1RM	One-repetition maximum (Ein-Wiederholung-Maximum)
ATP	Adenosintriphosphat
CK	Kreatinkinase
COX	Cyclooxygenasen
DGE	Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V.
e1RM	Estimated one-repetition maximum
EIMD	Exercised-induced muscle damage
NOS	NO-Synthasen
FSM	Fruchtsaftmatrix
GPxs	Glutathionperoxidasen
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
HbA1c	Hämoglobin A1c
HIIT	hochintensives Intervalltraining
IL	Interleukin
I-FABP	intestinales fettsäure-bindenden Protein
KAT	Katalase
LPS	Lipopolysaccharide
LT(D)	Individuelle anaerobe Schwelle ermittelt über Dmax-Methode
mTORC1	Rapamycin-Komplex 1
NADPH	Nicotinamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat
Na ⁺ /K ⁺ -ATPase	Natrium-Kalium-Pumpe
NCD	Non-communicable Diseases (Nicht-übertragbare Erkrankungen)
NF-κB	Nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B-cells
NO	Stickstoffmonoxid
NOX	NADPH-Oxidasen
Nrf2	Nuclear factor erythroid 2-related factor 2
O ₂ • ⁻	Superoxidanion
oxLDL	oxidiertes Low-density Lipoprotein
PWV	Pulswellengeschwindigkeit
ROS	Reaktive Sauerstoffspezies
SCFA	Short-chain fatty acid
SOD	Superoxiddismutase
TBARS	Thiobarbitursäure-reaktive Substanzen
TJ	Tight junctions
WHO	Weltgesundheitsorganisation

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Voraussetzungen, Eigenschaften und Adaptationen körperlicher Bewegung als einmalige Belastung sowie im Kontext von Training (eigene Darstellung in Anlehnung an [43], inhaltlich modifiziert nach [50,51].	6
Abbildung 2: Hauptklasseneinteilung der Polyphenole (in Anlehnung an [85] und modifiziert nach [14].	11
Abbildung 3 Antioxidative, anti-inflammatorische und vasodilatatorische Effekte von Polyphenolen in Betrachtung von sportlicher Leistungsfähigkeit, Regeneration und Gesundheit (eigene Darstellung, modifiziert nach [94]).	16
Abbildung 4 Grafische Zusammenfassung der wichtigsten Studienergebnisse (eigene Darstellung) ..	46

1 Einleitung

Fünf Portionen Obst und Gemüse am Tag werden in Deutschland als Basis für eine ausgewogene Ernährungsweise zum Schutz von Gesundheit und Umwelt empfohlen [1]. Eine Portion entspricht nach neuester Überarbeitung der lebensmittelbezogenen Ernährungsempfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e.V. (DGE) einem Orientierungswert von 110 g [2]. Dies gilt nicht nur für sich omnivor ernährende gesunde Erwachsene im Alter von 18 bis 65 Jahren, sondern wird ebenso für Sportler*innen befürwortet, um bei einer energiebedarfsdeckenden Ernährungsweise eine bedarfsdeckende Nährstoffzufuhr für Mineralstoffe und Vitamine zu erreichen [3]. In einer schnelllebigen Gesellschaft scheint unter anderem ein Zeitmangel im Alltag der Allgemeinbevölkerung und ein „Mengen-Zeit-Problem“ in den eng strukturierten Tagesplänen von Athlet*innen die Umsetzung dieser Empfehlung zu erschweren [3–5]. Auf einen daraus resultierenden Optimierungsbedarf im Konsum von Obst und Gemüse verweisen ebenfalls die Daten zum beobachteten Verzehr laut der Nationalen Verzehrsstudie II. Erwachsene im Alter von 18 bis 65 Jahren, die sich omnivor ernähren und für die eine durchschnittliche Energiezufuhr von 2029 Kilokalorien kalkuliert wurde, verzehren im Mittel nur 154 g Obst und 91 g Gemüse pro Tag [2]. Als mögliche Konsumhemmnisse für frisches Obst und Gemüse in unverarbeiteter Form können die Zubereitungszeit bis zur Verzehrbarkeit, eine begrenzte Frische und Haltbarkeit sowie hohe Einkaufspreise im Vergleich zu anderen Lebensmitteln identifiziert werden [6].

In diesem dargestellten Kontext könnte Fruchtsaft einen Beitrag leisten, die Verzehrsempfehlung von fünf Portionen Obst und Gemüse pro Tag zu erreichen [6,7]. Definitionsgemäß ist Fruchtsaft „das gärfähige, jedoch nicht gegorene, aus dem genießbaren Teil gesunder und reifer Früchte (frisch oder durch Kälte haltbar gemacht) einer oder mehrerer Fruchtarten gewonnene Erzeugnis, das die für den Saft dieser Frucht/Früchte charakteristische Farbe, das dafür charakteristische Aroma und den dafür charakteristischen Geschmack aufweist.“ [8]. Unabhängig von der verarbeiteten Frucht und dem Herstellungsverfahren als Direktfruchtsaft oder Fruchtsaft aus Fruchtsaftkonzentrat enthält dieser immer einen Fruchtgehalt von 100 % [8,9]. Beträgt der Fruchtgehalt weniger als 100 %, wie z.B. bei den Fruchtsaftschorlen, die zu den Erfrischungsgetränken zählen, ist diese Information entsprechend auf der Verpackung anzugeben [10]. Für weitere Spezifikationen und Ergänzungen dieser Definition sei an dieser Stelle auf die Fruchtsaft- und Erfrischungsgetränkeverordnung verwiesen [8]. In seiner Darreichungsform kann Fruchtsaft die zuvor genannten Konsumhemmnisse für frisches Obst und Gemüse abbauen, da dieser leicht zu transportieren ist, keiner weiteren Zubereitung bedarf, praktisch unterwegs verzehrt werden kann und länger haltbar sowie lagerfähig ist [6].

Ernährungsphysiologisch werden die Effekte und Wirkungen von Fruchtsaft dennoch kontrovers diskutiert. Im Vergleich zu Softdrinks wie beispielsweise Coca-Cola enthält Fruchtsaft, in Abhängigkeit von der verarbeiteten Frucht, bezogen auf einen Liter, vergleichbar viel oder sogar mehr Zucker [11,12]. Unter Berücksichtigung der Empfehlung der

Weltgesundheitsorganisation (WHO) zur maximalen Zufuhr freier Zucker über Monosaccharide, Disaccharide, Honig, Sirup, Fruchtsäfte und Fruchtsaftkonzentrate von weniger als 10 % der Gesamtenergiezufuhr [13] kann repräsentativ ein Glas mit 250 ml Apfelsaft und einer damit verbundenen Zufuhr von 25 g Zucker im Mittel diese maximale Obergrenze, bei einer durchschnittlichen Gesamtenergiezufuhr von 2000 Kilokalorien pro Tag, zur Hälfte ausfüllen [11,13–15]. Ein Beitrag durch einen regelmäßigen Fruchtsaftkonsum zu einer nutritiv erhöhten Zuckerzufuhr, die unter anderem im Zusammenhang mit Übergewicht bzw. Adipositas und erhöhten Risiken für zahlreiche mit Übergewicht assoziierten Erkrankungen wie beispielsweise Diabetes mellitus Typ 2 (T2DM) steht, kann daher nicht ausgeschlossen werden [15,16].

Im Bereich des Breiten- und des Spitzensports dagegen findet Fruchtsaft vor allem als Fruchtsaftschorle in Verdünnung mit Trink- bzw. Mineralwässern, besonders wegen des enthaltenen Zuckers, Anwendung [17]. Der Konsum wird nach körperlicher Belastung von Trainer*innen empfohlen und von Sportler*innen auch umfangreich praktiziert [18], da die Aufnahme zuckerhaltiger Getränke in wissenschaftlichen Studien als regenerationsfördernd beschrieben wird [19,20]. Weiterhin können über den Fruchtsaft Vitamine und Mineralien zugeführt werden, die beispielsweise in Form von Kalium notwendig sind, um die zugeführten Kohlenhydrate als Glykogen in den Glykogenspeichern einzulagern [17].

Besondere Aufmerksamkeit als Inhaltsstoffe von Fruchtsaft bzw. Fruchtsaftschorlen erhalten die Polyphenole als Substanzklasse der sekundären Pflanzenstoffe. Für diese werden zahlreiche positive gesundheitsbezogene Wirkungen (unter anderem antioxidative, anti-inflammatorische und anti-diabetische Effekte) beschrieben [21–23] und einigen Substanzen werden darüber hinaus ergogene Eigenschaften im Kontext der sportlichen Leistungsfähigkeit zugewiesen [24]. In diesem Zusammenhang wird im allgemeinen Sprachgebrauch für exotische Früchte und den daraus hergestellten Produkten der Begriff „Superfood“ verwendet, um besonders die benannten gesundheitsförderlichen Eigenschaften hervorzuheben und zu vermarkten [25].

Das Interesse an diesen sogenannten Superfoods und den beworbenen positiven Wirkungen, ausgehend von deren Inhaltsstoffen, wächst sowohl in der Allgemeinbevölkerung als auch unter Sportler*innen stetig [26–29]. Ein eindeutig wissenschaftlicher Beleg der gesundheitlichen Auswirkungen ist demgegenüber häufig nicht vorhanden [25]. Vorliegende Forschungsarbeiten haben besonders unter Betrachtung von akuter körperlicher Belastung und dem Konsum von polyphenolreichen Nahrungs- sowie Lebensmitteln, Säften und Konzentraten gesundheits- und leistungsbezogene Wirkungen untersucht [28,30–32]. Liegt der Fokus auf speziellen Superfoods, wie beispielsweise der Aroniabeere und dem daraus hergestellten Saft, lassen sich weitere einzelne Studien identifizieren, welche die Wechselwirkung zwischen dem Konsum von Superfoods und Sport darstellen. Im Kontext der daraus resultierenden Polyphenolzufuhr und akuten körperlichen sowie sich wiederholenden Trainingsbelastungen wurden bisher die Effekte auf den belastungs- und trainingsinduzierten Inflammationszustand und den oxidativen Stress bei Leistungs- sowie Hochleistungssportlern untersucht, in dessen Kontext sich Besserungen sowohl der Inflammationsreaktionen als auch

des oxidativen Stresszustands zeigten [33,34]. Wissenschaftliche Studien zu den Wechselwirkungen mit wiederholten Trainingsbelastungen im Zuge von definierten Trainingsprogrammen bei Sportler*innen aus dem Amateur- sowie Breitensportbereich oder Personen mit Prä-Disposition zur Entwicklung Nicht-übertragbarer Erkrankungen (*Non-communicable Diseases* - NCD) wie beispielsweise dem T2DM sind nur vereinzelt vorhanden [35–37].

Des Weiteren enthalten heimische Lebensmittel bzw. die daraus hergestellten Produkte, in Gegenüberstellung zu den Superfoods, vergleichbare Mengen an den potenziell wirksamen Inhaltsstoffen und sind aufgrund kürzerer Transportwege als ökologisch nachhaltiger zu bewerten [25].

Vor diesem Hintergrund und basierend auf dem hohen Pro-Kopf-Verbrauch für Apfelsaftschorle von 3,7 Litern in Deutschland für das Jahr 2023 [38] sind für diese Arbeit eine naturtrübe Apfelsaftschorle und stellvertretend für die Superfoods ein Aronia-Mischfruchtsaft ausgewählt worden.

Unter Berücksichtigung der dargestellten limitierten Datenlage zum Konsum von Fruchtsaft bzw. Fruchtsaftschorle im Kontext von definiert geplanten und durchgeführten Trainingsprogrammen soll diese Arbeit damit einen Beitrag leisten, physiologische Wechselwirkungen der in Apfelsaftschorle und Aronia-Mischfruchtsaft enthaltenen Inhaltsstoffe mit Fokus auf Gesundheit und Leistung zu identifizieren, wenn sowohl einmalige akute als auch wiederholte trainingsbezogene körperliche Aktivität stattfindet.

2 Wissenschaftlicher Hintergrund

In der nachfolgenden Darstellung der theoretischen Grundlagen dieser Arbeit soll zunächst der thematische Hintergrund zur Begrifflichkeit der körperlichen Aktivität differenzierter beschrieben werden. Eine Definition und Abgrenzung zum Sport und weitergehend zwischen einer einmaligen akuten körperlichen Belastung und einer wiederholt geplanten Trainingsbelastung wird dargelegt. Anschließend wird eine Übersicht zu den physiologisch wirksamen Inhaltsstoffen der Apfelsaftschorle und dem Aronia-Mischfruchtsaft gegeben, die in den Studien dieser Arbeit zur Anwendung gekommen sind. Thematisch wird sich einerseits auf die leistungs- und regenerationsfördernden Effekte sowie andererseits auf die gesundheitsbezogenen und präventiven Wirkungen der Inhaltsstoffe im Kontext von einmalig akuter körperlicher Belastung sowie Training fokussiert. Diese Themenbereiche stehen nachfolgend im Zentrum der dargestellten Veröffentlichungen.

2.1 Körperliche Aktivität im Sport

Regelmäßige körperliche Aktivität und Bewegung sind wesentliche Einflussfaktoren der Lebensqualität und besitzen eine Vielzahl von Effekten auf den menschlichen Organismus. Entsprechend empfiehlt die WHO 150 Minuten moderate Ausdaueraktivitäten und zwei

Krafteinheiten pro Woche. Dies gilt als Basis zur Erhaltung von Gesundheit und Wohlbefinden, zur Verbesserung der Körperzusammensetzung und zur Prävention von Knochenbrüchen sowie von NCD wie beispielsweise dem T2DM [39]. Körperliche Aktivität sollte daraus abgeleitet in jedem Alter gefördert werden [40,41].

Allgemein ist der Begriff „körperliche Aktivität“ vom Begriff „Sport“ zu differenzieren. Körperliche Aktivität gilt definitionsgemäß als Oberbegriff für jede körperliche Bewegung, für welche die Skelettmuskulatur aktiv benötigt und der Energieumsatz über den Grundumsatz hinaus erhöht wird [40–42]. Weiterführend kann diese Begrifflichkeit in berufliche, sportliche, konditionelle, häusliche und andere Aktivitäten eingeteilt werden [41,43].

Sport gilt in diesem Kontext abgeleitet als Untergruppe der körperlichen Aktivität, die definierte Eigenschaften¹ in dem Sinne besitzt, dass die Verbesserung oder Aufrechterhaltung von einer oder mehreren Komponenten der körperlichen Fitness ein Ziel ist [42,43]. Die körperliche Fitness bezeichnet darauf basierend Eigenschaften, die Menschen haben oder erreichen können, und ist nach C. Carson Conrad „die Fähigkeit, die täglichen Aufgaben mit Elan und Wachsamkeit, ohne übermäßige Ermüdung und mit ausreichender Freizeitbeschäftigung zu genießen und unvorhergesehene Notfälle zu bewältigen“ [42,44]. Aktuellere Betrachtungsweisen beziehen sich im Kontext von Fitness besonders auf die motorische Komponente und definieren einen „Zustand, der die körperliche Leistungsfähigkeit bzw. die Entwicklung der konditionellen Fähigkeiten Kraft, Ausdauer, Schnelligkeit, Beweglichkeit und Koordination umfasst [...]“ [45]. Die körperliche Leistungsfähigkeit und deren Veränderung werden im Themenfeld des Sports bzw. der Forschungsdisziplin der Sportwissenschaft unter anderem herangezogen, um verschiedene Adressatengruppen (z.B. den Gesundheits-, Freizeit-, Breiten-, oder Leistungssport etc.) und Anwendungsfelder (z.B. rehabilitative, präventive, soziokulturelle etc.) in eine Definition von Sport und Training einzuordnen [46,47].

Vor diesem Hintergrund stellt der Gesundheitssport ein strukturiert angeleitetes Bewegungs- und Sportangebot dar, das unterstützen soll, gesundheitsförderliche körperliche Aktivität als Bewegung und Sport in alltägliche Abläufe einzubauen. Eine Motivation zu einem gesundheitsorientierten, eigenverantwortlichen Bewegungsverhalten soll geschaffen werden, die eine Verbindung zum Freizeit- und Breitensport herstellen kann [40,48]. Der Freizeitsport folgt keiner direkten Zielorientierung, da im Zuge der sportlichen Aktivität mit der körperlichen Bewegung der Spaß und die gemeinsam verbrachte Zeit mit anderen Personen unter nicht organisierten Rahmenbedingungen im Fokus stehen. Findet dieser Sport stattdessen in einem geregelten Rahmen, meist in Vereinsstrukturen oder Trainingsgruppen und dann in Ausrichtung auf definierte Sportarten statt, wird dies dem Breitensport zugeordnet [48]. Der Leistungssport grenzt sich weitergehend durch den Fokus auf den Ausprägungsgrad einer bestimmten sportmotorischen Leistung und den daraus resultierenden Ergebnissen als Wettkampffresultate und dem Erreichen von sportlichen Höchstleistungen ab, unter der Voraussetzung des Vollzugs der sportlichen Tätigkeiten als definiertes Training oder Wettkampf in einem Trainings- bzw. Saisonzyklus [47,48].

¹ Die Eigenschaften des Begriffs Sport überschneiden sich mit jenen von Training und werden unter 2.2 näher erläutert.

Vertiefend zu den verschiedenen Bereichen, in denen Sport als körperliche Aktivität stattfinden kann, soll der Trainingsbegriff im metabolischen Kontext als sich wiederholende körperliche Belastung weitergehend aufgegriffen, definiert und von einer einmaligen akuten körperlichen Belastung abgegrenzt werden.

2.2 Einmalige akute körperliche Belastung und Training - Definition und Abgrenzung

Zum Verständnis der physiologischen Wirkungen verschiedener Arten von körperlicher Bewegung im Sport und dem schon genannten Trainingsbegriff ist es von Bedeutung, die körperliche Bewegung als Belastung zu verstehen sowie zu definieren. Das Internationale Olympische Komitee beschreibt die Belastung als eine sportliche und außersportliche Last in Form eines Reizes, der auf den menschlichen Organismus als biologisches System in verschiedenen Bereichen (subzelluläre Elemente, einzelne Zellen, Gewebe, einem oder mehreren Organsystemen oder dem gesamten Individuum) einwirkt. Diese kann über verschiedene Zeitspannen (Sekunden, Minuten, Stunden bis hin zu Tagen, Wochen, Monaten und Jahren) und mit unterschiedlicher Häufigkeit sowie Intensität das menschliche biologische System beeinflussen [49]. In Fokussierung auf die Belastung als sportlichen Reiz, in Form körperlicher Bewegung, kann unter anderem eine einmalige akute Belastung von einer wiederkehrenden, planmäßig systematischen und je nach Definition zielorientierten komplexen Handlungsweise, die dann als Training beschrieben wird, unterschieden werden [49,50]. Beide Arten von körperlicher Bewegung unterliegen spezifischen Voraussetzungen, die sowohl bezogen auf das Individuum (körperliche Eignung und Motivation) als auch durch Umweltfaktoren (örtliche Gegebenheiten bzw. Sportstätten) auf die Durchführung Einfluss nehmen [43]. Ebenso führen beide körperlichen Belastungsarten im Kontext des biologischen Systems Mensch zu Anpassungs- bzw. Adaptationsprozessen. Als Reaktion auf eine einmalige akute Belastung wechselt der Organismus aus der Ruhe- in die Beanspruchungssituation, sodass die physiologische Homöostase verändert werden kann. Beispielsweise werden die Atem- und Herzfrequenz schneller, die Muskulatur wird den Anforderungen entsprechend mehr durchblutet und mit energiereichen Substraten versorgt [51,52]. Diese Anpassungen an akute einmalige Belastungen sind reversibel und bilden sich nach Beendigung der Belastung wieder zurück. In Betrachtung des biologischen Systems ändert sich dadurch dessen Funktionsweise, und diese kurzzeitigen Veränderungen werden als funktionelle Adaptationen bezeichnet [51].

Ergänzend dazu kann eine regelmäßig wiederkehrende Belastung eine strukturelle bzw. morphologische Adaptation herbeiführen. Trainingseinheiten, die wiederholt und geplant definiert auf den menschlichen Organismus einwirken, können beispielsweise zu einer Zunahme an Muskelmasse und Kraftfähigkeit in Folge von Krafttraining oder zu einer erhöhten Anzahl an Mitochondrien und damit einer gesteigerten Ausdauerleistungsfähigkeit beitragen [53,54]. Diese strukturellen Adaptationen sind nicht sofort reversibel und bilden sich erst nach

zeitlich variierend anhaltenden Phasen der körperlichen Inaktivität wieder zurück [55,56]². Abbildung 1 fasst die genannten Voraussetzungen, Eigenschaften und verschiedenen Arten von Adaptationen körperlicher Bewegung als einmalige Belastung sowie im Kontext von Training grafisch zusammen.

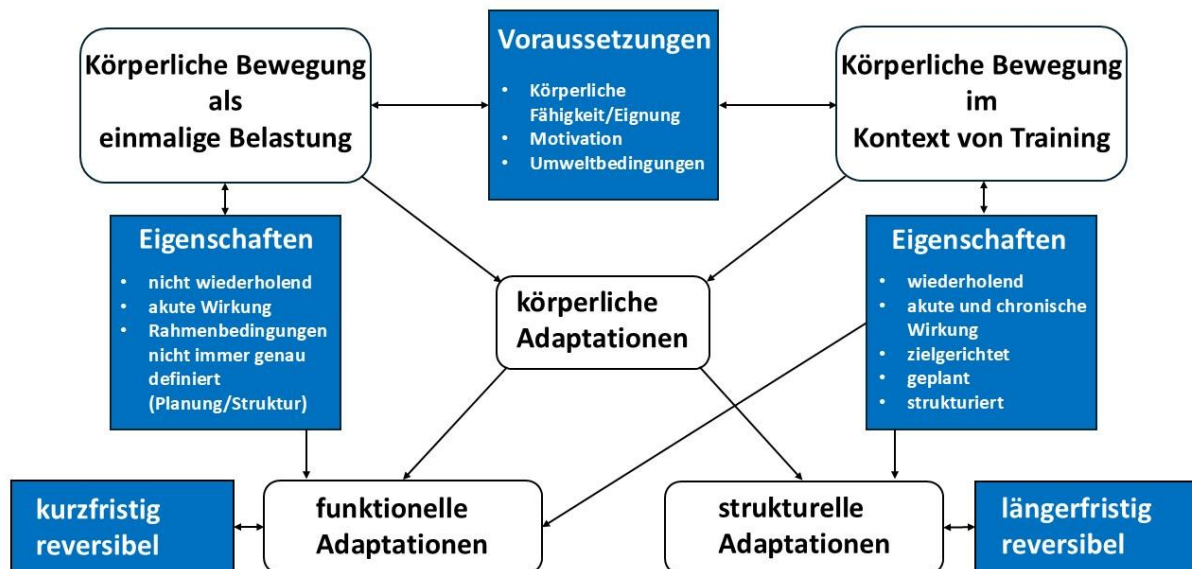


Abbildung 1: Voraussetzungen, Eigenschaften und Adaptationen körperlicher Bewegung als einmalige Belastung sowie im Kontext von Training (eigene Darstellung in Anlehnung an [43], inhaltlich modifiziert nach [50,51]).

2.3 Potenzielle physiologische Wechselwirkungen von Inhaltsstoffen der Apfelsaftschorle sowie des Aronia-Mischfruchtsafts und Sport

Physiologische Adaptationsprozesse an verschiedene Arten von körperlicher Bewegung im Sport stehen in Wechselwirkung zur Ernährung des sportlich aktiven Individuums [57]. Die wechselseitigen Effekte gehen sowohl aus der habituellen Ernährungsweise als auch aus Ernährungsstrategien, die begleitend zu körperlichen Belastungen sind, hervor und können die sportliche Leistungsfähigkeit, Regenerationsprozesse und die Gesundheit beeinflussen [57–59]. Das nutritive Profil der Inhaltsstoffe von Apfelsaft und Aronia-Fruchtsaft zeigt in der wissenschaftlichen Literatur vielversprechende Wirkungsweisen in Bezug zur sportlichen Leistungsfähigkeit, Regeneration und gesundheitsbezogenen Effekten [33–35,60], die nachfolgend differenzierter dargelegt werden sollen.

2.3.1 Zucker

Zucker bezeichnet einen Sammelbegriff für eine Reihe von Substanzen, die natürlicherweise in Lebensmitteln, Fruchtsäften und Fruchtsaftschorlen vorkommen oder als Zutat zugesetzt

² Für eine detaillierte Darstellung der Rückbildung von längerfristigen körperlichen Adaptationen durch Training ist an dieser Stelle auf die beiden Review-Artikel von Iñigo Mujika und Sabino Padilla [55],[56] zu verweisen, die für körperliche Inaktivität bzw. Detraining über weniger und mehr als vier Wochen eine Übersicht zu physiologischen Prozessen im menschlichen Körper geben.

werden. Diese bilden eine chemische Stoffklasse, die als Untergruppe der Kohlenhydrate ebenso wie diese aus den drei chemischen Elementen Kohlenstoff, Sauerstoff sowie Wasserstoff bestehen und die Summenformel: $C_nH_{2n}O_n$ besitzen [61]. Die nutritiv essenziellsten Zucker in der Apfelsaftschorle und in dem Aronia-Mischfruchtsaft, die in den Studien dieser Arbeit verwendet wurden, stellen die beiden Monosaccharide Glukose und Fruktose sowie das aus diesen beiden Einfachzuckern zusammengesetzte Disaccharid Saccharose dar³.

2.3.1.1 Monosaccharide - Vorkommen und Eigenschaften

Glukose ist der wichtigste Zucker, da diese die am meisten vorzufindende organisch-chemische Verbindung der Welt darstellt [61]. Das Monosaccharid ist der Grundbaustein für die pflanzliche sowie tierische Speicherform der Kohlenhydrate als Stärke bzw. Glykogen und dem pflanzlichen Baustoff Zellulose. Letztgenannte ist für den Menschen unverdaulich, kann aber als unlösliche Nahrungsfaser unmittelbar die Sättigungswirkung, die Darmperistaltik und -transitzeit der Nahrung beeinflussen [61], sodass mit einer verkürzten Darmtransit-Zeit der beschleunigte Abtransport toxischer Stoffe aus dem Darm stattfindet. Zusätzlich kann auch Cholesterin gebunden und ausgeschieden werden [62]. Im Dickdarm können die Nahrungsfasern durch die dort angesiedelte Mikrobiota fermentiert und kurzkettige Fettsäuren (engl. *short-chain fatty acid* (SCFA)) in Form von Acetat, Butyrat und Propionat synthetisiert werden. Diese fungieren über G-Protein-gekoppelte Rezeptoren als wichtige Signaltransduktoren im menschlichen Metabolismus [63].

Fruktose wird unter anderem auch als Fruchtzucker bezeichnet, da dieses Monosaccharid in seiner natürlichen Form in zahlreichen Früchten vorkommt [61]. Als einziger niedermolekularer Kohlenhydratbaustein kann Fruktose insulinunabhängig in der Leber verstoffwechselt und über den Glukosetransporter 5 dem menschlichen Stoffwechsel zugänglich gemacht werden [64].

Saccharose (α -D-Glucopyranosyl-(1-2)- β -D-fructofuranosid) ist ein Disaccharid, zusammengesetzt über eine α -1 $\rightarrow$ 2 glykosidische Bindung aus einem Glukose- und einem Fruktose-Molekül, das umgangssprachlich als Haushaltszucker benannt wird. Saccharose kommt natürlicherweise in vielen Pflanzenteilen, wie beispielsweise in Früchten, Blättern und Wurzeln vor, so dass in Deutschland die Zuckerrübe eine wichtige Quelle zur industriellen Gewinnung darstellt [61]. In der Nahrung des Menschen ist dieses Disaccharid das am meisten genutzte Süßungsmittel und kann nach enzymatischer Spaltung durch Saccharase in Glukose und Fruktose in der Glykolyse bzw. in der Leber energetisch verstoffwechselt werden. Im Falle eines Überschusses, der energetisch nicht genutzt wird, kann die Saccharose als Glykogen bzw. in Form von Körperfett gespeichert werden [64]⁴.

Der Gesamtzuckergehalt und der Anteil an Glukose, Fruktose und Saccharose, der in dieser Dissertation verwendeten Apfelsaftschorle und des Aronia-Mischfruchtsafts, sind mit jeweils 5,75 g, 1,34 g, 3,5 g und 0,91 g pro 100 ml Apfelsaftschorle sowie im Mittel 11,83 g, 5,77 g,

³ vgl. Angaben zum Nährstoffprofil der Studiengetränke im Anhang dieser Arbeit.

⁴ Es ist darauf zu verweisen, dass Glukose und Fruktose als einzelne Monosaccharide bei einem Überschuss in der Energiebedarfsdeckung ebenfalls als Glykogen oder als Körperfett gespeichert werden können.

5,99 g und <0,05 g pro 100 ml Aronia-Mischfruchtsaft vergleichbar mit anderen Frucht- bzw. Apfelsaftschorlen und Fruchtsäften [60,65].

2.3.1.2 Monosaccharide - mögliche Effekte auf sportliche Leistung und Gesundheit

Die in der Apfelsaftschorle und dem Aronia-Mischfruchtsaft benannten Mono- und Disaccharide tragen, wie viele weitere für den Menschen bioverfügbare Kohlenhydrate, zu dessen Energieversorgung bei [61]. Diese Funktion der Energiebereitstellung ist besonders im Sport essentiell [66,67], da die Adenosintriphosphat (ATP)-Resynthese pro Zeiteinheit aus Glukose in der aeroben Glykolyse doppelt bzw. aus der anaeroben Glykolyse vier Mal so hoch ist wie die Energiegewinnung aus Fettsäuren [67]. Verbunden mit der passiven Absorption über den Glukosetransporter 2 gilt die Glukose als schnell verfügbare Energiequelle [67,68]. Die beschriebene effiziente Energiegewinnung aus der Glukose als ATP weist besonders für die im Ausdauersport wichtige Sauerstoffaufnahme Leistungsvorteile auf, da pro Liter Sauerstoff je Zeiteinheit mehr nutzbare Energie zur Verfügung steht [67]. Die Fruktose kann ebenfalls über eine Phosphorylierung mittels der Fruktokinase zu Fruktose-1-phosphat und einer Transformation zu Glycerinaldehyd mittels Aldolase B fortlaufend über die Glycerinaldehydkinase in die Glykolyse eingeschleust werden [64].

Weiterhin ist es möglich, dass die in den saftbasierten Studiengetränken enthaltene Fruktose in Co-Ingestion mit der benannten Glukose dazu führt, dass einerseits die Glukoseabsorption, besonders bei längeren sportlichen Belastungen mit mittlerer bis hoher Intensität, verbessert und andererseits eine schnelle Flüssigkeitsaufnahme und Absorption der in der Flüssigkeit befindlichen zusätzlichen Teilchen im Dünndarm stimuliert wird [69,70]. Eine vor der sportlichen Belastung zugeführte Kombination von Fruktose und Glukose könnte folglich dazu beitragen, die exogene Kohlenhydratoxidation während des Trainings zu erhöhen, da die Begrenzung der Glukoseabsorptionskapazität über den Natrium-Glukose-Kotransporter in den Hintergrund rückt und daraus eine Verbesserung der sportlichen Leistung hervorgehen kann, weil mehr Energie pro Zeiteinheit zur Verfügung steht [69]. Nach sportlichen Belastungen bzw. Trainingseinheiten können über diese Zuckerzufuhr regenerationsunterstützende Effekte durch eine Glykogenauffüllung vor allem in der Leber induziert werden [19,20,69]. Dies ist von besonderer Bedeutung, wenn eine schnelle Erholung innerhalb von 24 Stunden erforderlich ist [69].

Demgegenüber ist ein hoher Anteil an Fruktose in der erhöhten Energiezufuhr zur Bedarfsdeckung bei Sportler*innen mit Stoffwechselstörungen in Verbindung gebracht worden. Die schnelle Metabolisierung von Fruktose in der Leber und der daraus resultierende Abfall der hepatischen ATP-Konzentration wurden mit mitochondrialer und endothelialer Dysfunktion assoziiert – Veränderungen, die Übergewicht, Adipositas, Diabetes und Bluthochdruck begünstigen könnten [70].

Ergänzend wächst die Zahl von Forschungsarbeiten, die die negativen Auswirkungen einer übermäßigen oder anhaltenden Zuckeraufnahme >10 % der Gesamtenergiezufuhr laut WHO [13], insbesondere für Fruktose, in Bezug zu gesundheitsbezogenen Outcomes herausstellen [71]. Es zeigt sich beispielsweise eine zunehmende Prävalenz für die nichtalkoholische Fettlebererkrankung als hepatische Manifestation des metabolischen Syndroms, deren

Prävalenz parallel steigend zur Zunahme des Anteils von Fettleibigkeit und Diabetes verläuft [72].

Weiterhin kann diese Art von Zuckeraufnahme die Darmbarrierefunktion negativ beeinflussen [71]. Die hohe an der Darmbarriere anflutende Zuckermenge reduziert die symbiotisch mit den Darmepithelzellen verbundene Mikrobiota (meist SCFA-Produzenten) inklusive den die Darmwand schützenden Mukus-Schleim [73]. Damit liegen die *tight junctions* (TJ) als bedeutende multiple Proteinkomplexe frei, welche einerseits die Schutzbarrierefunktion gegenüber Pathogenen und andererseits die Nährstoffabsorption aus dem Chymus über die Darmbarriere regulieren und können aufgetrennt werden [71]. Dies geschieht durch Konformationsänderung der Transmembranproteine Claudin, Occludin, Tricellulin und Junctional Adhäsionsmolekül A sowie der intrazellulären Plaque-Proteine Zonula Occludens und Cingulin [74]. Der Bindungsverlust, besonders zwischen den verschiedenen Isoformen des Claudins, Occludins und des Zonula Occludens, begünstigt die Translokation von bakteriellen Endotoxinen in die systemische Blutzirkulation mit der Folge der Induktion einer pro-inflammatorischen Reaktion [74,75]. Die Stärke dieser pro-inflammatorischen Zytokinausschüttung wird durch Einwirkung von der Fruktose auf die Darmmikrobiota als besonders hoch eingeschätzt [71,76].

Erwähnenswert ist außerdem, dass eine vermehrte Zuckerzufuhr, die beispielsweise über die Einnahme der Studiengetränke dieser Arbeit resultieren könnte, zur Ausbildung einer Insulinresistenz bei prä-disponierten Personen führen kann, weshalb eine Reduktion der Zufuhr von Einfachzuckern, unter anderem über Fruchtsäfte, empfohlen wird [77].

Die bisherige Datenlage zur Zuckerzufuhr aus Fruchtsäften insgesamt deutet allerdings einige Kontroversen an, da wissenschaftliche Studien mit einem täglichen Fruchtsaftkonsum zwischen 75-224 ml ebenso keine negative Risikoerhöhung für die Induktion von Adipositas, NCD oder einer schlechteren Blutzuckerkontrolle zeigen konnten [78]. Vor dem Hintergrund der kontroversen Studienergebnisse scheint die Fruchtsaftmatrix (FSM) einen Effekt auf die metabolische Zuckerwirkung im Humanstoffwechsel zu haben, dessen Mechanismus noch unklar erscheint [79]. Zudem scheint ein Mechanismus zu existieren, der als katalytische Dosis bezeichnet wird und eine Fruktose-Dosis beschreibt, die die Glukosetoleranz verbessern könnte. Akut konnte gezeigt werden, dass die Zugabe einer geringen (7,5 g) Fruktosedosis zu einem oralen Glukosetoleranztest mit 75 g Glukose die glykämische Reaktion bei Menschen mit und ohne T2DM reduziert [80,81]. Diese Reduktion wird mit einer Stimulierung der Glukokinase-Translokation in Verbindung gebracht, da Glukokinase Glukose beim Eintritt in den Leberstoffwechsel phosphoryliert und dies einen entscheidenden geschwindigkeitsbestimmenden Schritt im hepatischen Glukosestoffwechsel darstellt. Ebenso konnten in einer Meta-Analyse, basierend auf diesem Konzept der katalytischen Dosis, bei einer mittleren Fruktoseaufnahme von 32,5 g/Tag über einen Zeitraum von durchschnittlich sechs Wochen Reduktionen in den Hämoglobin A1c (HbA1c)-Werten und der Nüchternglukosekonzentrationen der Studienkollektive festgestellt werden [79,82].

2.3.2 Sekundäre Pflanzenstoffe - Polyphenole

Sekundäre Pflanzenstoffe sind Metabolite, die in geringen Konzentrationen im Sekundärmetabolismus von Pflanzen⁵ synthetisiert werden, ohne eine essenzielle Funktion in Wachstum und Entwicklung von zellulären Bestandteilen zu besitzen [85,86]. In den Pflanzen dienen diese chemisch heterogenen Verbindungen unter anderem als Abwehrstoffe gegen Krankheiten, Schädlinge und Fressfeinde, als Wachstumsregulatoren sowie als Lock-, Duft-, Farb- oder Geschmacksstoffe [86]. Die Vielfalt und Anzahl der sekundären Pflanzenstoffe in der Natur sind nicht genau zu definieren und werden auf 400.000 chemische Verbindungen geschätzt, von denen 100.000 bekannt sind und 5.000 bis 10.000 in der Nahrung vorkommen [86,87]. Der Mensch nimmt durch eine omnivore Ernährungsweise ungefähr 1,5 g pro Tag an sekundären Pflanzenstoffen zu sich. Bei vegetarisch oder vegan lebenden Personen mit einer vorwiegend oder ausschließlich pflanzenbasierten Ernährungsweise kann diese Zufuhr noch höher eingeschätzt werden [87]. Unter der Annahme einer möglichen pharmakologischen Wirkung der sekundären Pflanzenstoffe auf den Menschen können sich in Abhängigkeit von der Dosierung sowohl positive als auch negative Effekte zeigen [88]. Neben potenziell leistungs- und gesundheitsförderlichen Effekten, die nachfolgend noch genauer dargelegt werden, kann die Bioverfügbarkeit von Nährstoffen reduziert werden, sodass unter anderem phenolische Pflanzenstoffe beispielsweise die Absorption, besonders von nicht-Häm-Eisen herabsetzen können [59,89]. In der üblichen Menge an verzehrten Lebensmitteln gelten fast alle natürlichen phytochemischen Bestandteile jedoch als toxikologisch unbedenklich [88].

Die wichtigsten sekundären Pflanzenstoffe in der Ernährung des Menschen lassen sich basierend auf der chemischen Struktur und den funktionalen Eigenschaften in die Substanzklassen Carotinoide, Phytosterole, Saponine, Glucosinolate, Proteaseinhibitoren, Monoterpene, Phytoöstrogene, Sulfide und Polyphenole differenzieren [88]. Letztgenannte Polyphenole zeichnen sich strukturell durch zwei oder mehrere Hydroxylgruppen, die an einen oder mehrere Benzolringe gebunden sind, aus und lassen sich weitergehend in die vier phenolischen Hauptklassen (Phenol) Carbonsäuren, Flavonoide, Tannine und Stilbene unterteilen [14,90]. Die Phenolcarbonsäuren untergliedern sich fortlaufend in Hydroxyzimt- und Hydroxybenzoesäuren [91]. Hydroxyzimtsäuren stellen Hydroxyderivate der Zimtsäure (3-Phenylacrylsäure) dar und differenzieren sich entsprechend ihrem Substituenten am C6-C3 Kohlenstoffgerüst. Die Hydroxybenzoesäuren zeichnen sich chemisch durch einen Benzolring aus, an den eine Carboxy- und eine Hydroxygruppe als Substituenten angelagert sind. Durch verschiedene Stellungen der Hydroxylgruppe in der ortho-, meta- und para-Position ergeben sich die drei Konstitutionsisomere o-Hydroxybenzoesäure, m-Hydroxybenzoesäure und p-Hydroxybenzoesäure [91].

Die Flavonoide bestehen aus zwei aromatischen Ringen, die durch eine dreigliedrige Kohlenstoffkette verbunden sind. Diese beinhaltet meist einen sauerstoffhaltigen Heterozyklus und lässt eine weitere Unterteilung auf der Grundlage des Oxidationsgrades des

⁵ Für eine detaillierte Darstellung des pflanzlichen Sekundärmetabolismus und der Synthese von sekundären Pflanzenstoffen aus Metaboliten des Shikimat-Stoffwechselwegs, der Glykolyse und des Citratzyklus ist an dieser Stelle auf die Literatur von Michael Wink [83] und Paul M. Dewick [84] zu verweisen.

sauerstoffhaltigen Heterozyklus in die folgenden Unterklassen zu: Flavanole (Catechine), Flavandiole, Anthocyanidine, Flavanone, Isoflavone, (Dihydro)flavonole, Aurone und (Dihydro)chalcone [90]. Tannine sind Oligomere und Polymere von Flavonoiden und lassen sich in kondensierte Tannine (Proanthocyanidine) und hydrolysierbare Gerbstoffe (Procyanidine) einteilen [90]. Stilbene bestehen aus aromatischen Ringen mit 2×6 Kohlenstoffatomen, die durch eine 2-Kohlenstoff-Brücke mit einer Doppelbindung verbunden sind [90]. Diese phenolische Hauptklasseneinteilung ist in Abbildung 2 zusammengefasst. Auf eine Darstellung der Lignane als eine weitere mögliche phenolische Hauptklasse [90] wird an dieser Stelle verzichtet, da diese keine Relevanz für die in den Studien dieser Arbeit verwendeten Studiengetränke besitzt.

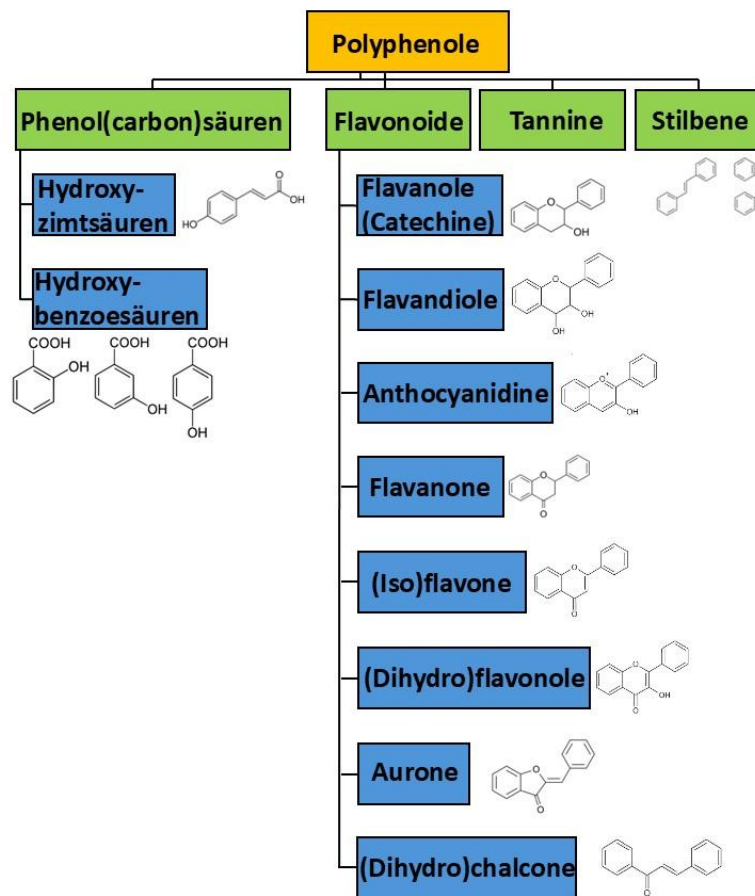


Abbildung 2: Hauptklasseneinteilung der Polyphenole (in Anlehnung an [85] und modifiziert nach [14]. Auf die Darstellung der allgemeinen Strukturformel der Tannine wird aufgrund der Komplexität und der eingeschränkten thematischen Relevanz an dieser Stelle verzichtet. Bildquellen der Strukturformeln: Hydroxyzimtsäuren: [92] (beispielhaft), Hydroxybenzoesäuren: [93], Stilbene: [94].

Für Äpfel und die daraus hergestellten Produkte wie Apfelsaft und Apfelsaftschorle wurden für die enthaltenen Polyphenole Verbindungen in den fünf phenolischen Hauptklassen der Flavanole (Catechine, Epicatechin und Procyanidine), (Dihydro)flavonole (Quercetin-Glycoside), Phenolsäuren (Chlorogen-, Gallussäure und Cumarsäure), Dihydrochalcone (Phloretin-glykoside) und Anthocyanidine bzw. Anthocyane (Cyanidin) identifiziert [60]. Für den Aronia-Mischfruchtsaft, dessen Fruchtsaftanteil vorwiegend auf Trauben- und Aroniasaft basiert, können Flavanole, Flavonole, Stilbene, Procyanidine als chemische Vorstufe der

Anthocyanidine, Anthocyanidine bzw. Anthocyane und Phenolsäuren chemisch quantifiziert werden [95,96].

Von diesen in den Studiengetränken enthaltenen Substanzklassen der Polyphenole lassen sich potenzielle Wirkungen auf die sportliche Leistungsfähigkeit, Regenerationsprozesse nach sportlicher Belastung sowie Training und auf die Gesundheit in antioxidative, anti-inflammatorische und vasodilatatorische Effekte zusammenfassen [90,97]. Ergänzend wurden anti-diabetische Einflüsse beschrieben, die sich den gesundheitlich positiven Wirkungen zuordnen lassen [98].

2.3.2.1 Polyphenole - Darstellung antioxidativer Wirkmechanismen und mögliche Effekte auf sportliche Leistung und Gesundheit

Antioxidative Wirkmechanismen sind im menschlichen Organismus bedeutsam, da besonders im Zuge der Elektronentransportkette in den Mitochondrien neben ATP als energiereiches Endprodukt der oxidativen Phosphorylierung begleitend immer reaktive Sauerstoffspezies (ROS)⁶ entstehen [21,99]. Die Begrifflichkeit der ROS umfasst in diesem Kontext nicht nur freie Sauerstoffradikale, die, mit einem oder mehreren ungepaarten Elektronen auf den Atom- bzw. Molekülorbitalen, natürliche Nebenprodukte des Sauerstoffstoffwechsels darstellen, sondern auch neutrale Atome, Moleküle und Ionen. [21,100]. Neben dem Superoxidanion ($O_2^{\bullet-}$)⁷, dem Hydroxylradikal ($HO^{\bullet}$), dem Hydroxidradikal ($HO_2^{\bullet}$), dem Peroxidradikal ($ROO^{\bullet}$) und dem Alkoxyradikal ($RO^{\bullet}$) als „klassisch definierte“ Sauerstoffradikale werden ergänzend Singulett-Sauerstoff (1O_2), Wasserstoffperoxid (H_2O_2), Peroxidionen (O_2^-) und hypochlorige Säure ($HOCl$) als nichtradikalische Verbindungen zu den ROS gezählt [21,101,102]. Die Bildung von ROS beschränkt sich nicht nur auf die Mitochondrien, denn auch Enzyme wie Nicotinamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat (NADPH)-Oxidasen (NOX) und die Xanthinoxidase oder Immunreaktionen können die endogene Synthese fördern [99]. Gleichbedeutend können externe Faktoren wie unter anderem ultraviolette Strahlung, Zigarettenrauch oder intensive körperliche Bewegung als einmalige Belastung sowie als sich wiederholende Trainingseinheiten zur Bildung von ROS beitragen [21,103,104]. Eine Zunahme der ROS-Konzentration muss für den menschlichen Organismus nicht nachteilig sein, da die ROS eine bedeutende physiologische Funktion als sekundäre Signalbotenstoffe zellulärer Signalkaskaden besitzen, bei denen Elektronenübertragungsprozesse zu Anpassungsreaktionen im Körper führen können [21,99,105]. Folglich kann eine durch körperliche Belastung und Training induzierte ROS-Bildung zu einer Veränderung des metabolischen Redox-Gleichgewichts beitragen, die essentiell für die Modulation zahlreicher genetischer Transkriptionswege für Adaptionsprozesse an körperliches Training sind und abgegrenzt werden müssen von schädlichen Auswirkungen beispielsweise durch toxische Umwelteinflüsse [105]. Negative Effekte resultieren erst durch ein Ungleichgewicht aus

⁶ Ergänzend zu den ROS können im menschlichen Körper ebenfalls reaktive Stickstoffspezies entstehen, auf die an dieser Stelle aufgrund einer geringeren thematischen Relevanz nicht weiter eingegangen werden soll.

⁷ Die oben angeführte Darstellung zur Einführung der ROS wird ergänzend vorgestellt, da die Verbindungen in wissenschaftlichen Ausarbeitungen häufig so beschrieben werden. Diese wurden jedoch nur bei weiterer Verwendung innerhalb der Arbeit ins Abkürzungsverzeichnis integriert.

übermäßiger ROS-Generierung und nicht ausreichender Kapazität antioxidativer Schutzmechanismen, sodass daraus oxidativer Stress hervorgeht [21]. Oxidativer Stress kann in diesem Kontext unter anderem zu chronischen Ermüdungserscheinungen und nicht funktionellem Übertraining bei Sportler*innen sowie allgemein zu NCD, chronisch obstruktiven Lungenerkrankungen, chronischen Nierenerkrankungen, neurodegenerativen Erkrankungen und Krebs beitragen [105,106]. Weiterhin sind die Induktion von Nahrungsmittelallergien, chronisch entzündlichen Darmerkrankungen, alkoholischer Steatohepatitis und Adipositas durch die Einwirkung von ROS auf die TJ in der Darmbarriere möglich [107].

Polyphenole gelten als Antioxidantien, die, über die Ernährung nutritiv zugeführt, die endogenen antioxidativen Schutzmechanismen des Menschen unterstützen können [108]. Für eine direkte antioxidative Wirkung werden die Konzentrationen im Blut jedoch allgemein als zu niedrig eingeschätzt, da die maximalen Plasmakonzentrationen von konjugierten und unkonjugierten Polyphenolen in einem Bereich von 0,1 bis 22 $\mu\text{mol/L}$ beschrieben werden, während vergleichend die Konzentration beispielsweise von Plasmaharnstoff (Plasmaurat) als ein wichtiges Plasmakompartiment-Antioxidans zwischen 150 - 450 $\mu\text{mol/L}$ angegeben wird [90,109,110]. Eine ernährungsphysiologische Dosis-Wirkungsbeziehung für Polyphenole ist bisher *in-vivo* jedoch nicht eindeutig ermittelt worden [109,110]. Paradoxerweise lassen sich inzwischen immer mehr Belege dafür identifizieren, dass die antioxidativen Effekte von Polyphenolen aus ihrer pro-oxidativen Wirkung nach *in-vivo*-Exposition gegenüber ROS hervorzugehen scheinen [90]. Diese durch Polyphenolkonsum induzierte zusätzliche Synthese von ROS soll zur Aktivierung des *Nuclear factor erythroid 2-related factor 2* (Nrf2) Stoffwechselweges über die Enhancer-Sequenz des Antioxidantien-Reaktions-Elements beitragen, so dass aus der über die Antioxidantien-Reaktions-Element vermittelte Genexpression nachfolgend eine erhöhte Synthese von endogenen antioxidativen und ROS-neutralisierenden Enzymen wie der Superoxiddismutase (SOD), Katalase (KAT) und Peroxiredoxin resultiert [90,111]. Dieser indirekte antioxidative Effekt der Polyphenole wird ergänzt durch einen ebenfalls antioxidativ wirkenden Einfluss auf die NOX.

NOX sind Enzyme bzw. Oxidoreduktasen, die, aufgrund ihrer Fähigkeit, $\text{O}_2^{\bullet-}$ und H_2O_2 zu synthetisieren, elektronenbasierte Zellsignalübertragungen generieren und deren Modulation zur Aufrechterhaltung der Redox-Homöostase sowie zur Linderung verschiedener pathophysiologischer Zustände beitragen [112]. Basierend auf aktuell verfügbaren Forschungsergebnissen scheinen Polyphenole und deren Metabolite die Aktivität der NOX durch Modulation der genetischen Expression von verschiedenen konstituierenden Protein-Untereinheiten und durch eine Verringerung von mRNA-Konzentrationen, die zu dem Zusammenschluss der exprimierten Protein-Untereinheiten als finalen NOX-Enzymkomplex sowie zur Translokation zur Zielmembran beitragen, zu hemmen. Werden diese Schritte unterbunden, können die Enzym-Untereinheiten nicht exprimiert und nicht funktionsadäquat zusammengesetzt werden. Weiterhin wird keine Translokation zur Zielmembran als Funktionsort und keine Aktivierung der NOX eingeleitet, sodass daraus hervorgehend keine NOX-abhängige Synthese von $\text{O}_2^{\bullet-}$ sowie H_2O_2 stattfindet [112]. Zusammen mit der gesteigerten Synthese der endogenen antioxidativ wirkenden Enzyme SOD, KAT und

Peroxiredoxin kann die Bildung von ROS und damit verbunden oxidativer Stress als metabolischer Zustand reduziert werden [90]. Im Zusammenhang mit intensiven, einmaligen körperlichen Belastungen bzw. intensiver körperlicher Bewegung in Form von Trainingseinheiten kann daraus eine Reduktion von belastungsbedingten Muskelschädigungen (engl. *exercised-induced muscle damage*, EIMD) und fortlaufend ein positiver Einfluss auf die sportliche Leistungsfähigkeit und Regenerationsprozesse resultieren [90].

Der EIMD basiert in diesem Kontext sowohl auf mechanischen als auch auf biochemischen Prozessen, sodass hohe mechanisch wirkende Kräfte auf die Muskelfasern zu einer Störung und Deformation von Muskelzellkompartimenten führen, die nachfolgend in einer Verschiebung der Calcium-Ionenkonzentration resultiert. Diese Störung der Calciumhomöostase trägt zur Bildung von ROS bei und ist Basis für nachgelagerte Entzündungsreaktionen [90]. Neben einem Erhalt der Leistungsfähigkeit sind in diesem Kontext unter anderem eine Verringerung sportbezogener Ermüdungserscheinungen und darüber hinaus vor allem bei Freizeitsportlern ergogene Effekte beobachtet worden [90]. In Bezug zu gesundheitsbezogenen Outcomes kann die Reduktion von oxidativem Stress das Risiko für die Entstehung der zuvor schon genannten chronischen, metabolischen und Krebserkrankungen reduzieren [106]. Ebenso kann die Induktion von den zuvor erwähnten pathologischen Outcomes, in Verknüpfung mit einer gestörten Darmbarrierefunktion, unmittelbar vermindert und die Integrität der TJ gestärkt werden [107]. Ergänzend trägt eine verbesserte Darmbarrierefunktion potenziell zur Reduktion pro-inflammatorischer Prozesse durch eine geringere Translokation von bakteriellem Endotoxin in die systemische Blutzirkulation bei [75,113].

2.3.2.2 Polyphenole - Darstellung anti-inflammatorischer Wirkmechanismen und mögliche Effekte auf sportliche Leistung und Gesundheit

Die anti-inflammatorischen Effekte der Polyphenole beruhen jedoch vorwiegend auf der Hemmung des *Nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B-cells* (NF- κ B) Stoffwechselweges und der Aktivitätseinschränkung von Cyclooxygenasen (COX). NF- κ B ist ein von der Redox-Homöostase abhängiger und regulierter Transkriptionsfaktor, der Inflamationsreaktionen nach Zellverletzungen reguliert, wie diese beispielsweise im Kontext von EIMD auftreten [114,115]. In Wechselwirkung zum Nrf2-Stoffwechselweg und der zuvor schon beschriebenen Reduktion von oxidativem Stress kann die durch NF- κ B-Aktivierung vermittelte Expression der pro-inflammatorischen Zytokine Interleukin (IL)-1, IL-6 und Tumornekrosefaktor- α sowie von COX-2 gehemmt werden [116]. COX sind Enzyme in verschiedenen Isoformen, von denen COX-1 und COX-2 die Bildung von Prostaglandin H₂, einer Vorstufe für die Biosynthese der pro-inflammatorischen Eicosanoide (Prostazykline, Prostaglandine und Thromboxan) aus der ungesättigten Fettsäure Arachidonsäure katalysieren [117]. Polyphenole können möglicherweise sowohl die Transformationsreaktion von Arachidonsäure zu Prostaglandin H₂ als auch die darauf folgende Synthese der pro-inflammatorischen Eicosanoide reduzieren [117,118]. Diese hemmende Regulation des metabolischen Inflamationsgeschehens könnte eine bedeutende unmittelbare Komponente

in der Prävention und Therapie von NCD darstellen [119]. Insgesamt kann die Verminderung der pro-inflammatorischer Prozesse durch ergänzend nutritiv konsumierte Polyphenole im Sport zu einer Abschwächung von EIMD beitragen, was sich wiederum positiv auf Regenerationsprozesse nach sportlichen Belastungen und die sportliche Leistungsfähigkeit auswirken kann [90,97]. Im Zuge von metabolisch anspruchsvollen Ausdauerbelastungen wurde beispielsweise ein Erhalt bzw. eine beschleunigte Regeneration der Muskelfunktion beobachtet [120,121].

2.3.2.3 Polyphenole - Darstellung vasodilatatorischer Wirkmechanismen und mögliche Effekte auf sportliche Leistung und Gesundheit

Einen weiteren Einfluss auf die sportliche Leistungsfähigkeit offenbaren die Polyphenole durch eine Steigerung der endogenen Verfügbarkeit von Stickstoffmonoxid (NO), welches vasodilatatorische Eigenschaften aufweist [122]. Über eine Aktivitätsstimulation von NO-Synthasen (NOS)⁸ und die Hemmung der schon weiter oben beschriebenen NOX-Aktivität kann die Plasmakonzentration an bioverfügbarem NO zunehmen. Der Mechanismus, wie Polyphenole die Aktivität von NOS fördern, gilt bisher als noch nicht genau entschlüsselt [124]. In Wechselwirkung mit körperlicher Belastung wird dagegen im Kontext der gehemmten Synthese von $O_2^{\bullet-}$ durch NOX eine reduzierte Bildung Peroxynitrit aus NO und $O_2^{\bullet-}$ angenommen [90], sodass daraus resultierend die erhöhte Plasmakonzentration an NO zu einer verbesserten Muskeldurchblutung und verbesserten mitochondrialen Stoffwechselprozessen in Form des Redox-Potenzial der Elektronentransportkette beitragen kann [123,125–127]. Weiterhin wird in den Mitochondrien das Vorhandensein einer NOS angenommen, auf welche die Polyphenole direkt einwirken könnten [123]. Beide zuvor benannten Outcomes stehen positiv mit der sportlichen Leistungsfähigkeit in Verbindung [90] und darüber hinaus kann die optimierte Muskeldurchblutung Regenerationsprozesse nach sportlicher Belastung durch eine Zunahme der mikrovaskulären Durchblutung mit positiver Modulation der Myofaser-Erneuerung unterstützen [128]. Die Erhöhung der endogenen NO-Verfügbarkeit kann weitergehend zu einer insgesamt verbesserten Endothel-Funktion führen, aus der günstige Einflüsse auf den kardiovaskulären Gesundheitszustand hervorgehen, die wiederum zur Prävention von kardiovaskulären Erkrankungen beitragen können [129].

2.3.2.4 Polyphenole - Darstellung anti-diabetischer und intestinal mikrobiotischer Wirkmechanismen und mögliche Effekte auf sportliche Leistung und Gesundheit

Zu einer Verbesserung des Gesundheitszustands können Polyphenole möglicherweise ebenfalls über eine anti-diabetische Wirkungsweise führen. Durch eine Hemmung der Aktivität der intestinalen α -Glukosidase und der pankreatischen α -Amylase konnten reduzierte hydrolytische Verdauungsreaktionen von Kohlenhydraten beobachtet werden, die fortlaufend potenziell zu einer geringeren Kohlenhydratabsorption aus dem Darm und damit in einer geringeren Blutglukosekonzentration münden können. Die molekularen

⁸ Auf die verschiedenen Unterformen der NO-Synthasen wird an dieser Stelle nicht eingegangen, da der Zusammenhang noch nicht ausreichend verstanden und den einzelnen Enzymen der NO-Synthasen zugewiesen werden kann. Die vasodilatatorischen Eigenschaften werden der endothelialen NOS zugewiesen, während in den Mitochondrien eine induzierbare NOS angenommen wird [123],[122].

Wirkmechanismen der Polyphenole sind in diesem Kontext bisher jedoch noch unklar [98]. Aktuelle Forschungsarbeiten deuten zudem vermehrt darauf hin, dass neben den unter 2.3.1.1 genannten Ballaststoffen auch die Polyphenole in ihrer Absorption und ihren nachfolgenden physiologischen Wirkungen auf den Humanmetabolismus in Wechselwirkung mit der Darmmikrobiota stehen [130]. Einerseits wurde schon beobachtet, dass Polyphenole die mikrobielle Diversität und die Synthese mikrobieller Stoffwechselprodukte, wie SCFA oder Lipopolysaccharide (LPS), verändern. Andererseits konnte eine Verstoffwechselung der Polyphenole durch die Darmmikrobiota identifiziert werden, aus denen mikrobielle Derivate hervorgegangen sind, die eine bessere Absorptionsfähigkeit und humane Bioverfügbarkeit besitzen, welche die physiologischen Wirkungen beeinflussen bzw. verändern [130]. Wie diese mikrobiellen Prozesse mit den dargestellten angenommenen systemischen antioxidativen, anti-inflammatorischen, vasodilatatorischen und anti-diabetischen Stoffwechselmechanismen zusammenhängen, ist Gegenstand der aktuellen Forschung [130], aber nicht Bestandteil dieser Arbeit und wird daher fortlaufend nicht detailliert thematisiert.

Eine zusammenfassende Übersicht zu den schriftlich dargelegten potenziellen antioxidativen, anti-inflammatorischen, vasodilatatorischen und anti-diabetischen Wirkungen der Polyphenole sowohl auf die sportliche Leistungsfähigkeit und Regenerationsprozesse nach sportlicher Belastung sowie Training als auch auf die Gesundheit zeigt Abbildung 3.

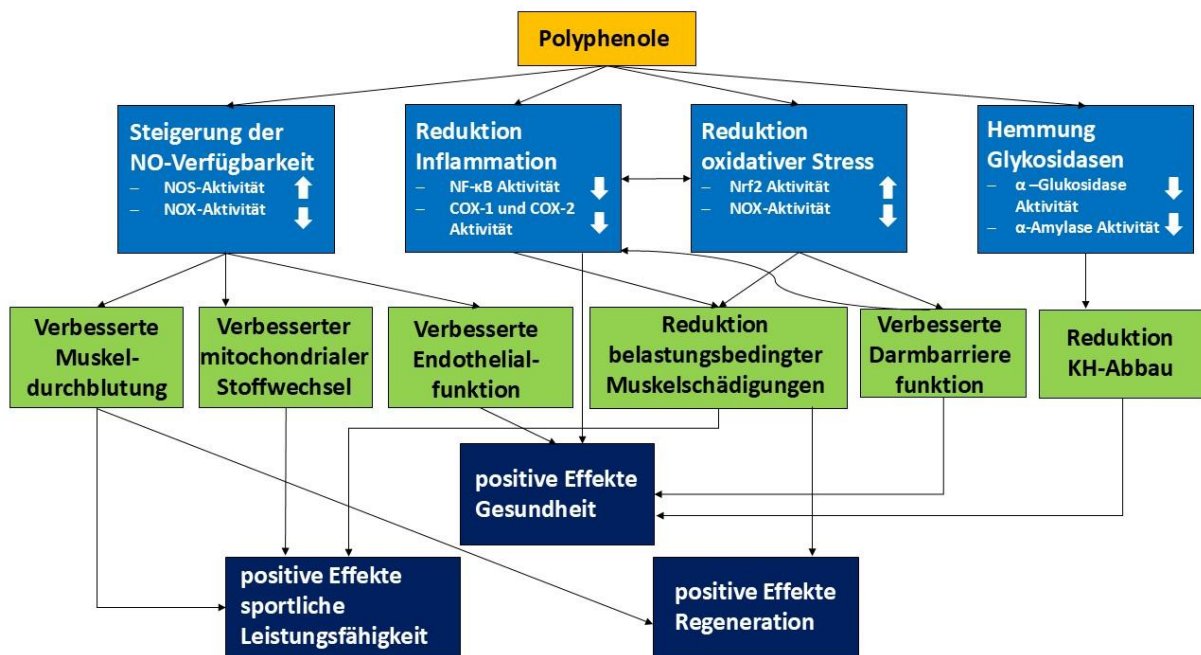


Abbildung 3 Antioxidative, anti-inflammatorische und vasodilatatorische Effekte von Polyphenolen in Betrachtung von sportlicher Leistungsfähigkeit, Regeneration und Gesundheit (eigene Darstellung, modifiziert nach [97]). COX-1 = Cyclooxygenase-1, COX-2 = Cyclooxygenase-2, NOS = NO-Synthase, NF-κB = nuclear factor 'kappa-light-chain-enhancer' of activated B-cells, NO = Stickstoffmonoxid, NOX = NADPH-Oxidasen, Nrf2 = Nuclear factor erythroid 2-related factor 2.

2.3.3 Mineralstoffe - Kalium, Calcium, Magnesium, Eisen Zink, Kupfer

Die Apfelsaftschorle und der Aronia-Mischfruchtsaft enthalten als Nahrungsinhaltsstoffe anorganische Mineralstoffe, die der Mensch in unterschiedlichen Mengen zur Regulation seiner Stoffwechselvorgänge im Organismus benötigt [131]. Dem entsprechend werden die Mineralstoffe weitergehend in Mengen- und Spurenelemente differenziert. Das in den Studiengetränken vorkommende Kalium, Calcium und Magnesium wird entsprechend den Mengenelementen zugewiesen, während Eisen, Zink und Kupfer den Spurenelementen zugeteilt werden [131]. Da für das im Anhang vorzufindende lebensmittelchemisch analysierte Nährstoffprofil der Apfelsaftschorle und des Aronia-Mischfruchtsafts nicht alle Mineralstoffe inkludiert wurden, werden zur Vervollständigung einige Mineralstoffgehalte aus vorhandenen Literaturquellen ergänzt [65,96,132]. Die potenziellen Einflüsse auf die sportliche Leistung im Kontext von Belastung und Training sowie mögliche Effekte auf die Gesundheit, die sich aus der schon vorhandenen wissenschaftlichen Literatur ableiten lassen, werden daher aber nur zusammenfassend beschrieben.

2.3.3.1 Kalium - Eigenschaften, Konzentration in den Studiengetränken und mögliche physiologische Wirkungen

Kalium ist ein unentbehrliches Mineral, das eine bedeutende Aufgabe in den Zellfunktionen des menschlichen Organismus besitzt, einschließlich der Aufrechterhaltung des Flüssigkeitshaushalts und der Osmolalität der Zellen, weil dieses das wichtigste intrazelluläre Kation in allen Körperflüssigkeiten darstellt [133,134]. Die Erhaltung des Membranpotentials gilt allgemein als eine der elementarsten physiologischen Funktionen des Kaliums im Humanmetabolismus [133]. Der Gesamtkaliumgehalt des menschlichen Körpers beläuft sich durchschnittlich auf 140 g bzw. 3600 mmol und wird von der Niere reguliert, welche für die Kaliumausscheidung aus dem Körper verantwortlich ist [133,134]. Als Referenzwert für eine angemessene Kaliumzufuhr gibt die DGE für gesunde Erwachsene in Deutschland 4000 mg pro Tag an [135]. Als kaliumreiche Lebensmittel werden Tomatenmark, Trockenfrüchte, Nüsse (Haselnüsse, Cashewkerne, Erdnüsse, Mandeln), Bitterschokolade und Mehlsorten wie Roggen-, Dinkel- oder Buchweizenvollkornmehl angeführt [135]. Ergänzt wird dies durch frisches Gemüse und Obst wie beispielsweise Aprikosen, Bananen, Karotten, Kohlrabi, Avocado und Tomaten [135]. Ebenso kann der in den Studien dieser Arbeit verwendete Aronia-Mischfruchtsaft mit durchschnittlich 146,53 mg pro 100 g als nutritiver Kaliumlieferant angesehen werden, da dieser in einer üblichen Verzehrportion von 200 ml (293,06 mg Kalium) eine vergleichbare Menge an Kalium liefert wie eine übliche Verzehrportion an der als kaliumreich definierten Kohlrabi (322 mg Kalium auf 100 g) [136].

Für Apfelsaft wird der Kaliumgehalt auf 105 mg pro 100 g beziffert [65], wobei der Fruchtsaftanteil der in dieser Arbeit angeführten Apfelsaftschorle nur bei 60 % liegt und der Kaliumgehalt damit nur sehr grob auf ca. 60 mg pro 100 g geschätzt werden kann. Eine nutritiv gesteigerte Kaliumzufuhr kann im Kontext von körperlichen Belastungen dazu beitragen, den Kaliumverlust durch die sportbedingt erhöhte Schweißrate oder den Kaliumionenfluss aus der Muskelmembran während der Depolarisation bei neuronalen Aktionspotentialen auszugleichen und so möglicherweise die Muskelregeneration fördern [137]. Diese regenerationsunterstützenden Effekte könnten besonders daraus hervorgehen, dass zur

Einlagerung eines Gramm Glykogen 19 mg Kalium und etwa 3 g Wasser benötigt werden, wobei das Wasser aus dem Aronia-Mischfruchtsaft ebenfalls direkt bereitgestellt werden könnte [17,138]. Weiterhin sind in Verbindung mit der sportlichen Leistungsfähigkeit für angemessene bzw. leicht erhöhte Kalium-Plasmaspiegel von 5-9 Millimolar stimulierende Wirkungen auf die Muskeldurchblutung, die Ventilation, die neuromuskuläre Übertragung und die muskuläre Aktivität der Natrium-Kalium-Pumpe (Na^+/K^+ -ATPase) beschrieben worden [137]. In Betrachtung gesundheitsbezogener Effekte scheint es Hinweise auf einen negativen Zusammenhang zwischen Kalium in der Nahrung und dem Blutdruck sowie einige mehrheitlich indirekte wissenschaftliche Anhaltspunkte für einen negativen Zusammenhang zwischen Kalium in der Nahrung und Herz-Kreislauf-Erkrankungen (insbesondere Schlaganfall und koronare Herzkrankheit) zu geben [134]. Als mögliche Mechanismen werden eine endothelabhängige Vasodilatation bzw. Funktionsregulierung und eine Öffnung von Kaliumkanälen der Natrium-Kalium-Adenosin-Triphosphatase-Pumpe, Veränderungen in der hormonabhängigen Signaltransduktion zur funktionalen Steuerung der glatten Gefäßmuskulatur und Veränderungen hormongesteuerter Zellfunktionen des sympathischen Nervensystems angenommen [139].

2.3.3.2 Calcium - Eigenschaften, Konzentration in den Studiengetränken und mögliche physiologische Wirkungen

Calcium ist ebenfalls ein unentbehrlicher Mineralstoff, der eines der wichtigsten Mengenelemente im gesamten menschlichen Organismus darstellt, weil dieses als Grundsubstanz für die Knochen unseres skelettalen Bewegungsapparates und unserer Zähne fungiert [140]. Weiterhin hat Calcium allgemein eine bedeutende Funktion in der Blutgerinnung und ist ein wichtiges Element zur Strukturstabilisierung und Kommunikation von Zellen sowie zur neuronalen Signalweiterleitung im Nervensystem und in der Muskulatur [140]. Vor diesem Hintergrund empfiehlt die DGE eine tägliche Calciumzufuhr für gesunde Erwachsene von 1000 mg pro Tag [141]. Als beste nutritive Calciumquellen gelten Milch und Milchprodukte, die jedoch in Abhängigkeit von der Art einer vegetarischen und in einer veganen Ernährungsweise nicht verzehrt werden [59]. Daher besitzen alle calciumbeinhaltenden pflanzlichen Nahrungsmittel wie grüne Gemüsearten (z.B. Brokkoli, Grünkohl, Rucola), Samen und Nüsse ebenso wie calciumreiche Mineralwässer ($> 150 \text{ mg/L}$) eine wichtige Rolle bei der Calciumbedarfsdeckung [141]. In diesem Kontext ist der Aronia-Mischfruchtsaft mit einem Calciumgehalt von umgerechnet 16,0 mg pro 100 ml im Durchschnitt als ein Calciumlieferant mit einer untergeordneten Bedeutung anzuführen, dessen Beitrag zur gesamten täglichen Calciumzufuhr in einer veganen Ernährungsweise dennoch als nicht unbedeutend bewertet werden kann [59,142]. Für die Apfelsaftschorle können an dieser Stelle keine genauen Angaben gemacht werden. Im Kontext der sportlichen Leistungsfähigkeit werden Calcium zwei indirekte Effekte zugewiesen. Zum einen ist die Bindung von Calcium an den Proteinkomplex Troponin C für Kontraktionsvorgänge in der quergestreiften Skelettmuskulatur essentiell, und zum anderen gilt die Prävention von belastungs- bzw. sportinduzierten Ermüdungsbrüchen durch einen Beitrag von Calcium zum Erreichen der maximalen Knochenmasse (engl. *peak bone mass*) und zusammen mit Vitamin D zu einer guten Knochengesundheit als wesentliche Einflussgrößen [143]. Das Erreichen der

peak bone mass durch eine bedarfsdeckende Calciumzufuhr ist zusammengefasst mit einer adäquaten Vitamin-D-Aufnahme und regelmäßiger körperlicher Aktivität ebenfalls fundamental in der Prävention der Knochenkrankheit Osteoporose, bei der es aufgrund eines Knochenmasseverlusts zu vermehrten Knochenbrüchen kommen kann [140]. Dies gilt als wichtige Funktion für Calcium in dem Erhalt von Gesundheit und Wohlbefinden [140].

2.3.3.3 Magnesium - Eigenschaften, Konzentration in den Studiengetränken und mögliche physiologische Wirkungen

Magnesium gilt als ebenfalls unentbehrlicher Mineralstoff, der innerhalb von Zellen vor allem von Knochen, Muskeln und Weichteilgewebe als Regulator von zahlreichen biochemischen Reaktionen und Cofaktor von Enzymen fungiert und mit einem Gesamtanteil von 24 g bzw. 1000 mmol ein wichtiges intrazelluläres Kation darstellt [133,144]. Als gute nutritive Magnesiumquellen werden Vollkornprodukte, Hülsenfrüchte, grünes Blattgemüse, Nüsse und Samen sowie Fisch und Meeresfrüchte angegeben [144]. Bei einer hohen Verzehrshäufigkeit und -menge können aber auch Nahrungsmittel wie Kartoffeln oder Bananen zur Versorgung beitragen. Daher kann die Magnesiummenge von durchschnittlich 9,6 mg pro 100 g im Aronia-Mischfruchtsaft und der aus der Literatur abgeleitete und umgerechnete Wert von ungefähr 3 mg pro 100 g für die Apfelsaftschorle einen relevanten Anteil an der Magnesiumbedarfsdeckung haben. Dieser sollte jedoch vor dem Hintergrund, dass die DGE für gesunde Erwachsene ab einem Alter von 19 Jahren für Männer 350 mg und für Frauen 300 mg als angemessenen Schätzwert für eine angemessene nutritive Magnesiumzufuhr ausweist, nicht überbewertet werden [144]. In Verbindung mit Einflüssen auf die sportliche Leistungsfähigkeit gilt Magnesium als ein zentraler Regulator der Calciumtransport-Systeme in den Membranen des sarkoplasmatischen Retikulums, da durch neuronale Erregung, unter Kontrolle von Magnesium, Calcium freigesetzt wird, das durch Bindung an das oben schon benannte Troponin C eine Muskelkontraktion erst ermöglicht [145,146]. Weiterhin sind positive Effekte für die neuronale Reizweiterleitung, regulatorische Funktionen in Verknüpfung mit dem Herzrhythmus, dem Gefäßtonus, dem Blutdruck und dem Knochenstoffwechsel beschrieben worden, die sowohl im Kontext der sportlichen Leistungsfähigkeit als auch für den Erhalt des Gesundheitszustands angeführt werden können [133,145].

2.3.3.4 Eisen, Zink und Kupfer - Eigenschaften, Konzentration in den Studiengetränken und mögliche physiologische Wirkungen

Eisen, Zink und Kupfer stellen für den Menschen unentbehrliche Spurenelemente dar, die als Cofaktoren von Enzymen einen Anteil an zahlreichen Stoffwechselreaktionen im Körper besitzen [147–150]. Die DGE empfiehlt für Eisen eine Zufuhr von 11 mg für Männer und, in Abhängigkeit, ob prä- oder postmenopausal, 16 mg bzw. 14 mg pro Tag für Frauen [148]; für Zink 11-16 mg pro Tag für Männer und 7-10 mg pro Tag für Frauen, jeweils für die Altersspanne von 25 bis 65 Jahren und älter [150]. Für Kupfer beläuft sich die allgemein geschätzte Angabe für gesunde Erwachsene auf eine Menge von 1 - 1,5 g pro Tag [149]. Da die Bioverfügbarkeit von Eisen und Zink beispielsweise von der Phytatzufuhr, einer Speichersubstanz für Phosphat in Pflanzen [151], reduziert wird und die Absorptionsfähigkeit besonders für pflanzliches Eisen

von weiteren Nahrungsbestandteilen wie Oxalsäure oder auch Polyphenolen beeinflusst werden kann, muss jede nutritive Zufuhrquelle dieser Spurenelemente zur Bedarfsdeckung in Betracht gezogen werden [148,150]. In diesem Kontext enthält der rote Aronia-Mischfruchtsaft im Mittel 0,146 mg Eisen, 0,06 mg Zink und 0,01 mg Kupfer jeweils umgerechnet auf eine Menge von 100 g (vgl. Anhang Tabelle A2). Für reinen Apfelsaft können aus Angaben des Verbands der Deutschen Fruchtsaftindustrie e.V. 0,244 mg Eisen pro 100 g hergeleitet werden, die umgerechnet auf den Fruchtsaftanteil von 60 % der Apfelsaftschorle auf ca. 0,15 mg geschätzt werden können [65].

Die Effekte von Eisen und Zink in Verbindung mit der sportlichen Leistungsfähigkeit und der Gesundheit können zusammengefasst mit antioxidativen Eigenschaften assoziiert werden, da Eisen als Bestandteil von KAT und Peroxidasen am Abbau von Hydroperoxiden und ROS beteiligt ist und Zink die Synthese von Metallothioneinen stimulieren kann, die als metallbindende, cysteinreiche Proteine, elektrophile Scavenger und zellprotektive Verbindungen agieren können [147,152]. Weiterhin besitzt Eisen als zentraler Bestandteil des Hämoglobins und Myoglobins in den roten Blutkörperchen bzw. der Muskulatur eine bedeutende Funktion in der Sauerstoffversorgung des menschlichen Organismus, die besonders Einfluss auf die sportliche Leistungsfähigkeit von langanhaltenden intensiven Ausdauerbelastungen nehmen kann [147,153]. Ein Eisenmangel⁹ kann insgesamt die körperliche sowie geistige Leistungsfähigkeit einschränken und besonders bei Frauen den Menstruationszyklus und damit verbunden die Fortpflanzungsfähigkeit als gesundheitsbezogene Variablen beeinflussen. Erwähnenswert ist an dieser Stelle zudem ein essentieller Beitrag von Eisen zur Nutzung und Metabolisierung von Iod in der Schilddrüsenhormonsynthese, die eine zentrale Bedeutung für die Funktionsfähigkeit des gesamten Humanmetabolismus hat und somit indirekt auf die sportliche Leistung und den Gesundheitszustand einwirken kann [147]. Für Zink wird im Kontext der sportlichen Leistungsfähigkeit für die störungsfreie Durchführung von Trainings- und Saisonzyklen ein indirekter Effekt durch die Prävention von Infekten der oberen Atemwege diskutiert [153], das in Verknüpfung zu einer positiven Unterstützung von Wundheilungsprozessen aber ebenso einen gesundheitsbezogenen Einfluss beschreibt [147]. Kupfer hat als Cofaktor von Enzymen eine Rolle im Energiestoffwechsel [149], auf die an dieser Stelle aufgrund der äußerst geringen bzw. fehlenden Konzentrationsangaben in den Studiengetränken nicht näher eingegangen werden soll.

2.3.4 Vitamine

Der Vitamingehalt von Fruchtsäften wird allgemein von den wasserlöslichen Vitaminen wie beispielsweise Vitamin C (Ascorbinsäure), Thiamin (Vitamin B1), Riboflavin (Vitamin B2), Vitamin B6, Niacin, Pantothensäure und Folat dominiert [14,65,96,132]. Dies kann ebenso für

⁹ Für weitere Informationen zur Differentialdiagnose und unterschiedlichen Ausprägungsformen eines Eisenmangels bzw. einer Eisenmangelanämie sei an dieser Stelle auf die onkopedia Leitlinie für Hämatologische Erkrankungen „Eisenmangel und Eisenmangelanämie“ der Deutschen Gesellschaft für Hämatologie und medizinische Onkologie, der Österreichischen Gesellschaft für Hämatologie & Medizinische Onkologie, der Schweizerischen Gesellschaft für Hämatologie und der Schweizerischen Gesellschaft für Medizinische Onkologie [154] verwiesen und wird nicht näher drauf eingegangen.

die in den Studien dieser Arbeit verwendete Apfelsaftschorle und den Aronia-Mischfruchtsaft angenommen werden. Da die Vitaminanalytik in der Darstellung des Nährstoffprofils der Studiengetränke jedoch keinen Schwerpunkt darstellte, werden die potenziellen Effekte auf die sportliche Leistungsfähigkeit im Kontext von Belastung und Training sowie auf die Gesundheit zur Vervollständigung der in der Apfelsaftschorle und des Aronia-Mischfruchtsafts befindlichen Inhaltsstoffe zusammengefasst dargelegt.

Die wasserlöslichen Vitamine haben insgesamt Regulationsfunktionen in Ab- und Umbauprozessen des Metabolismus von Energie und Makronährstoffen [155–160]. In diesem Kontext unterstützen besonders die B-Vitamine gemeinsam mit Folat die Energiegewinnung aus und die biochemischen Umbauprozesse von Kohlenhydraten, Proteinen und Fettsäuren sowie Zellteilungsvorgänge [157–160]. Des Weiteren ist Folat in Prozesse der Blutbildung involviert [160]. Vitamin C besitzt mit der Eigenschaft als Antioxidans und als essentieller Faktor für den Aufbau von Knochen, Zähnen und Bindegewebe abweichende Eigenschaften als die B-Vitamine und Folat [161]. Die von der DGE rausgegebenen Referenzwerte für die benannten wasserlöslichen Vitamine rangieren alle im mg-Bereich [155–159,161], ausgenommen Folat, für das allgemein ab 13 Jahren eine Zufuhrempfehlung von 300 µg Folat-Äquivalenten¹⁰ ausgesprochen wird [160]. Im Kontext der sportlichen Leistungsfähigkeit wird für Vitamin C ebenfalls wie für Zink eine antioxidative Wirkungsweise und eine Prävention von Infekten der oberen Atemwege diskutiert [153], was sich auf die störungsfreie bzw. krankheitsfreie Durchführung von Trainings- und Saisonzyklen auswirken kann [143]. Für eine Kombination aus Vitamin C und Zink wird allgemein ein präventiver Effekt bezüglich Erkältungskrankheiten beschrieben [162]. In der isolierten Betrachtung zeigen sich für Vitamin C als Antioxidans kontroverse Ergebnisse hinsichtlich der Effekte auf die sportliche Leistungsfähigkeit, den EIMD, die empfundene Muskelermüdung und physiologische Trainingsadaptationen. Dies kann jedoch nur anhand von Vitamin-C-Supplementationen bewertet werden und lässt keine eindeutige Angabe der Wirkungsweisen auf die benannten Outcomes für eine natürliche, lebensmittelbasierte-Vitamin C-Zufuhr, wie beispielsweise über die Studiengetränke, zu [143,163]. Für die B-Vitamine wird sowohl im sport- als auch im gesundheitsbezogenen Bereich eine präventive Wirkung auf allgemeine Ermüdungs- bzw. Erschöpfungszustände herausgestellt, die sich auf die Ausdauerleistungs- und Kraftfähigkeit im Sport, aber auch auf die alltägliche körperliche Leistungsfähigkeit und das Wohlbefinden auswirken kann [164,165]. In diesem Zusammenhang deutet sich eine durch zunehmende Zahl wissenschaftlicher Forschungsergebnisse herausgearbeitete Assoziation zwischen der Zufuhr von B-Vitaminen und der Muskelkraft in Verbindung mit Krafttraining an, welche auf essentielle Funktionen im Muskelzellstoffwechsel zurückgeführt wird [166,167]. Liegen dagegen defizitäre Versorgungszustände von Vitamin B6 und Vitamin B12 vor, wird angenommen, dass die Funktion von Motoneuronen herabgesetzt werden und Muskelschwäche eintreten kann [168,169]. Aus der Beobachtung der Entstehung von neurologischen Erkrankungen bei Vorliegen von B-Vitamin-Mangelzuständen kann abgeleitet werden, dass eine bedarfsgerechte nutritive Aufnahme die Aufrechterhaltung eines guten

¹⁰ Unter Berücksichtigung der syntetischen Form der Folsäure gilt für den Bedarfswert folgender Umrechnungsfaktor: 1 µg Folat-Äquivalent = 1 µg Nahrungsfolat = 0,5 µg synthetische Folsäure [160].

neurologischen Gesundheitszustands unterstützt [165]. Für Folat ist noch auf die präventiv gesundheitsbezogene Wirkung des Neuralrohrdefekts hinzuweisen, weshalb für Frauen im gebärfähigen Alter eine adäquate Folat- bzw. Folsäurezufuhr aus allen verfügbaren nutritiven Quellen bzw. aus Supplementen als vorteilhaft erachtet wird [160,170].

2.4 Aktueller Forschungsstand zu sport- und gesundheitsbezogenen Wirkungen von apfel- und aroniasaftbasierten Getränkesupplementierungen

2.4.1 Aktueller Forschungsstand zu Apfelsaft und Apfelsaftschorle

In der aktuell verfügbaren wissenschaftlichen Literatur wurden bisher besonders die gesundheitsbezogenen Wirkungen von klarem und naturtrüben Apfelsaft in Humanstudien untersucht [60,171]. Trotz der Beliebtheit des Apfelsafts in Deutschland [38], einem nicht unbedeutenden Marktanteil insgesamt unter den Fruchtsäften [171] und einer Empfehlung, Fruchtsaftschorlen, inklusive der Apfelsaftschorle, als Rehydratationsgetränke im Sport zu nutzen [17], wurden bisher nur wenige hochwertige Studien mit einer Apfelsaftsplementation durchgeführt [171]. Diese fokussierten sich besonders auf die Wirkungen der Polyphenole als antioxidativ und anti-inflammatorisch agierende Substanzen und ihren Einfluss auf die Darmgesundheit [60,171]. Die Ergebnisse sind in diesem Kontext jedoch sehr kontrovers. Einerseits konnte für einen täglichen Apfelsaftkonsum von 500 ml sowohl in der klaren (108 mg Polyphenole/Tag) als auch in der naturtrüben Variante (145 mg Polyphenole/Tag) über vier Wochen gezeigt werden, dass dieser die endogene enzymatisch antioxidative Kapazität reduziert [172], während andererseits eine Stimulation von endogenen antioxidativen Enzymen festgestellt wurde [173,174]. Dies stellte sich schon für einen einmaligen Konsum von 150 ml Apfelsaft heraus, für den jedoch keine detaillierten Angaben zum Nährstoffprofil gemacht wurden [174]. Effekte auf inflammatorische Reaktionen bzw. die Ausschüttung pro-inflammatorischer Zytokine konnten bisher nicht gezeigt werden, wenn naturtrüber Apfelsaft von gesunden oder übergewichtigen erwachsenen Personen konsumiert wurde [172,175], selbst wenn ein hohes Volumen von 750 ml pro Tag und einer daraus hervorgehenden Polyphenolzufuhr von 802 mg pro Tag als Supplementation zu Grunde lag [175]. Im Kontext der Darmgesundheit deutet eine zunehmende Zahl an Forschungsarbeiten an, dass die Darmmikrobiota Polyphenole aus pflanzenbasierten Lebensmitteln wie beispielsweise Apfelsaft verstoffwechseln kann und eine präventive Rolle bei der Entwicklung von Erkrankungen, insbesondere des Darms, besitzen könnte [176,177]. Der Einfluss von Apfelsaft auf die Funktion der Darmbarriere, die in Wechselwirkung mit der Darmmikrobiota steht [178], wurde in diesem Zusammenhang aktuell noch nicht untersucht. Weiterhin fehlen Forschungsarbeiten zum Einfluss von Apfelsaft und insbesondere von Apfelsaftschorle, wenn diese im Kontext von sportlichen Belastungen konsumiert werden. Daher ist der Einfluss des über den Apfelsaft bzw. die Apfelsaftschorle zugeführten Zuckers noch unklar, für dessen Zufuhr nach sportlichen Belastungen einerseits regenerationsfördernde Effekte beschrieben worden sind [19,20], andererseits gesundheitsbezogene Wirkungen wie die Induktion pro-inflammatorischer Reaktionen oder ein Beitrag zur Entstehung von NCD wie einem T2DM noch fraglich erscheinen

[16,60,75,113,171]. Weitere wissenschaftliche Untersuchungen sind daher nötig, um die physiologischen Wirkungen einer Supplementierung, vor allem von Apfelsaftschorle, im Kontext von sportlichen Belastungen zu erarbeiten und gesundheitsrelevante Effekte umfassender evaluieren zu können [60,171].

2.4.2 Aktueller Forschungsstand zu Aroniasaft und aroniasaftbeinhaltenden Mischfruchtsäften

Aroniasaft ist aufgrund des hohen Gehalts an Polyphenolen und dem damit verbundenen beträchtlichen Anteil an Anthocyanen, welcher für die intensiv rot-schwarze Farbgebung verantwortlich ist, in den Blickpunkt der wissenschaftlichen Forschung gerückt, weil potenzielle Vorteile für die menschliche Gesundheit angenommen werden [171]. Vereinzelte Studien konnten sowohl an gesunden Personen als auch an Patient*innen mit T2DM für einen Aroniasaft-Konsum Senkungen im postprandialen Blutglukosespiegel feststellen [179,180]. Die Supplementation des Aroniasafts umfasste in diesem Kontext eine Akutdosierung von einmal 100 ml vor einer Mahlzeit [179] oder eine Dosierung von 200 ml einmalig bzw. über drei Monate [180]. Angaben zu Polyphenolgehalten der Aroniasäfte wurden in beiden Studien nicht gemacht [179,180]. Vergleichbare Effekte ließen sich in der glykämischen Kontrolle bei T2DM-Patienten identifizieren, die nach Inklusion von dreimal täglich 50 ml Aroniasaft ($413,0 \pm 5,1$ mg Gallussäure-Äquivalente pro kg Frischgewicht) in ihre Ernährungsgewohnheiten über drei Monate niedrigere Nüchternglukose- und HbA1c-Werte hatten [181]. Die Wirkungen eines Aroniasaft-Konsums auf den systolischen und diastolischen Blutdruck sind dagegen nicht eindeutig, da sowohl positiv senkende Effekte [182] nach acht Wochen Supplementation von 300 ml Saft pro Tag als auch keine Wirkung [183] bei einem Konsum von 100 ml Aroniasaft über vier Wochen festgestellt wurden. Hierzu ist anzumerken, dass die Polyphenolverabreichung bei Loo et al. [182] durch Kombination eines Aroniasafts (1947 mg Gesamtpolyphenole) mit einem getrockneten Aroniapulver (247 mg Gesamtpolyphenole) gemittelt auf insgesamt 2194 mg Gesamtpolyphenolen deutlich höher liegt als jene bei Pokimica et al. [183] mit 1177,11 mg Gallussäure-Äquivalente durch den polyphenolreichen Aroniasaft. Ein Einfluss auf die Körperanthropometrie in Form des BMI konnte bisher nicht identifiziert werden [183].

In Verbindung mit sportlichen Akutbelastungen und Training konnten bisher durch begleitende Aroniasaft-Supplementierungen von Athlet*innen eine Verringerung der belastungsinduzierten Thrombozytenaktivität [35] und Verbesserungen in der antioxidativen Gesamtkapazität mit positiv gesenkter Ausschüttung pro-inflammatorischer Zytokine ermittelt werden [33,34]. Das Suppletionsvorgehen rangierte dabei von einer einmaligen Applikation von 200 ml Aroniasaft (Gesamtpolyphenolgehalt 1296,8 mg) [35] bis zu vier bzw. acht Wochen mit einer dreimal täglichen Zufuhr von 50 ml Aroniasaft (Anthocyaningehalt 23 bzw. 24 mg/100 ml) [33,34]. Weiterhin wurde für den täglichen Verzehr von 100 ml Aroniasaft (mit einem Gesamtpolyphenolgehalt von 4566 mg Gallussäureäquivalent/kg) über einen Zeitraum von 60 Tagen bei gesunden Personen eine Zunahme der Muskelmasse beobachtet [184]. Eine wissenschaftliche Evidenz bleibt aus dieser begrenzten Anzahl von Forschungsergebnissen jedoch fraglich, da nur wenige Humanstudien

durchgeführt wurden und die biologischen Eigenschaften der Aronia Beere am Menschen vermehrt mit Verwendung von Extrakten oder an Tiermodellen untersucht wurden [185]. Ein Grund könnte der saure und adstringierende Geschmack von Aronia bzw. des Aroniasafts sein, der die Verwendung in reiner Form für gewöhnlich einschränkt [96,185]. Mischgetränke mit Aroniasaft werden jedoch bereits industriell hergestellt und von den Verbrauchern akzeptiert und konsumiert [96]. Zur Verbesserung der geschmacklichen Wahrnehmung und der Konsumentenakzeptanz wurde dem Aroniasaft in dem Aronia-Mischfruchtsaft dieser Arbeit mit 64 % ein größerer Anteil Traubensaft zugesetzt, der ebenfalls gesundheitsrelevante und sportbezogen ergogene Effekte besitzen kann [171]. So konnten für roten Traubensaft ab einer Supplementationsdauer von mindestens zwei Wochen sowohl bei gesunden Personen als auch bei Patient*innen mit Bluthochdruck oder Hypercholesterinämie positive Wirkungen auf den systolischen und diastolischen Blutdruck festgestellt werden [186–188]. Ebenso wurde bei einer 28-tägigen Supplementierung mit rotem Traubensaft eine um 15 % gesteigerte Leistungsfähigkeit bei Freizeitläufern beobachtet, die den Saft in einer Dosierung von 10 ml/kg erhalten haben [189] (Angaben zur Polyphenolkonzentration nicht identifizierbar). Daraus ist ersichtlich, dass sowohl die einzelnen Fruchtsaftarten als auch deren Mischung Effekte im Kontext von sportlichen Belastungen und gesundheitsbezogenen Outcomes besitzen. Die physiologischen Wirkungen dieser aroniasaftbasierten Mischfruchtsäfte wurden aktuell jedoch noch nicht wissenschaftlich untersucht, sodass besonders in diesem Bereich weitere Humanstudien benötigt werden.

3 Zielsetzung

Das Ziel dieser kumulativen Dissertation ist es, die physiologischen Wirkungen eines definierten Konsums von Apfelsaftschorle und Aronia-Mischfruchtsaft in Wechselwirkung mit akuter körperlicher Belastung bzw. Training zu untersuchen. Einerseits sollen Erkenntnisse zu leistungs- und regenerationsfördernden Effekten der Inhaltsstoffe aus Apfelsaftschorle und Aronia-Mischfruchtsaft gewonnen werden. Andererseits sollen die Inhaltsstoffe bezüglich ihrer gesundheitsbezogenen Einflüsse näher betrachtet werden. Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen die möglichen physiologischen Wirkungen der über die Studiengetränke zugeführten Zucker und Polyphenole. Ergänzende Hinweise zu weiteren potenziell wirksamen Inhaltsstoffen aus dem Bereich der Mikronährstoffe sollen ebenfalls zum Erkenntnisgewinn beitragen.

Vor dem Hintergrund der im vorherigen Abschnitt formulierten Ziele dieser Dissertation sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- 1) Welchen Einfluss hat das Trinken von Apfelsaftschorle auf die Darmbarrierefunktion und inflammatorische Reaktionen im Kontext einer moderaten Ausdauerbelastung sowie eines Ultra-Marathons?
- 2) Inwiefern kann der Konsum eines Aronia-Mischfruchtsafts Einfluss haben auf den EIMD, die Beinkraft der unteren Extremitäten und den oxidativen Stresszustand im Zuge eines sechstägigen intensiven Ausdauertrainingsprotokolls?
- 3) Inwiefern kann der tägliche Konsum des Aronia-Mischfruchtsafts über 14 Tage positive Effekte auf das Körpergewicht und die Körperzusammensetzung, den Glukosestoffwechsel, den oxidativen Stresszustand und die vaskuläre Gesundheit bei Personen mit Prädiabetes mellitus haben, wenn dieser alleinig oder in Kombination mit einer gleichzeitigen Trainingsintervention stattfindet?

4 Veröffentlichungen

Die nachfolgend dargestellten drei Publikationen dienen der Beantwortung der in Kapitel 3 formulierten Forschungsfragen. Hierfür werden die wichtigsten Erkenntnisse der Studien gekürzt zusammengestellt. Tiefergehende Informationen zum Studiendesign, inklusive detaillierter Durchführungsbeschreibung, zu den Analyseverfahren der untersuchten Parameter und der zur statistischen Datenauswertung verwendeten Verfahren, können den Originalpublikationen im Anhang entnommen werden. Alle Studienprotokolle wurden gemäß der Deklaration von Helsinki erstellt und von der Ethikkommission der Deutschen Sporthochschule Köln überprüft und genehmigt.

4.1 Publikation 1: Effect of Sugar- and Polyphenol-Rich, Diluted Cloudy Apple Juice on the Intestinal Barrier after Moderate Endurance Exercise and in Ultra-Marathon Runners. Nutrients 2024 Apr 30;16(9):1353. doi: 10.3390/nu16091353

Einleitung: Sportliche Belastung und Zuckerkonsum führen zu einer Funktionsstörung der Darmbarriere. Im Zuge der Studie wurde die Wirkung von Zucker in einer natürlichen Matrix auf die Darmbarriere nach moderater (A) und extremer Ausdauerbelastung (B) bestimmt.

Methodik: Die Darmbarriere-Funktion wurde vor (prä) und nach der Laufbelastung (post) sowie 120 und 180 Minuten nach dem Verzehr des jeweiligen Getränks durch Messung der Serumendotoxinkonzentrationen (LPS), Konzentrationen von IL-6, CD14 und intestinale fettsäure-bindenden Protein (I-FABP) bestimmt. In Studie A liefen unspezifisch trainierte Teilnehmer (n = 24, Männer und Frauen, Alter 26 ± 4 Jahre) eine Stunde lang bei 80 % ihrer individuellen anaeroben Schwelle, die vor Studienbeginn in einem Feldstufentest mittels der Dmax-Methode (LT(D)) [190] probandenspezifisch bestimmt wurde. Nach dem Lauf konsumierten die Läufer in einem Crossover-Setup entweder 500 ml mit Wasser verdünnten trüben Apfelsaft (Testgetränk) als Apfelsaftschorle oder ein identisch zusammengesetztes Getränk (Placebo) ohne die FSM oder Wasser (Negativkontrolle). In Studie B absolvierten die Teilnehmer (n = 30, Männer und Frauen, Alter 50 ± 9 Jahre) einen Ultramarathonlauf über 230 bzw. 160,9 km. Diese wurden in Gruppen eingeteilt und konsumierten eines der oben genannten Getränke im Ziel nach Abschluss des jeweiligen Laufes.

Ergebnisse: Studie A: Die Belastung führte zu einem signifikanten Konzentrationsanstieg von LPS, I-FABP und IL-6 im Serum, der nach Belastungsende schnell rückläufig war. Es konnte keine Auswirkung der verschiedenen Getränke auf die Marker LPS, I-FABP oder IL-6 festgestellt werden, jedoch auf CD14 als Marker für eine unspezifische Immunantwort basierend auf einer Monozytenaktivierung. Studie B: Der Ultramarathon über 230 km bzw. 160,9 km führte zu einem starken Anstieg des Serum-LPS, der nach dem Zieleinlauf in der Wasser- und der Testgetränkgruppe schnell abnahm, nicht aber in der Placebogruppe.

Schlussfolgerung: Die konsumierten Getränke hatten keinen Einfluss auf die Regenerationsvorgänge der Darmbarriere in ihrer Kinetik nach mäßiger Belastung, wirkten sich allerdings auf die CD14-Serumkonzentrationen aus. Der Anstieg der CD14-Konzentration 180 Minuten nach der Laufbelastung könnte als indirekter Marker für eine länger nachweisbare Leukozytose interpretiert werden, die wiederum mit der Zunahme der Immunzellenfunktion zum Schutz vor Infektionen nach dem Sport in Verbindung stehen könnte.

Insgesamt lässt sich in diesem Kontext eine mögliche positive Auswirkung der FSM auf das Immunsystem annehmen. Nach einem Ultramarathon regeneriert sich die Funktion der Darmbarriere sehr schnell. Die Aufnahme von Zucker über das Placebogetränk scheint einen

negativen Einfluss auf die Regeneration der Darmbarriere zu haben, der durch die Anwesenheit des FSM vermindert wurde.

4.2 Publikation 2: The Influence of a Polyphenol-Rich Red Berry Fruit Juice on Recovery Process and Leg Strength Capacity after Six Days of Intensive Endurance Exercise in Recreational Endurance Athletes. *Nutrients* 2024 May 9;16(10):1428. doi: 10.3390/nu16101428

Einleitung: Im Kontext von sportlichen Belastungen und Training werden zunehmend verschiedene Ernährungsstrategien eingesetzt, um Zuständen von oxidativem Stress entgegenzuwirken und die Regeneration zu fördern. Die Aroniabeere ist reich an Polyphenolen und kann Prozesse des oxidativen Stresses reduzieren. Daher werden Aronia-Säfte und Mischsäfte mit Aronia-Anteil zunehmend im Kontext von sportlichen Belastungen und Training eingesetzt. Die Datenlage ist aktuell jedoch noch sehr limitiert. In dieser Studie wurden daher die Auswirkungen der kurzfristigen Supplementierung eines roten Aronia-Mischfruchtsafts (Aronia-Gehalt 25 %) oder eines Placebos auf den *exercised-induced muscle damage* (EIMD), den oxidativen Status und die Beinkraft während eines sechstägigen intensiven Ausdauertrainingsprotokolls untersucht.

Methodik: Achtzehn Freizeit-Ausdauersportler nahmen an einem hochintensiven Intervalltraining (HIIT) in einem Cross-over-Design über sechs Tage teil und erhielten morgens und abends entweder 200 ml Saft oder 200 ml eines Placebos. Das Trainingsprotokoll umfasste in diesem Kontext vier Intervalltrainingseinheiten und zwei moderat-intensive Dauerläufe. Die Trainingsintensität wurde durch die LT(D) [190] der Studienteilnehmer kontrolliert und umfasste 120 % der LT(D) in den Intervalleinheiten von 5 × 4 min Belastung (Pause 2 min Laufen mit niedriger Intensität) und 65 % der LT(D) in den Dauerläufen über 45 Minuten. Zu Beginn und nach der sechstägigen Trainingsintervention wurden Blutproben zur Analyse von Kreatinkinase (CK), oxidiertem Low-density Lipoprotein (oxLDL), IL-6 und IL-10 entnommen, anthropometrische Daten in Form von Körpergröße und -gewicht erhoben und die Beinkraft über eine geschwindigkeitsbasierte Methode des Einer-Wiederholung-Maximum (engl. one-repetition maximum - 1RM) in der Kniebeuge als geschätztes 1RM (estimated 1RM - e1RM) gemessen.

Ergebnisse: Bei allen Studienteilnehmer*innen wurde ein signifikanter Anstieg des EIMD nach dem Ausdauerprotokoll gemessen (Δ CK-Saft: $117,12 \pm 191,75$ U/L, Δ CK-Placebo: $164,35 \pm 267,00$ U/L; $p = 0,001$, $\eta^2 = 0,17$). Es wurden keine Gruppeneffekte im Zusammenhang mit dem EIMD ($p = 0,371$, $\eta^2 = 0,010$) und dem oxidativen Status ($p = 0,632$, $\eta^2 = 0,000$) festgestellt. Die Abnahme der Beinkraft war in der Placebogruppe stärker, jedoch erreichten die Gruppeneffekte keine statistische Signifikanz (Δ e1RM Saft: $1,34 \pm 9,26$ kg, Δ e1RM Placebo: $-3,33 \pm 11,49$ kg; $p = 0,988$, $\eta^2 = 0,000$).

Schlussfolgerung: Obwohl eine Verringerung der Beinkraft aus der Reduktion des e1RM in der Placebo-Interventionsphase interpretiert werden kann, konnte kein statistisch signifikanter Einfluss des Aronia-Mischfruchtsafts festgestellt werden. Es ist anzunehmen, dass mögliche Effekte nur bei längerer Anwendung und einem höheren Gehalt an

Polyphenolen auftreten, doch sind weitere Untersuchungen erforderlich, um dies zu bestätigen.

4.3 Publikation 3: Effects of two weeks of daily consumption of polyphenol-rich red berry fruit juice, with and without high-intensity concurrent training, on health-related variables in individuals with pre-diabetes mellitus. (under review)

Einleitung: Die Kombination aus regelmäßiger Bewegung und dem Verzehr so genannter Superfoods ist ein vielversprechender Ansatz zur Vorbeugung und Behandlung von NCD. Aroniabeeren sind reich an Polyphenolen, die eine antidiabetische Wirkung haben. Diese Studie untersuchte die Auswirkungen eines zweiwöchigen täglichen Konsums eines roten Aronia-Mischfruchtsaftes (Aronia-Gehalt 25 %) mit oder ohne ein begleitendes kombiniertes Kraft- und Ausdauertraining (Concurrent-Training) auf das Körpergewicht und die Körperzusammensetzung, den Glukosestoffwechsel, den Zustand von oxidativem Stress, die Pulswellengeschwindigkeit (PWV) und den peripheren Widerstand in einer Kohorte von 20 Personen mit Prädiabetes mellitus.

Methodik: Zehn Probanden in einem prä-diabetischen Zustand (Hämoglobin A1c (HbA1c): 5,7 – 6,4 %) nahmen an zwei Crossover-Interventionsstudienteilen über jeweils 14 Tage teil: A): Saft versus Placebo, beide Getränkeinterventionen ohne Training, und B): Saft versus Placebo, beide Getränkeinterventionen begleitet von Concurrent-Training. Die Studienteilnehmer*innen erhielten in diesem Kontext morgens und abends entweder 200 ml Saft oder 200 ml eines Placebos. Das Trainingsprotokoll umfasste drei Einheiten pro Woche und orientierte sich an den Empfehlungen der Deutschen Diabetes Gesellschaft für körperliche Aktivität, die je nach körperlicher Leistungsfähigkeit entweder mindestens 150 Minuten pro Woche mit moderater Intensität oder 75 Minuten pro Woche mit hoher Intensität vorschlägt [191]. Umgesetzt wurde dies durch ein angeleitetes hochintensives Functional-Fitness-Krafttrainingsprogramm, das eingebettet war in zwei 30-minütige Walkingeinheiten. Darüber hinaus wurden während jeder Trainingsphase in regelmäßigen Abständen drei 24-h Ernährungsrecalls durchgeführt. Zu Beginn und nach den 14-tägigen Interventionsphasen wurden Blutproben zur Analyse von Nüchternblutglukose, Insulin (inklusive Kalkulation des HOMA-Index), HbA1c, IL-6 und Thiobarbitursäure-reaktive Substanzen (TBARS) entnommen, Körpergewicht, -größe und -zusammensetzung sowie die PWV und der periphere Gefäßwiderstand gemessen.

Ergebnisse: In Studienteil A führte der tägliche Verzehr von rotem Aronia-Mischfruchtsaft zu moderaten Verbesserungen des peripheren Gefäßwiderstands, während in der Placebogruppe keine signifikanten Veränderungen beobachtet werden konnten (Interaktion aus Zeit x Gruppe, $p < 0,05$). Im Studienteil B konnten die Proband*innen der Saftgruppe ihre relative Muskelmasse nach dem Training erhalten, während die Teilnehmer im Zuge der Trainingsintervention mit begleitendem Placebokonsum einen leichten Rückgang der Muskelmasse vorzuweisen hatten (Interaktion aus Zeit x Gruppe, $p < 0,05$). Für die weiteren Parameter der Körperzusammensetzung, des Glukosestoffwechsels und den Zustand des oxidativen Stresses konnten in beiden Studienteilen keine statistisch signifikanten Ergebnisse ermittelt werden.

Schlussfolgerung: Der kurzzeitige, wiederholte Verzehr von polyphenolreichem, rotem Aronia-Mischfruchtsaft (während einer Trainingsintervention) scheint sich bei Personen mit Prädiabetes mellitus positiv auf die Gefäßgesundheit und die Muskelmasse auszuwirken. In weiteren Studien sollten die Auswirkungen einer langfristigen Intervention untersucht werden.

5 Diskussion

Angesichts der deutlich limitierten Datenlage bezüglich der humanphysiologischen Wirkungen von Apfelsaftschorle und Aronia-Mischfruchtsaft auf die sportliche Leistung sowie auf die Gesundheit im Kontext von akuter Belastung und Training [171] wurden in dieser Dissertation eine Apfelsaftschorle mit 60 % Fruchtsaftgehalt und roter Aronia-Mischfruchtsaft mit einem Aronia-Anteil von 25 % untersucht. Im Fokus dieser Untersuchungen standen die ernährungsphysiologischen Wirkungen der benannten Getränkeinterventionen im Hinblick auf die Modulation von oxidativen Stresszuständen und Inflammationsreaktionen, die in Wechselwirkung mit moderat-intensiver bis extremer körperlicher Belastung sowie Training unter Begutachtung der Darmbarrierefunktion sowie der Minderungen von Muskelschädigungen und Erhalt der Beinkraft von Sportler*innen bzw. Ausdauersportler*innen analysiert wurden. Weiterhin wurden für den Aronia-Mischfruchtsaft Effekte hinsichtlich der Veränderung anthropometrischer Daten, Änderungen im Glukosestoffwechsel, dem oxidativen Status und des vaskulären Gesundheitszustands in einem prä-diabetischen Probandenkollektiv untersucht.

In den folgenden beiden Abschnitten werden dazu zunächst die in Kapitel 3 formulierten Forschungsfragen aufgegriffen und diskutiert. Weiterhin werden Zusammenhänge zu den potenziellen Wirkmechanismen der Inhaltsstoffe, die sich aus den Ergebnissen der Untersuchungen dieser Arbeit ableiten lassen, hergestellt und evaluiert. Abschließend sollen die in den präsentierten Studien angewendeten Methoden kritisch analysiert und diskutiert werden.

5.1 Ergebnisdiskussion

- 1) Welchen Einfluss hat das Trinken von Apfelsaftschorle auf die Darmbarrierefunktion und inflammatorische Reaktionen im Kontext einer moderaten Ausdauerbelastung sowie eines Ultra-Marathons?

Aus vorherigen wissenschaftlichen Forschungsarbeiten kann abgeleitet werden, dass die Aufnahme von Zuckern, insbesondere von Fruktose [71,76], Auswirkungen auf die Funktion der Darmbarriere hat und zu ihrer Durchlässigkeit beiträgt [76,192]. Ebenso konnte eine erhöhte Permeabilität der Darmwand für extreme körperliche Belastungen, wie z.B. Marathon und Ultraläufe, beobachtet werden [193–196]. Unter der hypothetischen Annahme einer additiv schädigenden Wirkungsweise und einer beeinträchtigten Regeneration der Darmbarriere durch nutritiv zugeführten Zucker und intensiver körperlicher Belastung konnte für den Konsum der Apfelsaftschorle und der damit verbundenen Zuckerzufuhr kein negativer Effekt auf die Darmbarriere sowohl im Kontext einer moderaten Ausdauerbelastung als auch im Zuge eines Ultra-Marathons festgestellt werden. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass die FSM möglicherweise einen Teil der negativen Auswirkungen des Zuckers auf die Regeneration der Darmbarriere in der Zeit nach dem Laufen ausgeglichen hat. Diese Annahme wird erweitert durch Forschungsdaten, die eine Assoziation zwischen dem Konsum von zuckergesüßten (Soft-)Getränken und dem Risiko für die Entstehung von NCD aufzeigen, dies für Fruchtsaft jedoch nicht bzw. nicht eindeutig herausstellen konnten und damit von einer

anderen physiologischen Wirkungsweise auszugehen ist [12,16,78,79]. Die FSM muss in diesem Kontext als komplexe physische Struktur angesehen werden, in der die eingangs dieser Arbeit beschriebenen Inhaltsstoffe kombiniert in der Apfelsaftschorle vorliegen und in der Mischung sich auf die Nährstoff- bzw. Zuckerverdauung, deren Absorption und den Stoffwechsel auswirken [79,197]. In diesem Kontext ist darauf hinzuweisen, dass der potenziell nachteilige Einfluss von den Monosacchariden, insbesondere der Fruktose, auszugehen scheint [76,79], dass aber auch, wie eingangs beschrieben, Zuckerbausteine komplexiert in einer umfangreicheren Molekülstruktur als Nahrungsfasern bzw. Ballaststoffe vorliegen können [61]. Diese könnten gemeinsam mit den in der Apfelsaftschorle enthaltenen Polyphenolen für die veränderte physiologische Wirkung des Zuckers an der Darmbarriere verantwortlich sein. Die geringen, aber besonders in naturtrübem Apfelsaft [14] bzw. in naturtrüber Apfelsaftschorle enthaltenen, nicht zu vernachlässigenden Konzentrationen an Ballaststoffen können im Dickdarm durch die dort ansässige Darmmikrobiota in einer Fermentation zur Synthese von SCFA beitragen [63]. Durch die Substratbereitstellung in Form der Ballaststoffe sind bakterielle SCFA-Produzenten möglicherweise in der Lage, im enteralen mikrobiellen Habitat zu überleben und nicht von den im Darm ankommenden Monosacchariden beeinträchtigt und verdrängt zu werden [73,198]. Besonders für Butyrat als eine der SCFA sind effizienzsteigernde Wirkungen auf Claudin 1 als Bestandteil der TJ festgestellt worden [63,199,200]. Darüber hinaus konnte *in-vitro* gezeigt werden, dass durch Einfluss von Butyrat der transepitheliale elektrische Widerstand (engl. *transepithelial electrical resistance*) erhöht werden kann, der unter Angabe der Nettobewegung aller Ionen an einem Epithel als Maß von dessen Durchlässigkeit fungiert [63]. Neben diesen Effekten der Ballaststoffe als komplexe Zuckermoleküle konnte für die Polyphenole ebenfalls schon eine positive Modulation der TJ-Funktion dargestellt werden [107]. Für die Flavonoide und besonders das in Apfelsaft bzw. Apfelsaftschorle vorkommende Flavanol Quercetin sind ebenfalls eine Erhöhung des transepithelialen elektrischen Widerstands durch Einfluss auf die Claudin- und Zonulin-Proteinuntereinheiten der TJ ermittelt worden. Als Mechanismus wird die Reduktion von Prozessen des oxidativen Stresses angenommen, jedoch scheint der Übertrag auf die TJ noch nicht eindeutig funktional verstanden zu sein, und es müssen weitere Untersuchungen dazu folgen [107]. Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass die hier vorgestellten mechanistischen Wirkungsweisen der Inhaltsstoffe der Apfelsaftschorle auf *in-vitro*-Forschungsergebnissen basieren und aktuelle Erkenntnisse zur Wirkung des Konsums von Apfelsaftschorle als Lebensmittel mit einer FSM in Humanstudien fehlen [63,107]. Um die physiologische Wirkung der FSM mit der differenzierten Wirkung der inkludierten Zucker sowohl als Monosaccharide als auch als Ballaststoffe sowie den ebenfalls enthaltenden Polyphenolen und weiteren Inhaltsstoffen zu entschlüsseln, bedarf es noch weiteren Untersuchungen mit mechanistischen Ansätzen. Ein Übertrag zwischen verschiedenen Inhaltsstoffen und ihrer potenziellen Wechselwirkung in verschiedenen physiologischen Stoffwechselreaktionen, beispielsweise über die Darmmikrobiota, aber auch potenziell über antioxidative Mechanismen auf den Betrachtungsendpunkt der Darmbarriere, sollte genauer untersucht werden. In diesem Kontext ist unter anderem schon bekannt, dass die Polyphenole aus Apfelsaft über die

Darmmikrobiota verstoffwechselt werden können, aber die Wirkungsweise der daraus hervorgehenden Metabolite im Darm und damit ebenso auf die Darmwand ist noch nicht vollständig verstanden [177]. Gleichbedeutend bedarf es weiterer Klärung, ob die Polyphenole ihre antioxidativen Effekte auf die Darmbarriere systemisch in Form der unter 2.3.2.1 beschriebenen Stoffwechselwege oder lokal direkt an den Proteinstrukturen mit veränderten Phosphorylierungsmustern entfalten [107] oder ein Zusammenspiel die Wirkung erzeugt. Zellkulturversuche an Caco-2-Zellen, die eine zuverlässige *in-vitro*-Annäherung an das Darmepithel darstellen, könnten wie in der Studie von Miao et al. [201] unter spezifischer Anwendung von Apfelpolyphenolen fortgesetzt werden. Neben den in der Zellkultur gemessenen Aktivitäten der endogen antioxidativ wirksamen Enzyme SOD, Glutathionperoxidasen (GPxs) und KAT sowie Malondialdehyd als wichtiges Oxidationsprodukt von mehrfach ungesättigten Fettsäuren, beispielsweise der Darmwand-Membranlipide, ließen sich möglicherweise darauf basierend *in-vivo* wirksame Dosierungen identifizieren, die dann unter der ergänzenden Messung des schon in der unter 4.1 präsentierten Studie verwendeten Darmbarriere-Funktionsmarker I-FABP in Humanstudien untersucht werden könnten. Die Verknüpfung der *in-vivo*-Messung von I-FABP, der Aktivitäten der endogen antioxidativ wirksamen Enzyme SOD, GPxs und KAT sowie Malondialdehyd könnten ein erster Schritt sein, die mechanistischen Ansätze im Humanmetabolismus zu identifizieren und zu verstehen. Zudem kann der in der Studie von Miao et al. [201] angegebene Versuchsgradient für die Behandlung der Caco-2-Zellen mit Apfelpolyphenolen von 0, 4, 2, 10 und 50 µg/mL um Dosierungen im Bereich von 150 - 450 µmol/L erweitert werden, um eine mögliche direkte antioxidative Wirkungsweise der Polyphenole zu detektieren (vgl. 2.3.2.1).

Der beobachtete Anstieg des CD14-Proteins durch die akute, moderat-intensive Ausdauerbelastung steht im Einklang mit bisherigen Ergebnissen zu CD14-Konzentrationssteigerungen unter körperlicher Belastung [202].

Der im Vergleich zum Placebo und dem Wasser deutlich stärker ausfallende Anstieg der CD14-Konzentration unter Einfluss der Supplementation der Apfelsaftschorle 180 Minuten nach der moderat-intensiven Laufbelastung kann als Hinweis auf eine veränderte Immunfunktion gedeutet werden. Für körperliche Belastungen konnte gezeigt werden, dass die Zahl der zirkulierenden Neutrophilen und Monozyten erhöht und gleichzeitig die Zahl der zirkulierenden Lymphozyten während der anschließenden Erholungsphase erniedrigt ist. Diese verringerte effektive Lymphozytenanzahl fungiert als ein bedeutender Teil der physiologischen Stressreaktion auf körperliche Belastungen und kann mit dem Auftreten von Krankheiten nach dem Sport assoziiert werden. Der Anstieg der CD14-Protein-Serumkonzentration könnte als indirekter Marker für eine länger nachweisbare Leukozytose und damit als ein Schutz vor Infektionen nach dem Sport interpretiert werden [202,203]. Dieser beobachtete Hinweis auf eine Veränderung in der Immunfunktion durch den Konsum der Apfelsaftschorle nach einer moderat-intensiven Ausdauerbelastung bedarf jedoch noch weiterer Untersuchungen. Zum fortlaufenden Erkenntnisgewinn ließe sich im unter 4.1 vorgestellten Studiendesign, parallel zur Analyse von I-FABP, beispielsweise eine Messung der

Leukozytenanzahl als einen direkten Marker zur Begutachtung der angenommenen Leukozytose integrieren. Die Messzeitpunkte unmittelbar nach und drei Stunden nach der akut moderat-intensiven Laufbelastung würden das bimodale Profil einer durch körperliche Belastung induzierten Leukozytose abbilden und mögliche Unterschiede im Zusammenhang mit den konsumierten Studiengetränken, vor allem der Apfelsaftschorle, zeigen [204].

- 2) Inwiefern kann der Konsum eines Aronia-Mischfruchtsafts Einfluss haben auf den EIMD, die Beinkraft der unteren Extremitäten und den oxidativen Stresszustand im Zuge eines sechstägigen intensiven Ausdauertrainingsprotokolls?

Im Rahmen, der unter 4.2 dargestellten Studie konnte kein Einfluss des Aronia-Mischfruchtsafts auf den EIMD und den durch das intensive sechstägige Ausdauertrainingsprotokoll induzierten oxidativen Stresszustand festgestellt werden. Der EIMD wurde in der Studie über die CK-Konzentration evaluiert, die kontroverse Ergebnisse im Zusammenhang mit intensiven körperlichen Belastungen und Fruchtsafts Supplementierungen zeigt [33,120,205]. Für die Einnahme eines polyphenolreichen Montmorency-Kirschaftes konnten ebenfalls keine statistisch signifikanten Effekte auf die CK-Serumspiegel in der post-Belastungsphase nach einem intensiven Krafttraining [205] oder einem Marathonlauf [120] ermittelt werden. Im Gegensatz dazu fanden Pilaczynska-Szczesniak et al. [33] signifikant niedrigere Serum-CK-Konzentrationen nach der Anwendung von Aroniasaft nur eine Minute nach einem 2000-m-Ruderergometertest. Unter Einbezug, dass die durch sportliche Belastungen induzierten Spitzenkonzentrationen der CK zwischen 24 und 96 Stunden auftreten, kommt dem Zeitpunkt der Messung über diesen Marker besondere Bedeutung zu [115,206] und könnte ein Faktor für die gegensätzlichen Ergebnisse darstellen. Darüber hinaus kann die Hypothese der Aktivierung des Nrf2-Stoffwechselweges durch die im Aronia-Mischfruchtsaft befindlichen Polyphenole, die, im Kontext des EIMD, metabolisiert beispielsweise als elektronenakzeptierende Quinone wirken sollen [207], nicht angenommen werden. Dementsprechend offenbaren sich auch keine Unterschiede in den gemessenen und aus dem EIMD pro-inflammatorisch wirkenden IL-6 und in der Gegenregulation anti-inflammatorisch wirkenden IL-10-Konzentration der präsentierten Studie, da hier ebenfalls keine potenzielle Wirkungsweise des Aronia-Mischfruchtsafts und der enthaltenen Polyphenole beobachtet werden konnte. Andere Forschungsarbeiten mit Sauerkirschaft zeigten jedoch bereits, dass der Verzehr von polyphenolhaltigem Fruchtsaft die Zytokinkonzentration des proinflammatorischen IL-6 während längerer Ausdauerbelastungen, wie einem Marathon oder einem simulierten Radrennen, abschwächen kann [120,121]. Die kontroversen Ergebnisse könnten auf die signifikant höheren Serum-IL-6-Konzentrationen nach einem Marathon (Saft: 41,8 pg/ml vs. Placebo: 82,1 pg/ml) [120] im Vergleich zu den vorliegenden IL-6-Konzentrationen nach dem sechstägigen intensiven Ausdauertraining (Saft: $0,74 \pm 0,64$ pg/ml; Placebo: $1,09 \pm 1,54$ pg/ml) zurückzuführen sein.

Eine ähnliche Annahme kann für IL-10 getroffen werden [208], sodass die im Aronia-Mischfruchtsaft enthaltenen Polyphenole möglicherweise erst im Kontext einer starken inflammatorischen Reaktion nach körperlicher Belastung und Training wirken und die anti-

inflammatorische Gegenregulation auf die initialen Entzündungsprozesse im EIMD unterstützen können. Ebenso ist davon auszugehen, dass die unter 2.3.3.2 und 2.3.3.3 angeführten Konzentrationen für Calcium und Magnesium pro 400 ml verzehrter Tagesmenge des Aronia-Mischfruchtsafts zu gering sind, um potenziell regenerativ gegenüber EIMD zu wirken [143,145].

Für den Aronia-Mischfruchtsaft und dessen enthaltenen antioxidativ wirksamen Substanzen, wie beispielsweise die unter 2.3.2.1 dargestellten antioxidativ fungierenden Polyphenole, konnte kein Effekt auf das in der Studie gemessene oxLDL aufgezeigt werden. In diesem Zusammenhang scheint es, dass das Leistungsniveau und das Trainingsprotokoll die Veränderung der oxLDL-Konzentration beeinflussen. Neben Studien, die zeigen, dass Marathonläufer mit niedrigen VO₂max-Werten höhere oxLDL-Konzentrationen aufweisen und dass ein intensives Training einen stärkeren Anstieg bewirkt [209,210], könnten die Proband*innen der Studie gegen Ende des sechstägigen Ausdauertrainingsprotokolls schon erste, wie unter 2.2 beschriebene, funktionelle Adaptationen auf die sich wiederholende Trainingsbelastung zeigen. Unabhängig von der Aronia-Mischfruchtsaftzufuhr kann im menschlichen Organismus die Expression endogen antioxidativer Enzyme als Reaktion auf die intensiven Trainingseinheiten hochreguliert werden [211], was kongruent mit der Beobachtung wäre, dass Athlet*innen mit einem besseren Trainingszustand weniger von einer chronischen exogenen Polyphenolzufuhr profitieren [90].

Wie unter 4.2 benannt, deuten die absoluten Werte des e1RM in der tiefen Kniebeuge auf einen positiven Effekt des Saftes im Vergleich zum Placebo hin. Der absolute Kraftverlust in der Placebogruppe war ähnlich wie in früheren Studien [212]. Die nicht-signifikanten Unterschiede für die Zeit und die Getränkeintervention in der präsentierten Studie sind deckungsgleich mit der Studie von Hooper et al. [213], die ebenfalls keine statistisch signifikanten Ergebnisse für den Verzehr von 500 mg eines polyphenolreichen Sauerkirschsaft-Extrakts über sieben Tage in Bezug auf die Sprungkraft im Counter Movement Jump bei 13 Männern zeigten, die sechs Sätze mit zehn Wiederholungen in der tiefen Kniebeuge ausführten. Ähnlich wie bei den Ergebnissen der hier vorgestellten Studie zeigte sich im Vergleich zu einem Placebo bei der Sprunghöhe nur ein Trend zur Signifikanz für die Bedingung der Polyphenolaufnahme. Angesichts des dennoch positiv zu interpretierenden Effekts des Aronia-Mischfruchtsafts auf die Beinkraft könnte die unter 2.3.2.3 beschriebene gesteigerte NO-Verfügbarkeit durch die stimulierende Wirkung der im Saft enthaltenen Polyphenole auf die Aktivität der NOS als Mechanismus angenommen werden. Besonders die daraus resultierende verbesserte Durchblutung des Muskelgewebes kann die Myofaser-Erneuerung unterstützen [128]. Für eine unzureichende mikrovaskuläre Muskeldurchblutung konnte dagegen schon herausgestellt werden, dass beispielsweise durch den in der Studie unter 4.2 benannten EIMD eine Gewebehypoxie induziert werden kann und in der Gegenregulation eine Synthese von induzierbaren NOS durch Makrophagen eingeleitet wird. Diese daraus resultierende Vasodilatation wirkt der beeinträchtigten Durchblutung entgegen und führt dennoch zur Einleitung von muskelregenerativen Prozessen, sodass insgesamt neue Muskelfaserstrukturen gebildet werden können [128]. Der Einfluss der Polyphenole, aber

auch des Aronia-Mischfruchtsafts insgesamt auf die NOS, sollte im Kontext einer erhaltenden oder potenziell sogar möglichen Steigerung der Kraftfähigkeit in den Beinen daher weiter untersucht werden. Dabei ist der Aspekt einer in den Mitochondrien direkt befindlichen NOS ebenfalls in Betracht zu ziehen, aufgrund der essentiellen energiever sorgenden Funktion der Mitochondrien mit potenzieller Wirkung auf die Beinkraft [123,125–127].

Die unter 2.3.3.1 beschriebenen möglichen ergogenen und regenerationsfördernden Effekte des Kaliums können im Kontext der unter 4.2 präsentierten unterschiedlichen Ergebnisse in der Beinkraft zwischen der Saft- und der Placebogruppe ausgeschlossen werden, da sowohl über den Aronia-Mischfruchtsaft als auch über das Placebo 600 mg Kalium pro Tag zugeführt wurden. Dennoch sollte der mögliche Erhalt der Beinkraft unter Einfluss einer Aronia-Mischfruchtsaft-Supplementation weiter untersucht werden, um die Annahme der gesteigerten NO-Verfügbarkeit und den inkludierten vasodilatatorischen Effekten zu verifizieren oder auch weitere potenziell wirksame Inhaltsstoffe des Aronia-Mischfruchtsafts auf die Muskulatur und deren Funktionsfähigkeit zu identifizieren. Eine ergänzende Analyse des im Saft enthaltenen Polyphenolprofils beispielsweise über eine Hochleistungsflüssigkeitschromatographie mit DAD-Detektor (UV/VIS-Methodik) könnte zum Einzelbindungsnachweis dienen, die nachfolgend mechanistisch im Zuge von Zellkulturversuchen beispielsweise an C2C12-Myotuben oder *in-vivo* über Kapselverabreichung bezüglich der physiologischen Wirkungen auf die Muskulatur untersucht werden könnten. Eine vielversprechende phenolische Verbindung könnte in diesem Kontext Protocatechusäure als ein Abkömmling der im Aronia-Mischfruchtsaft enthaltenen Anthocyane darstellen [96,132,214].

- 3) Inwiefern kann der tägliche Konsum des Aronia-Mischfruchtsafts über 14 Tage positive Effekte auf das Körpergewicht und die Körperzusammensetzung, den Glukosestoffwechsel, den oxidativen Stresszustand und die vaskuläre Gesundheit bei Personen mit Prädiabetes mellitus haben, wenn dieser alleinig oder in Kombination mit einer gleichzeitigen Trainingsintervention stattfindet?

In der unter 4.3 präsentierten Studie konnte für die alleinige Supplementation des Aronia-Mischfruchtsafts nur ein Einfluss auf den vaskulären Gefäßzustand, basierend auf einer signifikanten Verringerung des peripheren Widerstandes, beobachtet werden. Dieser war von einer Veränderung der PWV über die Zeit begleitet. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit den Resultaten aus einer Forschungsarbeit, in der die Einnahme eines polyphenolreichen Aronia Extrakts mit 106 mg Gesamtpolyphenolen über 12 Wochen zu einer signifikanten Reduktion der PWV in einem prähypertensiven Probandenkollektiv führte [215]. Darauf basierend lassen sich sowohl die Änderungen in der PWV als auch die beobachtete Verringerung des peripheren Widerstands in der benannten Studie dieser Arbeit als positive gesundheitsbezogene Anpassungen im Kontext des Fruchtsaftkonsums bewerten. Die Reduktion beider Parameter weist auf eine verringerte arterielle Steifigkeit hin, die ein Prädiktor für kardiovaskuläre Ereignisse darstellt [216]. Zu den zugrundeliegenden Mechanismen gehören unter anderem die polyphenolabhängige Erhöhung der mikrobiellen

Vielfalt (mit Veränderungen der Stoffwechselwerte und des entzündungshemmenden Zustands) und die Verstoffwechselung der Polyphenole durch die Mikrobiota [217–222]. Letztgenanntes bedarf jedoch noch weiterer Forschungsarbeiten (vgl. 2.3.2.4), um die Vielfalt und die Funktionen der aus dem Metabolismus der Darmmikrobiota hervorgehenden Metabolite mit Rückwirkung auf die kardiovaskuläre Gesundheit und die Bioverfügbarkeit von Stickstoffmonoxid als Vasodilatator vollständig zu verstehen [130,218].

Die beobachtete signifikante Verringerung der PWV in beiden Studiengruppen (Saft und Placebo) der unter 4.3 präsentierten Studie bedarf ebenfalls weiterer Klärung, besonders vor dem Hintergrund, dass dieses Ergebnis, von dem in beiden Studiengetränken enthaltenen Kalium beeinflusst sein könnte. Sowohl über den Aronia-Mischfruchtsaft als auch über das Placebo haben die Proband*innen insgesamt 600 mg Kalium pro Tag zugeführt (vgl. Anhang Aronia-Mischfruchtsaft Charge 3 und Placebo Charge 2), so dass die Studiengetränke-Supplementierung mit 15 % zur Deckung des DGE-Referenzwerts für Kalium beigetragen hat [135]. In diesem Kontext scheint der unter 2.3.3.1 genannten endothelabhängigen Vasodilatation bzw. Funktionsregulierung eine zentrale Funktion zuzukommen, in der jedoch Kalium nicht nur isoliert, sondern in Wechselwirkung mit Natrium und Aldosteron zu betrachten ist. Verschiebt sich durch die gesteigerte Kaliumaufnahme das Verhältnis der Natrium-Kaliumzufuhr, wird die natriumsensitive Aktivität der in den Endothelzellen befindlichen Natriumkanäle, unter Anwesenheit von Aldosteron, herunterreguliert. Daraus hervorgehend wird die davon beeinflusste Synthese von NO über endotheliale NOS stimuliert. Der detaillierte biochemische Mechanismus ist aber noch nicht vollends verstanden [223].

In Verbindung zur Körperzusammensetzung offenbarten sich signifikante Auswirkungen auf den relativen Muskelmasseanteil unter Einfluss des kombinierten Kraftausdauertrainings, wenn der Aronia-Mischfruchtsaft konsumiert wurde. Veränderungen im Körpergewicht resultierten daraus jedoch nicht. Dies ist im Einklang mit Ergebnissen aus vorherigen Forschungsarbeiten, die keinen Einfluss von purem Aroniasaft auf den BMI (inkludiert das Körpergewicht) [183], aber eine Zunahme der Muskelmasse herausstellen konnten [183,184]. Aktuelle Studienarbeiten haben in diesem Kontext biologische Mechanismen identifiziert, welche die Auswirkungen des Aronia-Mischfruchtsafts auf die Muskelmasse erklären könnten. In einer Tierstudie mit Ratten wurde Ursolsäure aus der Aroniabeere, nach wiederholter elektrischer Stimulation der Muskeln, als stimulierend in Bezug auf die Aktivität des Rapamycin-Komplexes 1 (mTORC1) identifiziert [224]. Darüber hinaus wirkten sich die Inhaltsstoffe eines Aronia Extrakts positiv auf die myogene Differenzierung aus und förderten die Bildung von Myotuben durch die Aktivierung des Akt-Signalwegs in C2C12-Myoblasten, der eine Schlüsselrolle in der Regulierung der Skelettmuskelhypertrophie hat [225]. Zusammenfassend deuten diese Forschungsergebnisse darauf hin, dass die Inhaltsstoffe der Aroniabeere eine positive Wirkung auf den Muskelstoffwechsel haben können. Andere potenzielle physiologische Wirkungen der eingangs dieser Arbeit beschriebenen Inhaltsstoffe des Aronia-Mischfruchtsafts, im Hinblick auf anti-diabetische und anti-inflammatorische Effekte, ließen sich hinsichtlich der untersuchten Parameter des Glukosestoffwechsels und des oxidativen Stresszustands der Menschen mit Prädiabetes mellitus nicht identifizieren. Die

Annahme einer, wie unter 2.3.1.2 dargelegten, katalytischen Fruktose-Dosis, welche die Glukosetoleranz im Stoffwechsel verbessern soll, kann im Kontext des konsumierten Aronia-Mischfruchtsaftes nicht gezeigt und nicht bewertet werden. Unter Berücksichtigung, dass aber an gesunden Personen schon eine anti-diabetische Wirkungsweise aufgezeigt werden konnte [179], können für den Verzehr des Aronia-Mischfruchtsaftes ebenso keine anti-diabetischen und in gemeinsamer Betrachtung der unter 4.2 präsentierten Studie keinen antioxidativen Einflüsse resümiert werden. Das Ausbleiben statistisch signifikanter Ergebnisse muss daher im Kontext der Zusammensetzung des Aronia-Mischfruchtsaftes begutachtet werden. Dies erfolgt im nachstehenden Abschnitt der Methodendiskussion.

5.2 Methodendiskussion

Zur abschließenden Ergebnisevaluation werden die verschiedenen Methoden der in Kapitel 4 präsentierten Studien betrachtet und kritisch analysiert.

Die Untersuchung der Apfelsaftschorle aus der unter 4.1 präsentierten Publikation deutet an, dass zur Bewertung der Apfelsaftschorle, des Aronia-Mischfruchtsaftes und insgesamt von Fruchtsäften, unabhängig vom Betrachtungsschwerpunkt, die Wechselwirkung der einzelnen Fruchtsaftinhaltsstoffe in der FSM berücksichtigt werden muss. In den Studien dieser Arbeit wurde eine Analyse des Nährstoffprofils für die Apfelsaftschorle und den Aronia-Mischfruchtsaft vorgenommen, doch erfolgte dies selektiv, wie dies im Anhang für die Apfelsaftschorle ersichtlich ist. Dieses methodische Vorgehen lässt sich in anderen Studien ebenfalls identifizieren, in denen die Angabe der Nährstoffzusammensetzung eingeschränkt erfolgt [34,35,172,179,183,186,187]. Zur Identifikation und Feststellung der physiologischen Wirkungsweisen der Inhaltsstoffe sollten die in Studien eingesetzten Fruchtsaftinterventionen möglichst vollständig bezüglich ihres Nährstoffprofils analysiert werden. Erst dann können physiologische Effekte auf den Humanmetabolismus sowohl für die einzelnen Inhaltsstoffe als auch deren Wechselwirkung identifiziert und mechanistisch entschlüsselt werden. Darüber hinaus können in diesem Zusammenhang weitere Faktoren, wie der Zeitpunkt des Konsums und die Belastungsmodalität in Form von Ruhebedingungen, sportlicher Belastung oder auch das Probandenkollektiv, untersucht und ausgewertet werden [171].

Ergänzend dazu ist die Zusammensetzung der Studiengetränke hinsichtlich der Ergebnisinterpretation relevant. Frühere Forschungsarbeiten konnten für reinen Aroniasaft antioxidative [33], anti-inflammatorische [34] und anti-diabetische Wirkungen [179–181] aufzeigen, die sich in den unter 4.2 und 4.3 präsentierten Studien dieser Arbeit nicht identifizieren ließen. Dies könnte auf die im Fruchtsaft enthaltene polyphenolische Zusammensetzung zurückzuführen sein. Der Aronia-Mischfruchtsaft enthielt nur 25 % Aronia und damit im Mittel 820,72 mg Polyphenole pro 200 ml als Verzehrportion. Im Vergleich zu 200 ml reinem Aroniasaft, der beispielsweise in der Studie von Stevanović et al. [35] verwendet wurde, sind dies 476,08 mg weniger Polyphenole. Dies deutet an, dass der Anteil des Aroniasafts mit 25 % möglicherweise zu niedrig sein könnte, um vergleichbare Wirkungen zu induzieren und zu messen. Es sollten daher weitere Studien mit verschiedenen Gehalten an Aroniasaft in Mischfruchtsäften durchgeführt werden, um eine Dosis-Wirkungsbeziehung

herleiten zu können. Wenn sich eine potenzielle Effektschwelle in Assoziation mit der den Mischfruchtsäften hinzugefügten Aroniasaftmenge herausstellen ließe, könnte daran orientiert die optimale Mischung für die geschmackliche Akzeptanz der Konsumenten abgeleitet werden, so dass der saure und adstringierende Geschmack der Aroniabeere kein Konsumhemmnis mehr darstellt [96].

Insgesamt lässt sich die vorhandene Literatur bezüglich der physiologischen Wirkungen von Fruchtsaft-Supplementationen im sport- und gesundheitsbezogenen Kontext schwer vergleichen und bewerten, da neben den eingeschränkten Angaben zu den in den Studiengetränken enthaltenen Inhaltsstoffen unterschiedliche Dosierungen und Verabreichungszeiträume in den Forschungsarbeiten zur Anwendung gekommen sind (vgl. 2.4) [171]. Erschwerend kommen die verschiedenen Ausweisungen der Polyphenolgehalte hinzu, die aus den unterschiedlichen Analyseverfahren der Polyphenole hervorgehen [226,227]. Eine Gegenüberstellung der unter 4.2 vorgestellten Studienergebnisse mit anderen Studien, die vergleichbare Rahmenbedingungen hatten, ist aufgrund der eingeschränkten Anzahl von Forschungsarbeiten zu Apfelsaft sowie Aroniasaft und den nicht vorhandenen Studien im Bereich der Apfelsaftschorle und den Aronia-enthaltenden Mischfruchtsäften kaum möglich. In diesen Rahmenbedingungen sollte eine Vereinheitlichung stattfinden, dass eine Vergleichbarkeit zwischen den Studienergebnissen hergestellt und daraus zukunftsorientierte Dosis-Wirkungsbeziehungen, unter Berücksichtigung der zeitlichen Verabreichung, abgeleitet werden können. Einerseits würde diese Vereinheitlichung im methodischen Vorgehen zusammen mit der vollständigen Nährstoffausweisung der Fruchtsaftinterventionen dazu beitragen, den Einfluss externer Faktoren unter anderem auf den Polyphenolgehalt zu minimieren. Dieser ist beispielsweise durch Wachstums- oder Erntebedingungen der im Saft enthaltenen Frucht beeinflussbar [86,88]. Durch eine einheitliche lebensmittelchemische Analyse könnten wissenschaftliche Ergebnisse zur Standardisierung der Nährstoffgehalte von Fruchtsäften in Verbindung mit der physiologischen Wirksamkeit beitragen. Andererseits ließe sich Fruchtsaft ernährungsphysiologisch besser einordnen und in Bezug auf Ernährungsempfehlungen eindeutiger positionieren, was sich aktuell noch als kontrovers darstellt und eine diätetische Zufuhrempfehlung in Menge sowie Häufigkeit für Fruchtsäfte eingeschränkt ermöglicht [78]. Zudem muss berücksichtigt werden, dass Ernährungsempfehlungen, wie diese von der DGE ausgesprochen werden, nur für gesunde Personen gelten. In Betrachtung von gesundheitsbezogenen Outcomes besteht daher weiterer Forschungsbedarf angesichts der Fruchtsaftzufuhr in Probandenkollektiven mit metabolischen Veränderungen unter begleitendem Einfluss von körperlicher Aktivität (vgl. 4.3), da unterschiedliche (patho)physiologische Bedingungen je nach Gesundheitszustand des Einzelindividuums zu unterschiedlichen Wirkungen bezüglich des Fruchtsaftkonsums führen können (Sporttauglichkeit vorausgesetzt) [171].

Für die Herleitung einer Zufuhrempfehlung von Fruchtsäften, inklusive der hier präsentierten Studiengetränke, muss basierend auf der ernährungsphysiologischen Wirksamkeit weiterhin beachtet werden, dass alle im Fruchtsaft enthaltenen und wie für die Studiengetränke unter

2.3 dargestellten Inhaltsstoffe im Kontext der täglichen Gesamtnährstoffzufuhr betrachtet werden müssen. Daher wurde die Ernährung der Probanden über Ernährungserhebungsmethoden in den unter 4.2 und 4.3 präsentierten Studien erfasst, um eine Einschätzung der Nährstoff- und Polyphenolzufuhr neben den Studiengetränken zu erhalten. Vereinzelt wurde dies in vorherigen Studien ebenfalls praktiziert [172,182–184], ist allerdings nicht als obligatorische Methodik in Forschungsarbeiten mit Fruchtsaft zu finden [186,187]. Trotz der Einschränkungen, dass die Ernährungsdaten subjektiv selbstberichtet sind und je nach Ernährungserhebungsmethodik daraus hervorgehend ein mögliches Over- bzw. Underreporting nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann [228,229], sollten sich Ernährungserhebungen im methodischen Vorgehen etablieren. Daraus lassen sich Zusammenhänge zwischen fruchtsaftbasierten Ernährungsinterventionen und habituellen Ernährungsweisen weitergehend erforschen und verstehen. Eine Abhilfe gegen die genannten Bias können ernährungskontrollierte In-House-Studien leisten, die jedoch methodisch und finanziell aufwendig sind [230], oder Ernährungsstandardisierungen, wie diese in der unter 4.1 präsentierten Studie umgesetzt wurden. Insgesamt kann die Methodik zur Durchführung von Forschungsarbeiten mit fruchtsaftbasierten Ernährungsinterventionen noch optimiert werden, und die benannten methodischen Einschränkungen sind daher auch in der Ergebnisinterpretation der im 4. Kapitel dieser Arbeit dargestellten Studien zu berücksichtigen.

Neben den Einflussfaktoren, die von der Applikation der Studiengetränke ausgehen, ist auch der Einfluss des Belastungsprotokolls sowie des Ultra-Marathons in der unter 4.1 präsentierten Studie und die beiden Trainingsinterventionen in den unter 4.2 und 4.3 dargestellten Studien bedeutsam. Die Belastungsintensität des Ausdauerlaufs über eine Stunde mit 80 % der LT(D) (vgl. 4.1) wurde in vorherigen Pilotstudien systematisch analysiert und orientierte sich an einer zuvor durchgeführten Studie [20]. Die Akutbelastung durch den Ultra-Marathon wurde ebenfalls auf Basis vorhandener Literatur ausgewählt [193]. Die Gestaltung der Trainingsprotokolle der beiden anderen Studien orientierte sich an den Leitlinien für ein HIIT-Trainingsdesign [231] und an den Empfehlungen der Deutschen Diabetes Gesellschaft für körperliche Aktivität [191] (vgl. 4.2 und 4.3). Dennoch offenbaren sich in diesem Kontext Limitationen, die betrachtet werden sollten.

Sowohl das Ausdauer-Belastungsprotokoll als auch der Ultra-Marathon als auch die Trainingsinterventionen wurden im Feld durchgeführt und sind demzufolge von externen Faktoren abhängig. Dies führte beispielsweise aufgrund von extremen Wetterbedingungen zu einer hohen Drop-out-Rate im Kontext des Ultra-Marathons. Zur besseren Standardisierung hätte der einstündige Dauerlauf (vgl. 4.1), die Laufbelastungen des HIIT-Ausdauertrainingsprotokolls (vgl. 4.2) und der Ausdaueranteil des kombinierten Kraftausdauertrainings auf einem Laufband sowie das Krafttraining (vgl. 4.3) in einem Krafraum stattfinden können. Dies hätte jedoch die Durchführung der Studien sehr zeitaufwendig gemacht, denn auf dem Laufband hätte nur ein Proband getestet bzw. trainiert werden können. Weiterhin sollten die körperlichen Belastungen standardisiert, jedoch auch möglichst praxisnah und für die Proband*innen der Studie unter 4.3 möglichst niederschwellig

für mehr körperliche Aktivität in den Alltag integrierbar sein. Damit umfassen die Studien Belastungs- und Trainingsprotokolle mit einer Praxisrelevanz bezüglich ihrer anwendungsorientierten Umsetzung und wurden in anderen Studien schon vergleichbar praktiziert [20,193,232].

Spezifisch lässt sich die Definition der Intensität als Prozentsatz des LT(D) im sechstägigen Ausdauertrainingsprotokoll der unter 4.2 präsentierten Studie und die Kontrolle der Trainingsdurchführung über ein app-basiertes Tracking als zusätzliche Einschränkung ansehen, da sogenannte „*effort-matched approaches*“ als realistischere Ansätze für das Training von Athlet*innen angenommen werden [233,234]. Allerdings konnten die Trainingseinheiten in dieser Studie nur durchgeführt werden, wenn die Proband*innen in der Lage waren, selbstständig nach dem festgelegten Protokoll zu trainieren. Im Vergleich von Trainingsprotokollierungen mit dieser Vorgehensweise bei älteren Menschen [50] kann nicht valide festgestellt werden, dass das Training bis ins kleinste Detail mit den Vorgaben übereinstimmt, aber diese Studie zeigt, dass das Trainingstracking bei jüngeren Menschen funktioniert und valide Ergebnisse liefert. Insgesamt müssen die verschiedenen Arten der körperlichen Belastungen der in Kapitel 4 präsentierten Studien in Verbindung mit den Wechselwirkungen der Fruchtsaftintervention differenziert betrachtet werden. Unter 2.2 wurden die Unterschiede in den Adaptationsreaktionen auf akute, einmalige körperliche Belastungen und sich wiederholende Trainingsbelastungen dargestellt. Diese Einteilung wurde vor dem Hintergrund der biologischen Reaktionen des Humanmetabolismus aufgestellt, ist in der Verbindung mit einer wissenschaftlichen Definition von Trainingsanwendungen jedoch schwer festzulegen. Es existiert bisher in der Sportwissenschaft keine Bewertungsgrundlage und einheitliche Begriffsdefinition hinsichtlich systematischer Trainingsprotokolle, die einmalige, kurzzeitig-wiederholende oder chronische Belastungsinterventionen bezüglich der Trainingshäufigkeit und der Anwendungsdauer definieren. In diesem Bereich müssen Standards zur Einordnung entwickelt werden, um allgemein die durch körperliche Belastungen induzierten physiologischen Adaptationen fundierter einordnen und dann in Verbindung mit externen Faktoren wie beispielsweise der Ernährung evaluieren zu können. Die unter 2.2 vorgenommene Differenzierung kann als initiale Ausführung verstanden werden, um Einteilungsstandards in der Anwendung von systematischen Trainingsprotokollen und deren Abgrenzung zu akuten körperlichen Belastungen zu erarbeiten, wenn diese unter dem Aspekt von körperlichen Adaptationsprozessen betrachtet werden. In Folgestudien sollten diese Aspekte dringend berücksichtigt werden, um einen weiteren Beitrag zur Mechanismus- und Adaptionsbestimmung zu liefern.

Abschließend müssen in der methodenbasierten Ergebnisevaluation Limitationen im Zuge der Erhebung der vorwiegend molekularen, aber auch funktionalen Parameter aufgeführt werden. Die eingangs der Methodendiskussion erwähnte Ernährungsstandardisierung hätte bezüglich der Dauer in Studie A und der Umsetzung in Teil B, in der unter 4.1 dargestellten Publikation, stringenter umgesetzt werden müssen. Aus organisatorischen und ethischen Gründen war dies jedoch nicht möglich. Die Durchführung und Compliance-Kontrolle

angesichts von Ernährungsstandardisierungen vor körperlichen Belastungsprotokollen stellt sich in Forschungsarbeiten aber generell als methodisch schwierig dar und ist daher immer mit möglichen Einschränkungen hinsichtlich der Ergebnisinterpretation verbunden [235]. In Betrachtung der CK als Marker für den EIMD und oxLDL bzw. TBARS zur Bewertung des oxidativen Stresszustands (vorgestellte Studien 4.2 und 4.3) ergeben sich Limitationen für die Zeitpunkte der Blutentnahmen und die Fokussierung auf nur jeweils einen Parameter hinsichtlich der betrachteten Outcomes. Für die CK hätten mehrere Blutabnahmen stattfinden können, um die Serummaximalkonzentration, die erst zwischen 24 und 96 Stunden auftritt [206], in Assoziation mit dem EIMD zu bewerten. Ergänzend hätten weitere Marker für die Evaluation des EIMD in Form von Myoglobin und/oder der Laktatdehydrogenase herangezogen [236] und deren Konzentration hinsichtlich der Studiengetränke-Supplementierung bewertet werden können. Ebenso scheinen die Zeitpunkte der Blutabnahmen von oxLDL und TBARS unzureichend zu sein, da molekular messbare Konzentrationsänderungen von Parametern zur Evaluation des oxidativen Stresszustands vorübergehend in einem relativ kurzen Zeitrahmen nach akuter Belastung auftreten können [237]. Darüber hinaus sollte die Messung des oxidativen Stresses durch andere Marker wie beispielsweise die totale antioxidative Kapazität, die GPxs- und die SOD-Aktivität ergänzt werden, da über diese Parameter antioxidative Wirkungen von Aroniasaft in Studien mit intensivem Ausdauertraining nachgewiesen wurden [33,34] und als etablierte Marker des oxidativen Stresszustandes bei körperlicher Belastung gelten [237]. Allgemein ist hier auf die Einschränkung zu verweisen, dass die Marker zur Messung des oxidativen Zustands nur als „Proxy-Marker“ anzusehen sind und potenziell auch fehlerbehaftet sein können, besonders wenn durch ROS verursachte Muskelschädigungen ermittelt werden sollen [238]. Darauf basierend sollten zukünftige Forschungsarbeiten die Messung des oxidativen Status zeitlich und methodisch umfangreicher betrachten. In Bezug auf die unter 4.2 und 4.3 durchgeführten Studien kann daher keine Aussage zu antioxidativen Wirkungen der Aronia-Mischfruchtsaftintervention getroffen werden, wenn diese von den jeweiligen Trainingsprotokollen begleitet war.

In der Durchführung einer tiefen Kniebeuge erfolgte die Messung der Beinkraft mittels einer geschwindigkeitsbasierten Methode (vgl. 4.2). Die beobachteten nicht-signifikanten Ergebnisse im Krafttest könnten darauf zurückzuführen sein, dass das e1RM nur geschätzt werden kann und eine größere Standardabweichung als bei der Bestimmung des tatsächlichen 1RM aufweist [239]. Dieses methodische Vorgehen wurde ausgewählt unter der Berücksichtigung, dass die kraftsportunerfahrenen Ausdauersportler*innen im Zuge der Testung keine Verletzung erleiden sollten, da die körperliche Belastung durch das Ausdauertrainingsprotokoll schon als sehr hoch einzustufen war. Dennoch gilt die e1RM-Messung mit Geschwindigkeitssensoren als eine valide Methode, denn im Vergleich zu konventionellen 1RM-Tests lässt sich ein akzeptables Genauigkeitsniveau feststellen, das wissenschaftlich validiert wurde [240].

Die Erhebung der Körperzusammensetzung wurde in der unter 4.3 präsentierten Studie mittels einer bioelektrischen Impedanzanalyse durchgeführt. Die fettfreie Körpermasse, die

Fettmasse und die Muskelmasse lassen sich hierdurch nur indirekt messen, dennoch ist die Methodik als valide bei Proband*innen mit einem Prädiabetes mellitus einzuschätzen. Sowohl für gesunde Personen [241,242] als auch für Patient*innen mit T2DM [243] konnte eine Validität herausgestellt werden, die somit die prä-diabetischen Studienteilnehmer*innen einschließt [244]. Dennoch ist die Methode durch Faktoren wie beispielsweise den Wasserhaushalt der zu messenden Person beeinflussbar. Liegt ein geringer Gesamtkörperwassergehalt vor, reduziert sich die Leitfähigkeit des angelegten Wechselstroms, woraus eine höhere gemessene Fettmasse resultiert. Unter Standardisierung der möglichen Einflussfaktoren sind Reliabilität und Validität der bioelektrischen Impedanzanalyse dennoch gegeben [241,242,245,246]. Werden die prozentualen Veränderungen in der Muskelmasse bezogen auf das Körpergewicht der Aronia-Mischfruchtsaft- und der Placebogruppe betrachtet, können die gemessenen Änderungen auf unter 1 % beziffert werden. Diese fallen damit in den Bereich der Messungenauigkeit der Methode und können den Muskelmasseverlust der Placebogruppe erklären, so dass demzufolge die Ergebnisse an dieser Stelle nicht überbewertet werden sollten. Da der Aronia-Mischfruchtsaft aber sowohl auf die Kraftfähigkeit (vgl. 4.2) als auch auf die relative Muskelmasse (vgl. 4.3) positiv zu interpretierende Effekte während Trainingsinterventionen zeigt, sollte dies, unter zusätzlicher Berücksichtigung molekular-mechanistischer Ansätze, weiter untersucht werden.

6 Fazit und Ausblick

Die hier dargestellten Untersuchungen liefern erste Erkenntnisse zu den Wechselwirkungen zwischen dem Konsum von Apfelsaftschorle sowie von einem Aronia-Mischfruchtsaft und körperlicher Belastung in akuter und trainingsorientierter Form bezüglich der sportlichen Leistung und der Gesundheit.

Vor diesem Hintergrund sind die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit:

- Der Konsum der Apfelsaftschorle und die damit einhergehende Zuckerzufuhr zeigten keine negativen Wirkungen auf die Darmbarriere nach einer moderat-intensiven sowie extremen akuten Ausdauerbelastung. Stattdessen konnten Hinweise auf eine veränderte Immunfunktion nach der moderat-intensiven Ausdauerbelastung beobachtet werden.
- Für die kurzzeitig-wiederholende Supplementation des Aronia-Mischfruchtsafts deuten sich bei Ausdauersportler*innen positive Hinweise auf den Erhalt der Beinkraft im Zuge eines HIIT-Trainingsprotokolls an.
- Die alleinige, kurzzeitig-wiederholende Supplementation des Aronia-Mischfruchtsafts scheint den vaskulären Gesundheitszustand von Menschen mit Prädiabetes mellitus positiv zu beeinflussen, während sich im Zuge eines begleitenden, kurzzeitig-wiederholenden, kombinierten Kraft- und Ausdauertrainingsprotokolls ein Erhalt der relativen Muskelmasse andeutet. Im Gegenzug wurde für den Konsum des Placebos während des begleitenden kurzzeitig-wiederholenden kombinierten Kraft- und Ausdauertrainingsprotokolls eine leichte Abnahme der relativen Muskelmasse beobachtet.

Eine Zusammenfassung und grafische Darstellung der Ergebnisse dieser Arbeit ist in Abbildung 4 gegeben.

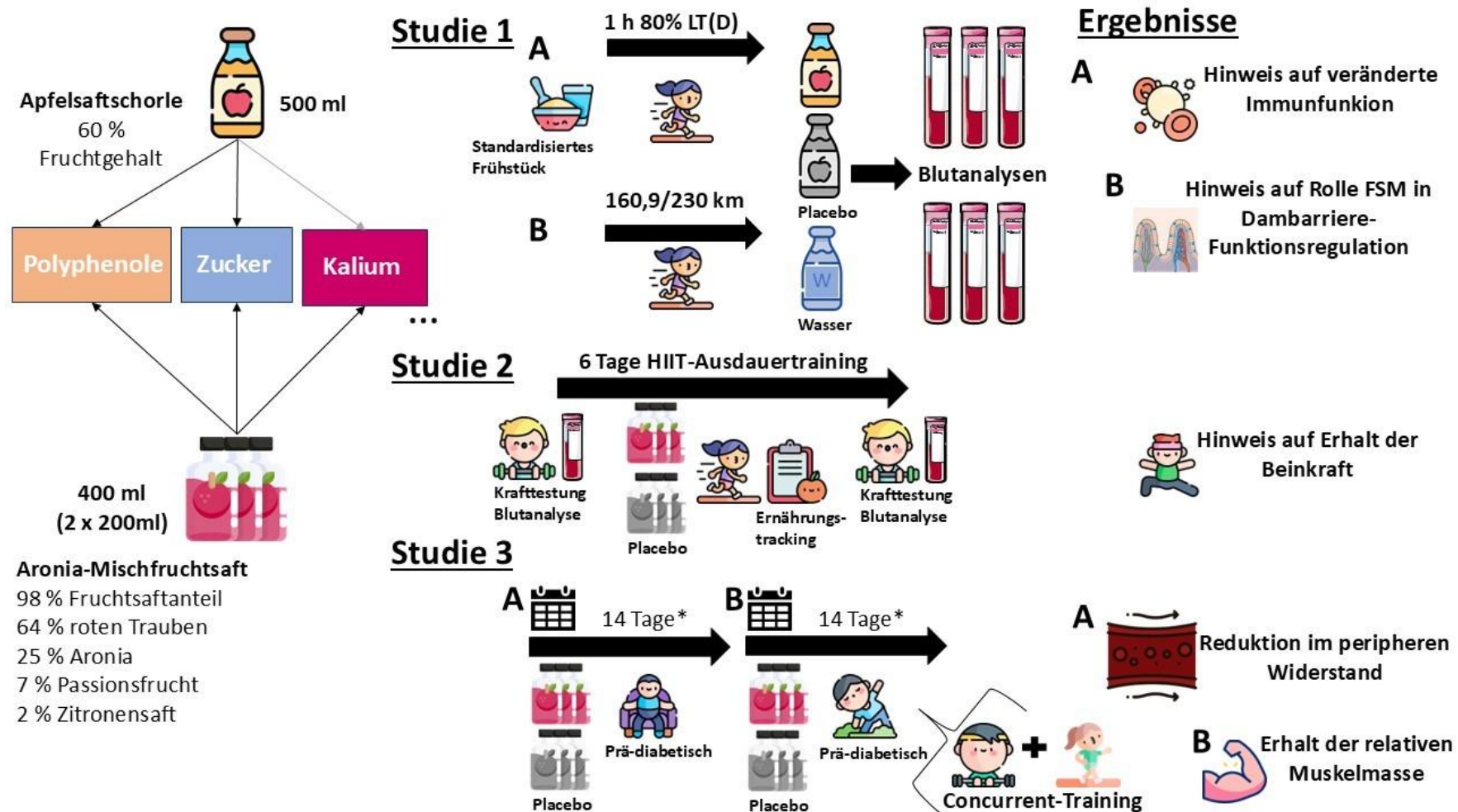


Abbildung 4 Grafische Zusammenfassung der wichtigsten Studienergebnisse (eigene Darstellung)

*Die Studienintervalle umfassten Eingangs- und Ausgangsuntersuchungen, die aufgrund der hohen Umfänglichkeit nicht dargestellt und der Original-Publikation zu entnehmen sind.

LT(D) = Individuelle anaerobe Schwelle ermittelt über Dmax-Methode, HIIT = hochintensives Intervalltraining,

Bild-Quellen: Apfelsaftschorle, Aroniasaft-Flasche, Figuren, Ernährungstracking-Symbol, Armmuskel, Blutgefäß und Immunzelle: Freepik [247] (Einzelnachweise können bei Autorin angefragt werden);

Bluttröhrchen: Smart SERVIER MEDICAL ART [248] (freie Lizenz); Ausschnitt Darmstruktur: Smart SERVIER MEDICAL ART [249].

In der Gesamtbetrachtung kann eine Saftsupplementation in den aufgezeigten Anwendungen dieser Arbeit nicht als negativ bewertet werden. Dies gilt jedoch nur in Verbindung mit den betrachteten Probandenkollektiven und den dazugehörigen Belastungsprotokollen. Welche Wechselwirkungen aus einer längerfristigen, wiederholten Einnahme nach akuten Belastungen für die Apfelsaftschorle bzw. im Kontext von wiederkehrenden Trainingsbelastungen für den Aronia-Mischfruchtsaft hervorgehen, bleibt offen. Eine abschließende Bewertung, ob eine Einnahme von Apfelsaftschorle und von Aronia-Mischfruchtsaft grundsätzlich als vorteilhaft anzunehmen ist, kann allein auf Basis dieser Arbeit noch nicht gegeben werden.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse dieser Arbeit sollten zukünftige Forschungsarbeiten die Apfelsaftschorle und den Aronia-Mischfruchtsaft in ihrer physiologischen Wechselwirkung mit körperlichen Belastungen als komplettes Lebensmittel mit allen Inhaltsstoffen betrachten. Dazu sollten einheitliche methodische Standards für die Saftsupplementierung, die Analytik der Inhaltsstoffe, die studienbegleitende Ernährungsprotokollierung und die Anwendung körperlicher Belastungen etabliert werden, um folgende weiterführende Forschungsfragen zu beantworten:

1. Welche Rolle besitzt die Fruchtsaftmatrix bei den physiologischen Wechselwirkungen der Fruchtsaftinhaltsstoffe zu körperlicher Belastung in akuter und trainingsorientierter Form? Lassen sich im Vergleich zu der isolierten Gabe von in der wissenschaftlichen Literatur hervorgehobenen Inhaltsstoffen wie beispielsweise den Polyphenolen oder den Zuckern besondere Effekte identifizieren?
2. Welche Einflüsse resultieren aus einer längerfristigen Anwendung in größeren und metabolisch verschiedenen Probandenkollektiven, wenn das in dieser Arbeit dargestellte Supplementations- und Trainingsvorgehen angewendet wird?
3. Lassen sich in diesem Kontext die beobachteten Hinweise auf eine veränderte Immunfunktion detaillierter herausarbeiten und bestätigen?
4. Welche Wirkungen hat ein höherer Aronia-Anteil in einem Aronia-Mischfruchtsaft im Kontext von wiederholten Trainingsbelastungen? Lassen sich die Effekte auf die vaskuläre Gesundheit und die Muskulatur im Zusammenhang mit wiederholten Trainingsbelastungen weitergehend identifizieren, und ab welcher anteiligen Beimischung wird die sensorische Akzeptanz der Konsumenten abgewertet?
5. Lassen sich aus den beobachteten Ergebnissen zur Supplementation von Apfelsaftschorle und Aronia-Mischfruchtsaft die entsprechenden biologischen Mechanismen aus gekoppelten Zellkulturversuchen ableiten?

Diese Arbeit leistet damit einen ersten Beitrag, physiologische Wirkungen von Apfelsaftschorle und Aronia-Mischfruchtsaft im Kontext von körperlichen Belastungen aufzuzeigen. Zukünftig werden Untersuchungen mit einer längerfristigen Supplementation in verschiedenen Probandenkollektiven mit größerer Probandenanzahl unter Anwendung der genannten standardisierten Studiendurchführungsmethodiken benötigt. Vor-, begleitende und nachgelagerte Zellkulturversuche könnten zum Verständnis der biologischen Mechanismen beitragen, so dass nachfolgend eine differenziertere Bewertung der Wechselwirkungen zwischen dem Konsum von Apfelsaftschorle sowie von Aronia-

Mischfruchtsaft und der sportlichen Leistung sowie der Gesundheit unter Einfluss von körperlicher Belastung in akuter und trainingsorientierter Form möglich ist. Daraus resultierend ließen sich sowohl die Apfelsaftschorle als auch der Aronia-Mischfruchtsaft ernährungsphysiologisch besser einordnen, und auf diätetische Zufuhrempfehlungen könnte im Kontext körperlicher Belastung sowie Training für verschiedene Bevölkerungsgruppen hingearbeitet werden.

7 Literaturverzeichnis

1. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Gut essen und trinken – die DGE-Empfehlungen. Available online: <https://www.dge.de/gesunde-ernaehrung/gut-essen-und-trinken/dge-empfehlungen/#c6452> (accessed on 18 September 2024).
2. Schäfer AC, Boeing H, Conrad J, Watzl B für die DGE Arbeitsgruppe Lebensmittelbezogene Ernährungsempfehlungen. Wissenschaftliche Grundlagen der lebensmittelbezogenen Ernährungsempfehlungen für Deutschland: Methodik und Ableitungskonzepte. *Ernährungs Umschau* **2024**, 71, M158-66.
3. Carlsohn A, Braun H, Großhauser M, König D, Lampen A, Mosler S, Nieß A, Oberritter H, Schäbenthal K, Schek A, Stehle P, Virmani K, Ziegenhagen R, Heseker H. Minerals and vitamins in sports nutrition.: Position of the working group sports nutrition of the German Nutrition Society (DGE). *Ernährungs Umschau* **2019**, 66, 250–257.
4. Bayrisches Staatsministerium für Gesundheit, Pflege und Prävention. Gesunde Ernährung. Available online: <https://www.stmgp.bayern.de/vorsorge/gesund-leben/ernaehrung/> (accessed on 21 September 2024).
5. J. Müller, M.; Mast, M.; Langnäse, K. Adipositas: Eine Herausforderung für Public Health. *Journal of Public Health* **2002**, 10, 11–20, doi:10.1007/BF02962489.
6. Benton, D.; Young, H.A. Role of fruit juice in achieving the 5-a-day recommendation for fruit and vegetable intake. *Nutr. Rev.* **2019**, 77, 829–843, doi:10.1093/nutrit/nuz031.
7. Bundeszentrum für Ernährung. Tipps für mehr Obst und Gemüse: DGE empfiehlt: viel und bunt. Available online: <https://www.bzfe.de/service/news/aktuelle-meldungen/news-archiv/meldungen-2024/maerz/tipps-fuer-mehr-obst-und-gemuese> (accessed on 21 September 2024).
8. *Verordnung über Fruchtsaft, Fruchtnektar und koffeinhaltige Erfrischungsgetränke (Fruchtsaft- und Erfrischungsgetränkeverordnung - FrSaftErfrischGetrV): FrSaftErfrischGetrV*, 20 Dezember/2001.
9. Verband der deutschen Fruchtsaft-Industrie e.V. Immer hundertprozentig: Fruchtsaft. Available online: <https://www.fruchtsaft.de/saftwissen/was-ist-was/fruchtsaft/> (accessed on 21 September 2024).
10. Verband der deutschen Fruchtsaft-Industrie e.V. Frisch und fruchtig: Fruchtschorle, Fruchtsaftschorle. Available online: <https://www.fruchtsaft.de/saftwissen/was-ist-was/fruchtsaftschorle> (accessed on 21 September 2024).
11. Weniger S. Warum ist Saft kein gesunder Durstlöscher? Available online: <https://www.foodwatch.org/de/warum-ist-saft-kein-gesunder-durstloescher> (accessed on 21 September 2024).
12. Pepin, A.; Stanhope, K.L.; Imbeault, P. Are Fruit Juices Healthier Than Sugar-Sweetened Beverages? A Review. *Nutrients* **2019**, 11, doi:10.3390/nu11051006.
13. World Health Organization. *Guideline: sugars intake for adults and children*, Geneva.
14. Ho, K.K.H.Y.; Ferruzzi, M.G.; Wightman, J.D. Potential health benefits of (poly)phenols derived from fruit and 100% fruit juice. *Nutr. Rev.* **2020**, 78, 145–174, doi:10.1093/nutrit/nuz041.
15. Ernst JB, Arens-Azevêdo U, Bitzer B, Bosy-Westphal A, de Zwaan M, Egert S, Fritsche A, Gerlach S, Hauner H, Heseker H, Koletzko B, Müller-Wieland D, Schulze M, Virmani K, Watzl B, Buyken AE für Deutsche Adipositas-Gesellschaft, Deutsche Diabetes Gesellschaft und Deutsche Gesellschaft für Ernährung. *Quantitative Empfehlung zur Zuckerzufuhr in Deutschland*, Bonn, 2018.

16. Imamura, F.; O'Connor, L.; Ye, Z.; Mursu, J.; Hayashino, Y.; Bhupathiraju, S.N.; Forouhi, N.G. Consumption of sugar sweetened beverages, artificially sweetened beverages, and fruit juice and incidence of type 2 diabetes: systematic review, meta-analysis, and estimation of population attributable fraction. *BMJ* **2015**, *351*, h3576, doi:10.1136/bmj.h3576.
17. Mosler S, Braun H, Carlsohn A, Großhauser M, König D, Lampen A, Nieß A, Oberritter H, Schäbethal K, Schek A, Stehle P, Virmani K, Ziegenhagen R, Heseker H. Fluid replacement in sports.: Position of the working group sports nutrition of the German Nutrition Society (DGE). *Ernahrungs Umschau* **2019**, *66*, 52–59, doi:10.4455/eu.2019.011.
18. Maughan, R.J.; Depiesse, F.; Geyer, H. The use of dietary supplements by athletes. *J. Sports Sci.* **2007**, *25 Suppl 1*, S103-13, doi:10.1080/02640410701607395.
19. White, J.P.; Wilson, J.M.; Austin, K.G.; Greer, B.K.; St John, N.; Panton, L.B. Effect of carbohydrate-protein supplement timing on acute exercise-induced muscle damage. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2008**, *5*, 5, doi:10.1186/1550-2783-5-5.
20. Isenmann, E.; Blume, F.; Bizjak, D.A.; Hundsdörfer, V.; Pagano, S.; Schibrowski, S.; Simon, W.; Schmandra, L.; Diel, P. Comparison of Pro-Regenerative Effects of Carbohydrates and Protein Administred by Shake and Non-Macro-Nutrient Matched Food Items on the Skeletal Muscle after Acute Endurance Exercise. *Nutrients* **2019**, *11*, doi:10.3390/nu11040744.
21. Krawczyk, M.; Burzynska-Pedziwiatr, I.; Wozniak, L.A.; Bukowiecka-Matusiak, M. Impact of Polyphenols on Inflammatory and Oxidative Stress Factors in Diabetes Mellitus: Nutritional Antioxidans and Their Application in Improving Antidiabetic Therapy. *Biomolecules* **2023**, *13*, doi:10.3390/biom13091402.
22. Kashi, D.S.; Shabir, A.; Da Boit, M.; Bailey, S.J.; Higgins, M.F. The Efficacy of Administering Fruit-Derived Polyphenols to Improve Health Biomarkers, Exercise Performance and Related Physiological Responses. *Nutrients* **2019**, *11*, doi:10.3390/nu11102389.
23. Fraga, C.G.; Croft, K.D.; Kennedy, D.O.; Tomás-Barberán, F.A. The effects of polyphenols and other bioactives on human health. *Food Funct.* **2019**, *10*, 514–528, doi:10.1039/C8FO01997E.
24. Imperatrice, M.; Cuijpers, I.; Troost, F.J.; Stijns, M.M.J.P.E. Hesperidin Functions as an Ergogenic Aid by Increasing Endothelial Function and Decreasing Exercise-Induced Oxidative Stress and Inflammation, Thereby Contributing to Improved Exercise Performance. *Nutrients* **2022**, *14*, doi:10.3390/nu14142955.
25. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit. Super(?)foods: Wie super sind so genannte Superfoods wirklich? Available online: https://www.bvl.bund.de/DE/Service/01_Infothek/07_themen/superfoods/superfoods_node.html (accessed on 21 September 2024).
26. Franco Lucas, B.; Alberto Vieira Costa, J.; Brunner, T.A. How Information on Superfoods Changes Consumers' Attitudes: An Explorative Survey Study. *Foods* **2022**, *11*, doi:10.3390/foods11131863.
27. Cobos, Á.; Díaz, O. 'Superfoods': Reliability of the Information for Consumers Available on the Web. *Foods* **2023**, *12*, doi:10.3390/foods12030546.
28. Rickards, L.; Lynn, A.; Harrop, D.; Barker, M.E.; Russell, M.; Ranchordas, M.K. Effect of Polyphenol-Rich Foods, Juices, and Concentrates on Recovery from Exercise Induced Muscle Damage: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients* **2021**, *13*, doi:10.3390/nu13092988.

29. Alfieri, A.; D'Angelo, S.; Mazzeo, F. Role of Nutritional Supplements in Sport, Exercise and Health. *Nutrients* **2023**, *15*, doi:10.3390/nu15204429.
30. Gao, R.; Rapin, N.; Andrushko, J.W.; Farthing, J.P.; Gordon, J.; Chilibeck, P.D. The effect of tart cherry juice compared to a sports drink on cycling exercise performance, substrate metabolism, and recovery. *PLoS One* **2024**, *19*, e0307263, doi:10.1371/journal.pone.0307263.
31. Urbaniak, A.; Skarpańska-Stejnborn, A. Effect of pomegranate fruit supplementation on performance and various markers in athletes and active subjects: A systematic review. *Int. J. Vitam. Nutr. Res.* **2021**, *91*, 547–561, doi:10.1024/0300-9831/a000601.
32. Neto, M.M.; Da Silva, T.F.; Lima, F.F. de; Siqueira, T.M.Q.; Toscano, L.T.; Moura, S.K.M.S.F. de; Silva, A.S. Whole Red Grape Juice Reduces Blood Pressure at Rest and Increases Post-exercise Hypotension. *J. Am. Coll. Nutr.* **2017**, *36*, 533–540, doi:10.1080/07315724.2017.1331385.
33. Pilaczynska-Szczesniak, L.; Skarpanska-Steinborn, A.; Deskur, E.; Basta, P.; Horoszkiewicz-Hassan, M. The influence of chokeberry juice supplementation on the reduction of oxidative stress resulting from an incremental rowing ergometer exercise. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2005**, *15*, 48–58, doi:10.1123/ijsnem.15.1.48.
34. Skarpańska-Stejnborn, A.; Basta, P.; Sadowska, J.; Pilaczyńska-Szcześniak, L. Effect of supplementation with chokeberry juice on the inflammatory status and markers of iron metabolism in rowers. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2014**, *11*, 48, doi:10.1186/s12970-014-0048-5.
35. Stevanović, V.; Pantović, A.; Krga, I.; Zeković, M.; Šarac, I.; Glibetić, M.; Vidović, N. Aronia juice consumption prior to half-marathon race can acutely affect platelet activation in recreational runners. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2020**, *45*, 393–400, doi:10.1139/apnm-2019-0267.
36. Davis, D.W.; Navalta, J.W.; McGinnis, G.R.; Serafica, R.; Izuora, K.; Basu, A. Effects of Acute Dietary Polyphenols and Post-Meal Physical Activity on Postprandial Metabolism in Adults with Features of the Metabolic Syndrome. *Nutrients* **2020**, *12*, doi:10.3390/nu12041120.
37. Aptekmann, N.P.; Cesar, T.B. Orange juice improved lipid profile and blood lactate of overweight middle-aged women subjected to aerobic training. *Maturitas* **2010**, *67*, 343–347, doi:10.1016/j.maturitas.2010.07.009.
38. Verband der deutschen Fruchtsaft-Industrie e.V. Branchendaten 2023. Available online: <https://www.fruchtsaft.de/presse/grafiken/> (accessed on 21 September 2024).
39. World Health Organization. Global strategy on diet, physical activity and health.
40. Robert Koch-Institut. Körperliche Aktivität.
41. Weltgesundheitsorganisation. More active people for a healthier world: Global action plan on physical activity 2018-2030.
42. Caspersen, C.J.; Powell, K.E.; Christenson, G.M. Physical activity, exercise, and physical fitness: definitions and distinctions for health-related research. *Public Health Rep.* **1985**, *100*, 126–131.
43. Dasso, N.A. How is exercise different from physical activity? A concept analysis. *Nurs. Forum* **2019**, *54*, 45–52, doi:10.1111/nuf.12296.
44. Conrad, C.C. The president's council on physical fitness and sports. *Am. J. Sports Med.* **1981**, *9*, 199–202, doi:10.1177/036354658100900401.

45. Deutscher Olympischer Sportbund (DOSB) e.V. Fitness. Available online: https://gesundheit.dosb.de/service/wissenswertes/lexikon?tx_dpnglossary_glossary%5Baction%5D=show&tx_dpnglossary_glossary%5Bcontroller%5D=Term&tx_dpnglossary_glossary%5Bterm%5D=135&cHash=3cd18ac59a7c0f239dd71caa6451fd85 (accessed on 29 September 2024).
46. *Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit*; Güllich, A.; Krüger, M., Eds.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2023, ISBN 978-3-662-53409-0.
47. Weineck, J. *Optimales Training: Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder- und Jugendtrainings*, 17., neu überarbeitete Auflage; Spitta: Balingen, 2019, ISBN 978-3-946761-75-4.
48. Tillmann, V. Disability Studies in der Sportwissenschaft. In *Handbuch Disability Studies*; Waldschmidt, A., Ed.; Springer Fachmedien Wiesbaden: Wiesbaden, 2022; pp 321–335, ISBN 978-3-531-17537-9.
49. Soligard, T.; Swellnus, M.; Alonso, J.-M.; Bahr, R.; Clarsen, B.; Dijkstra, H.P.; Gabbett, T.; Gleeson, M.; Hägg, M.; Hutchinson, M.R.; et al. How much is too much? (Part 1) International Olympic Committee consensus statement on load in sport and risk of injury. *Br. J. Sports Med.* **2016**, *50*, 1030–1041, doi:10.1136/bjsports-2016-096581.
50. Michael Fröhlich, O.L. Trainingsbegriff im Sport. In *Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit*; Güllich, A., Krüger, M., Eds.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2023; pp 717–732, ISBN 978-3-662-53409-0.
51. Björn Stapelfeldt. Wie reagiert der Körper auf sportliche Aktivität? In *Sportbiologie*, 6., völlig neu bearb. Aufl.; Scheid, V., Ed.; Limpert: Wiebelsheim, Hunsrück, 2007; pp 89–119, ISBN 3785317042.
52. *Molekulare Sport- und Leistungsphysiologie*; Bachl, N.; Löllgen, H.; Tschann, H.; Wackerhage, H.; Wessner, B., Eds.; Springer Vienna: Vienna, 2018, ISBN 978-3-7091-1590-9.
53. Mcleod, J.C.; Currier, B.S.; Lowisz, C.V.; Phillips, S.M. The influence of resistance exercise training prescription variables on skeletal muscle mass, strength, and physical function in healthy adults: An umbrella review. *J. Sport Health Sci.* **2024**, *13*, 47–60, doi:10.1016/j.jshs.2023.06.005.
54. Rivera-Brown, A.M.; Frontera, W.R. Principles of exercise physiology: responses to acute exercise and long-term adaptations to training. *PM R* **2012**, *4*, 797–804, doi:10.1016/j.pmrj.2012.10.007.
55. Mujika, I.; Padilla, S. Detraining: loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part I: short term insufficient training stimulus. *Sports Med.* **2000**, *30*, 79–87, doi:10.2165/00007256-200030020-00002.
56. Mujika, I.; Padilla, S. Detraining: loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part II: Long term insufficient training stimulus. *Sports Med.* **2000**, *30*, 145–154, doi:10.2165/00007256-200030030-00001.
57. Thomas, D.T.; Erdman, K.A.; Burke, L.M. American College of Sports Medicine Joint Position Statement. Nutrition and Athletic Performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2016**, *48*, 543–568, doi:10.1249/MSS.0000000000000852.
58. Key, T.J.; Papier, K.; Tong, T.Y.N. Plant-based diets and long-term health: findings from the EPIC-Oxford study. *Proc. Nutr. Soc.* **2022**, *81*, 190–198, doi:10.1017/S0029665121003748.
59. Shaw, K.A.; Zello, G.A.; Rodgers, C.D.; Warkentin, T.D.; Baerwald, A.R.; Chilibeck, P.D. Benefits of a plant-based diet and considerations for the athlete. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2022**, *122*, 1163–1178, doi:10.1007/s00421-022-04902-w.

60. Vallée Marcotte, B.; Verheyde, M.; Pomerleau, S.; Doyen, A.; Couillard, C. Health Benefits of Apple Juice Consumption: A Review of Interventional Trials on Humans. *Nutrients* **2022**, *14*, doi:10.3390/nu14040821.
61. Baltes, W.; Matissek, R. *Lebensmittelchemie*, 6., vollst. überarb. Aufl.; Springer: Berlin, Heidelberg, 2007, ISBN 978-3-642-16538-2.
62. Soliman, G.A. Dietary Fiber, Atherosclerosis, and Cardiovascular Disease. *Nutrients* **2019**, *11*, doi:10.3390/nu11051155.
63. Farré, R.; Fiorani, M.; Abdu Rahiman, S.; Matteoli, G. Intestinal Permeability, Inflammation and the Role of Nutrients. *Nutrients* **2020**, *12*, doi:10.3390/nu12041185.
64. Chandel, N.S. Carbohydrate Metabolism. *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* **2021**, *13*, doi:10.1101/cshperspect.a040568.
65. Verband der deutschen Fruchtsaft-Industrie e.V. Ausgewogen ernähren – Fruchtsaft gehört dazu: „Du bist, was du isst“. Available online: <https://www.fruchtsaft.de/saftwissen/ernaehrung> (accessed on 23 October 2024).
66. Braun H, Carlsohn A, Großhauser M, König D, Lampen A, Mosler S, Nieß A, Oberritter H, Schäbenthal K, Schek A, Stehle P, Virmani K, Ziegenhagen R, Heseker H. Energy needs in sports: Position of the working group sports nutrition of the German Nutrition Society (DGE). *Ernährungs Umschau* **2019**, *66*, 146–153.
67. König D, Braun H, Carlsohn A, Großhauser M, Lampen A, Mosler S, Nieß A, Oberritter H, Schäbenthal K, Schek A, Stehle P, Virmani K, Ziegenhagen R, Heseker H. Carbohydrates in sports nutrition: Position of the working group sports nutrition of the German Nutrition Society (DGE). *Ernährungs Umschau* **2019**, *66*, 228–235.
68. Chen, L.; Tuo, B.; Dong, H. Regulation of Intestinal Glucose Absorption by Ion Channels and Transporters. *Nutrients* **2016**, *8*, doi:10.3390/nu8010043.
69. Fuchs, C.J.; Gonzalez, J.T.; van Loon, L.J.C. Fructose co-ingestion to increase carbohydrate availability in athletes. *J. Physiol.* **2019**, *597*, 3549–3560, doi:10.1113/JP277116.
70. Johnson, R.J.; Murray, R. Fructose, exercise, and health. *Curr. Sports Med. Rep.* **2010**, *9*, 253–258, doi:10.1249/JSR.0b013e3181e7def4.
71. Gillespie, K.M.; Kemps, E.; White, M.J.; Bartlett, S.E. The Impact of Free Sugar on Human Health-A Narrative Review. *Nutrients* **2023**, *15*, doi:10.3390/nu15040889.
72. Jensen, T.; Abdelmalek, M.F.; Sullivan, S.; Nadeau, K.J.; Green, M.; Roncal, C.; Nakagawa, T.; Kuwabara, M.; Sato, Y.; Kang, D.-H.; et al. Fructose and sugar: A major mediator of non-alcoholic fatty liver disease. *J. Hepatol.* **2018**, *68*, 1063–1075, doi:10.1016/j.jhep.2018.01.019.
73. Gentile, C.L.; Weir, T.L. The gut microbiota at the intersection of diet and human health. *Science* **2018**, *362*, 776–780, doi:10.1126/science.aau5812.
74. Suzuki, T. Regulation of the intestinal barrier by nutrients: The role of tight junctions. *Anim. Sci. J.* **2020**, *91*, e13357, doi:10.1111/asj.13357.
75. Hollander, D.; Kaunitz, J.D. The “Leaky Gut”: Tight Junctions but Loose Associations? *Dig Dis Sci* **2020**, *65*, 1277–1287, doi:10.1007/s10620-019-05777-2.
76. Nier, A.; Brandt, A.; Rajcic, D.; Bruns, T.; Bergheim, I. Short-Term Isocaloric Intake of a Fructose- but not Glucose-Rich Diet Affects Bacterial Endotoxin Concentrations and Markers of Metabolic Health in Normal Weight Healthy Subjects. *Mol. Nutr. Food Res.* **2019**, *63*, e1800868, doi:10.1002/mnfr.201800868.
77. Gołębek, K.D.; Regulska-Ilow, B. Dietary support in insulin resistance: An overview of current scientific reports. *Adv. Clin. Exp. Med.* **2019**, *28*, 1577–1585, doi:10.17219/acem/109976.

78. Ruxton, C.H.S.; Myers, M. Fruit Juices: Are They Helpful or Harmful? An Evidence Review. *Nutrients* **2021**, *13*, doi:10.3390/nu13061815.
79. Gonzalez, J.T. Are all sugars equal? Role of the food source in physiological responses to sugars with an emphasis on fruit and fruit juice. *Eur. J. Nutr.* **2024**, *63*, 1435–1451, doi:10.1007/s00394-024-03365-3.
80. Moore, M.C.; Cherrington, A.D.; Mann, S.L.; Davis, S.N. Acute fructose administration decreases the glycemic response to an oral glucose tolerance test in normal adults. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* **2000**, *85*, 4515–4519, doi:10.1210/jcem.85.12.7053.
81. Moore, M.C.; Davis, S.N.; Mann, S.L.; Cherrington, A.D. Acute fructose administration improves oral glucose tolerance in adults with type 2 diabetes. *Diabetes Care* **2001**, *24*, 1882–1887, doi:10.2337/diacare.24.11.1882.
82. Sievenpiper, J.L.; Chiavaroli, L.; Souza, R.J. de; Mirrahimi, A.; Cozma, A.I.; Ha, V.; Wang, D.D.; Yu, M.E.; Carleton, A.J.; Beyene, J.; et al. 'Catalytic' doses of fructose may benefit glycaemic control without harming cardiometabolic risk factors: a small meta-analysis of randomised controlled feeding trials. *Br. J. Nutr.* **2012**, *108*, 418–423, doi:10.1017/S000711451200013X.
83. Wink, M. Introduction: Biochemistry, Physiology and Ecological Functions of Secondary Metabolites. In *Biochemistry of Plant Secondary Metabolism*; Wink, M., Ed.; Wiley-Blackwell: Oxford, UK, 2010; pp 1–19, ISBN 9781444320503.
84. Dewick, P.M. *Medicinal natural products: A biosynthetic approach*, 2. ed., reprinted.; Wiley: Chichester, 2007, ISBN 9780471496403.
85. Matissek, R.; Raters Marion. Schokolade – ein besonderes Lebensmittel: Forschung zu Polyphenolen. Available online: https://www.bdsi.de/fileadmin/redaktion/Nachrichten_aus_der_Wissenschaft/WDP_02_2018_final.pdf (accessed on 8 October 2024).
86. Schek, A. Sekundäre Pflanzenstoffe. *Leistungssport* **2002**, *32*, 44–52.
87. Watzl, B. Einfluss sekundärer Pflanzenstoffe auf die Gesundheit. *Ernährungsbericht 2008*; Dt. Gesellsch. für Ernährung; Deutsche Ges. f. Ernährung: Bonn, 2008; pp 335–379, ISBN 978-3-88749-214-4.
88. Leitzmann, C. Characteristics and Health Benefits of Phytochemicals. *Forsch. Komplementmed.* **2016**, *23*, 69–74, doi:10.1159/000444063.
89. Shubham, K.; Anukiruthika, T.; Dutta, S.; Kashyap, A.V.; Moses, J.A.; Anandharamakrishnan, C. Iron deficiency anemia: A comprehensive review on iron absorption, bioavailability and emerging food fortification approaches. *Trends in Food Science & Technology* **2020**, *99*, 58–75, doi:10.1016/j.tifs.2020.02.021.
90. Bowtell, J.; Kelly, V. Fruit-Derived Polyphenol Supplementation for Athlete Recovery and Performance. *Sports Med.* **2019**, *49*, 3–23, doi:10.1007/s40279-018-0998-x.
91. Watzl, B.; Rechkemmer, G. Phenolsäuren. *Ernährungs Umschau* **2010**, *48*, 413–416.
92. Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. P-Cumarsäure. Available online: <https://de.wikipedia.org/wiki/P-Cumarsäure> (accessed on 12 December 2024).
93. Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. Hydroxybenzoesäuren. Available online: <https://de.wikipedia.org/wiki/Hydroxybenzoesäuren> (accessed on 12 December 2024).
94. Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. Stilben. Available online: <https://de.wikipedia.org/wiki/Stilben> (accessed on 12 December 2024).
95. Bendaali, Y.; Vaquero, C.; González, C.; Morata, A. Contribution of Grape Juice to Develop New Isotonic Drinks With Antioxidant Capacity and Interesting Sensory Properties. *Front. Nutr.* **2022**, *9*, 890640, doi:10.3389/fnut.2022.890640.

96. Kulling, S.E.; Rawel, H.M. Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) - A review on the characteristic components and potential health effects. *Planta Med.* **2008**, *74*, 1625–1634, doi:10.1055/s-0028-1088306.
97. Vonhoegen, J. Weniger Schmerzen ohne Nebenwirkungen? *sportärztezeitung*.
98. Adisakwattana, S.; Ruengsamran, T.; Kampa, P.; Sompong, W. In vitro inhibitory effects of plant-based foods and their combinations on intestinal α -glucosidase and pancreatic α -amylase. *BMC Complement. Altern. Med.* **2012**, *12*, 110, doi:10.1186/1472-6882-12-110.
99. Petry, A.; Görlach, A. NADPH-Oxidasen und HIF: zentrale Elemente der Redoxhomöostase. *Biospektrum* **2021**, *27*, 142–145, doi:10.1007/s12268-021-1539-z.
100. Juan, C.A.; La Pérez de Lastra, J.M.; Plou, F.J.; Pérez-Lebeña, E. The Chemistry of Reactive Oxygen Species (ROS) Revisited: Outlining Their Role in Biological Macromolecules (DNA, Lipids and Proteins) and Induced Pathologies. *Int. J. Mol. Sci.* **2021**, *22*, doi:10.3390/ijms22094642.
101. Jones, D.P. Radical-free biology of oxidative stress. *American Journal of Physiology-Cell Physiology* **2008**, *295*, C849–C868, doi:10.1152/ajpcell.00283.2008.
102. Valko, M.; Leibfritz, D.; Moncol, J.; Cronin, M.T.D.; Mazur, M.; Telser, J. Free radicals and Antioxidans in normal physiological functions and human disease. *Int. J. Biochem. Cell Biol.* **2007**, *39*, 44–84, doi:10.1016/j.biocel.2006.07.001.
103. Halliwell, B. Reactive species and Antioxidans. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. *Plant Physiol.* **2006**, *141*, 312–322, doi:10.1104/pp.106.077073.
104. Cooper, C.E.; Volvaard, N.B.J.; Choueiri, T.; Wilson, M.T. Exercise, free radicals and oxidative stress. *Biochemical Society Transactions* **2002**, *30*, 280–285, doi:10.1042/bst0300280.
105. Slattery, K.; Bentley, D.; Coutts, A.J. The role of oxidative, inflammatory and neuroendocrinological systems during exercise stress in athletes: implications of antioxidant supplementation on physiological adaptation during intensified physical training. *Sports Med.* **2015**, *45*, 453–471, doi:10.1007/s40279-014-0282-7.
106. Hajam, Y.A.; Rani, R.; Ganie, S.Y.; Sheikh, T.A.; Javaid, D.; Qadri, S.S.; Pramodh, S.; Alsulimani, A.; Alkhanani, M.F.; Harakeh, S.; et al. Oxidative Stress in Human Pathology and Aging: Molecular Mechanisms and Perspectives. *Cells* **2022**, *11*, 552, doi:10.3390/cells11030552.
107. Suzuki, T.; Hara, H. Role of flavonoids in intestinal tight junction regulation. *J. Nutr. Biochem.* **2011**, *22*, 401–408, doi:10.1016/j.jnutbio.2010.08.001.
108. Ran, Y.; Li, F.; Xu, Z.; Zeng, K.; Ming, J. Recent advances in dietary polyphenols (DPs): antioxidant activities, nutrient interactions, delivery systems, and potential applications. *Food Funct.* **2024**, *15*, 10213–10232, doi:10.1039/D4FO02111H.
109. Clifford, M.N. Diet-derived phenols in plasma and tissues and their implications for health. *Planta Med.* **2004**, *70*, 1103–1114, doi:10.1055/s-2004-835835.
110. Kroon, P.A.; Clifford, M.N.; Crozier, A.; Day, A.J.; Donovan, J.L.; Manach, C.; Williamson, G. How should we assess the effects of exposure to dietary polyphenols in vitro? *Am. J. Clin. Nutr.* **2004**, *80*, 15–21, doi:10.1093/ajcn/80.1.15.
111. Kaspar, J.W.; Niture, S.K.; Jaiswal, A.K. Nrf2:INrf2 (Keap1) signaling in oxidative stress. *Free Radic. Biol. Med.* **2009**, *47*, 1304–1309, doi:10.1016/j.freeradbiomed.2009.07.035.
112. Fraga, C.G.; Oteiza, P.I.; Hid, E.J.; Galleano, M. (Poly)phenols and the regulation of NADPH oxidases. *Redox Biol.* **2023**, *67*, 102927, doi:10.1016/j.redox.2023.102927.
113. Di Tommaso, N.; Gasbarrini, A.; Ponziani, F.R. Intestinal Barrier in Human Health and Disease. *IJERPH* **2021**, *18*, 12836, doi:10.3390/ijerph182312836.

114. Gallego-Selles, A.; Galvan-Alvarez, V.; Martinez-Canton, M.; Garcia-Gonzalez, E.; Morales-Alamo, D.; Santana, A.; Gonzalez-Henriquez, J.J.; Dorado, C.; Calbet, J.A.; Martin-Rincon, M. Fast regulation of the NF- κ B signalling pathway in human skeletal muscle revealed by high-intensity exercise and ischaemia at exhaustion: Role of oxygenation and metabolite accumulation. *Redox Biol.* **2022**, *55*, doi:10.1016/j.redox.2022.102398.
115. Volpe-Fix, A.R.; França, E. de; Silvestre, J.C.; Thomatieli-Santos, R.V. The Use of Some Polyphenols in the Modulation of Muscle Damage and Inflammation Induced by Physical Exercise: A Review. *Foods* **2023**, *12*, 916, doi:10.3390/foods12050916.
116. Saha, S.; Buttari, B.; Panieri, E.; Profumo, E.; Saso, L. An Overview of Nrf2 Signaling Pathway and Its Role in Inflammation. *Molecules* **2020**, *25*, 5474, doi:10.3390/molecules25225474.
117. Attiq, A.; Jalil, J.; Husain, K.; Ahmad, W. Raging the War Against Inflammation With Natural Products. *Front. Pharmacol.* **2018**, *9*, doi:10.3389/fphar.2018.00976.
118. Maleki, S.J.; Crespo, J.F.; Cabanillas, B. Anti-inflammatory effects of flavonoids. *Food Chemistry* **2019**, *299*, 125124, doi:10.1016/j.foodchem.2019.125124.
119. Yeung, Y.T.; Aziz, F.; Guerrero-Castilla, A.; Arguelles, S. Signaling Pathways in Inflammation and Anti-inflammatory Therapies. *Curr. Pharm. Des.* **2018**, *24*, 1449–1484, doi:10.2174/1381612824666180327165604.
120. Howatson, G.; McHugh, M.P.; Hill, J.A.; Brouner, J.; Jewell, A.P.; van Someren, K.A.; Shave, R.E.; Howatson, S.A. Influence of tart cherry juice on indices of recovery following marathon running. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2010**, *20*, 843–852, doi:10.1111/j.1600-0838.2009.01005.x.
121. Bell, P.G.; Walshe, I.H.; Davison, G.W.; Stevenson, E.J.; Howatson, G. Recovery facilitation with Montmorency cherries following high-intensity, metabolically challenging exercise. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2015**, *40*, 414–423, doi:10.1139/apnm-2014-0244.
122. Förstermann, U.; Sessa, W.C. Nitric oxide synthases: regulation and function. *Eur. Heart J.* **2012**, *33*, 829–37, 837a–837d, doi:10.1093/eurheartj/ehr304.
123. Alderton, W.K.; Cooper, C.E.; Knowles, R.G. Nitric oxide synthases: structure, function and inhibition. *Biochem. J.* **2001**, *357*, 593–615, doi:10.1042/0264-6021:3570593.
124. Ferrer, P.; Asensi, M.; Priego, S.; Benlloch, M.; Mena, S.; Ortega, A.; Obrador, E.; Esteve, J.M.; Estrela, J.M. Nitric oxide mediates natural polyphenol-induced Bcl-2 down-regulation and activation of cell death in metastatic B16 melanoma. *J. Biol. Chem.* **2007**, *282*, 2880–2890, doi:10.1074/jbc.M605934200.
125. Tschakovsky, M.E.; Joyner, M.J. Nitric oxide and muscle blood flow in exercise. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2008**, *33*, 151–161, doi:10.1139/H07-148.
126. Sandoval-Acuña, C.; Ferreira, J.; Speisky, H. Polyphenols and mitochondria: an update on their increasingly emerging ROS-scavenging independent actions. *Arch. Biochem. Biophys.* **2014**, *559*, 75–90, doi:10.1016/j.abb.2014.05.017.
127. Supinski, G.S.; Schroder, E.A.; Callahan, L.A. Mitochondria and Critical Illness. *Chest* **2020**, *157*, 310–322, doi:10.1016/j.chest.2019.08.2182.
128. Fernando, C.A.; Pangan, A.M.; Cornelison, D.; Segal, S.S. Recovery of blood flow regulation in microvascular resistance networks during regeneration of mouse gluteus maximus muscle. *J. Physiol.* **2019**, *597*, 1401–1417, doi:10.1113/JP277247.
129. Grassi, D.; Desideri, G.; Di Giosia, P.; Feo, M. de; Fellini, E.; Cheli, P.; Ferri, L.; Ferri, C. Tea, flavonoids, and cardiovascular health: endothelial protection. *Am. J. Clin. Nutr.* **2013**, *98*, 1660S–1666S, doi:10.3945/ajcn.113.058313.

130. Cheng, H.; Zhang, D.; Wu, J.; Liu, J.; Zhou, Y.; Tan, Y.; Feng, W.; Peng, C. Interactions between gut microbiota and polyphenols: A mechanistic and metabolomic review. *Phytomedicine* **2023**, *119*, 154979, doi:10.1016/j.phymed.2023.154979.
131. Bundesinstitut für Risikobewertung. Mineralstoffe. Available online: https://www.bfr.bund.de/de/a-z_index/mineralstoffe-5074.html (accessed on 28 October 2024).
132. King, E.S.; Bolling, B.W. Composition, polyphenol bioavailability, and health benefits of aronia berry: a review. *Journal of Food Bioactives* **2020**, 13–30, doi:10.31665/JFB.2020.11235.
133. Morlion, B.J. Wassyer, Elektrolyte und Säure-Basen-Haushalt. In *Ernährungsmedizin: Nach dem neuen Curriculum Ernährungsmedizin der Bundesärztekammer ; 276 Tabellen*, 4., vollst. überarb. und erw. Aufl.; Biesalski, H.-K., Bischoff, S.C., Eds.; Thieme: Stuttgart, 2010; pp 190–198, ISBN 978-3-13-100294-5.
134. McLean, R.M.; Wang, N.X. Potassium. *Adv. Food Nutr. Res.* **2021**, *96*, 89–121, doi:10.1016/bs.afnr.2021.02.013.
135. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Kalium. Available online: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/kalium/> (accessed on 25 October 2024).
136. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Ausgewählte Fragen und Antworten zu Kalium. Kalium: Kalium ist mitverantwortlich für die Aufrechterhaltung des osmotischen Drucks, der Elektrolythomöostase und des Säure-Basen-Haushalts. Available online: <https://www.dge.de/gesunde-ernaehrung/faq/kalium/#c3424> (accessed on 25 October 2024).
137. Lindinger, M.I.; Cairns, S.P. Regulation of muscle potassium: exercise performance, fatigue and health implications. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2021**, *121*, 721–748, doi:10.1007/s00421-020-04546-8.
138. Konopka, P. *Sporternährung: Grundlagen, Ernährungsstrategien, Leistungsförderung*, 17. Auflage; BLV: München, 2018, ISBN 978-3-8354-1838-7.
139. Weaver, C.M. Potassium and health. *Adv. Nutr.* **2013**, *4*, 368S–77S, doi:10.3945/an.112.003533.
140. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Ausgewählte Fragen und Antworten zu Calcium: Calcium. Available online: <https://www.dge.de/gesunde-ernaehrung/faq/calcium/> (accessed on 28 October 2024).
141. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Calcium (accessed on 28 October 2024).
142. Bakaloudi, D.R.; Halloran, A.; Rippin, H.L.; Oikonomidou, A.C.; Dardavesis, T.I.; Williams, J.; Wickramasinghe, K.; Breda, J.; Chourdakis, M. Intake and adequacy of the vegan diet. A systematic review of the evidence. *Clinical Nutrition* **2021**, *40*, 3503–3521, doi:10.1016/j.clnu.2020.11.035.
143. Beck, K.L.; Hurst, P.R. von; O'Brien, W.J.; Badenhorst, C.E. Micronutrients and athletic performance: A review. *Food Chem. Toxicol.* **2021**, *158*, 112618, doi:10.1016/j.fct.2021.112618.
144. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Magnesium. Available online: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/magnesium> (accessed on 28 October 2024).

145. Tarsitano, M.G.; Quinzi, F.; Folino, K.; Greco, F.; Oranges, F.P.; Cerulli, C.; Emerenziani, G.P. Effects of magnesium supplementation on muscle soreness in different type of physical activities: a systematic review. *J. Transl. Med.* **2024**, *22*, 629, doi:10.1186/s12967-024-05434-x.
146. *Biologie Oberstufe: Gesamtband*; Weber, U.; Bleuel, H.-S., Eds., 2. Aufl., 1. Dr., westl. Bundesländer, [Neubearb. für das G8]; Cornelsen: Berlin, 2009, ISBN 978-3-464-17183-7.
147. Köhrle J., Schomburg L., Schürmann K. Spurenelmente und Mineralstoffe. In *Ernährungsmedizin: Nach dem neuen Curriculum Ernährungsmedizin der Bundesärztekammer ; 276 Tabellen*, 4., vollst. überarb. und erw. Aufl.; Biesalski, H.-K., Bischoff, S.C., Eds.; Thieme: Stuttgart, 2010; pp 199–223, ISBN 978-3-13-100294-5.
148. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Eisen. Available online: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/eisen/> (accessed on 30 October 2024).
149. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Kupfer, Mangan, Chrom, Molybdän. Available online: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/kupfer-mangan-chrom-molybdaen/> (accessed on 30 October 2024).
150. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Zink. Available online: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/zink/> (accessed on 30 October 2024).
151. Harland, B.F.; Oberleas, D. Phytate in foods. *World Rev. Nutr. Diet.* **1987**, *52*, 235–259, doi:10.1159/000415199.
152. Jarosz, M.; Olbert, M.; Wyszogrodzka, G.; Młyniec, K.; Librowski, T. Antioxidant and anti-inflammatory effects of zinc. Zinc-dependent NF-κB signaling. *Inflammopharmacology* **2017**, *25*, 11–24, doi:10.1007/s10787-017-0309-4.
153. Carlsohn A, Braun H, Großhauser M, König D, Lampen A, Mosler S, Nieß A, Oberritter H, Schäbenthal K, Schek A, Stehle P, Virmani K, Ziegenhagen R, Heseker H. Minerals and vitamins in sports nutrition: Position of the working group sports nutrition of the German Nutrition Society (DGE). *Ernährungs Umschau* **2019**, *66*, 250–257.
154. Hastka, J.; Metzgeroth Georgia; Gattermann, N. Eisenmangel und Eisenmangelanämie. Available online: <https://www.onkopedia.com/de/onkopedia/guidelines/eisenmangel-und-eisenmangelanaemie/@@guideline/html/index.html> (accessed on 30 October 2024).
155. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Niacin. Available online: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/niacin/> (accessed on 30 October 2024).
156. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Pantothensäure. Available online: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/pantothensaeure/> (accessed on 30 October 2024).
157. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Riboflavin (Vitamin B₂). Available online: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/riboflavin/> (accessed on 30 October 2024).
158. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Thiamin (Vitamin B₁). Available online: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/thiamin/> (accessed on 30 October 2024).
159. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Vitamin B6. Available online: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/vitamin-b6/> (accessed on 30 October 2024).

160. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Folat. Available online: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/folat/> (accessed on 30 October 2024).
161. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Referenzwert Vitamin C. Available online: <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/vitamin-c/> (accessed on 30 October 2024).
162. Shaik-Dasthagirisahab, Y.B.; Varvara, G.; Murmura, G.; Saggini, A.; Caraffa, A.; Antinolfi, P.; Tete', S.; Tripodi, D.; Conti, F.; Cianchetti, E.; et al. Role of vitamins D, E and C in immunity and inflammation. *J. Biol. Regul. Homeost. Agents* **2013**, *27*, 291–295.
163. Rogers, D.R.; Lawlor, D.J.; Moeller, J.L. Vitamin C Supplementation and Athletic Performance: A Review. *Curr. Sports Med. Rep.* **2023**, *22*, 255–259, doi:10.1249/JSR.0000000000001083.
164. Lee, M.-C.; Hsu, Y.-J.; Shen, S.-Y.; Ho, C.-S.; Huang, C.-C. A functional evaluation of anti-fatigue and exercise performance improvement following vitamin B complex supplementation in healthy humans, a randomized double-blind trial. *Int. J. Med. Sci.* **2023**, *20*, 1272–1281, doi:10.7150/ijms.86738.
165. Hanna, M.; Jaqua, E.; van Nguyen; Clay, J. B Vitamins: Functions and Uses in Medicine. *Perm. J.* **2022**, *26*, 89–97, doi:10.7812/TPP/21.204.
166. Zhang, J.; Chen, J.; Sui, X.; Drenowatz, C.; Wang, Q. Association between Different Types of Exercise and Intake of Nutrients including Carbohydrate, Fat, Protein, and B Vitamins in Young Adults. *Nutrients* **2023**, *15*, doi:10.3390/nu15040806.
167. Rahman, S.; Baumgartner, M. B Vitamins: Small molecules, big effects. *J. Inherit. Metab. Dis.* **2019**, *42*, 579–580, doi:10.1002/jimd.12127.
168. Zaoui, A.; Abdelghani, A.; Ben Salem, H.; Ouane, W.; Hayouni, A.; Khachnaoui, F.; Rejeb, N.; Benzarti, M. Early-onset severe isoniazid-induced motor-dominant neuropathy: a case report. *East. Mediterr. Health J.* **2012**, *18*, 298–299, doi:10.26719/2012.18.3.298.
169. Hin, H.; Clarke, R.; Sherliker, P.; Atoyebi, W.; Emmens, K.; Birks, J.; Schneede, J.; Ueland, P.M.; Nexø, E.; Scott, J.; et al. Clinical relevance of low serum vitamin B12 concentrations in older people: the Banbury B12 study. *Age Ageing* **2006**, *35*, 416–422, doi:10.1093/ageing/afl033.
170. Shulpekova, Y.; Nechaev, V.; Kardasheva, S.; Sedova, A.; Kurbatova, A.; Bueverova, E.; Kopylov, A.; Malsagova, K.; Dlamini, J.C.; Ivashkin, V. The Concept of Folic Acid in Health and Disease. *Molecules* **2021**, *26*, doi:10.3390/molecules26123731.
171. Rossi, I.; Mignogna, C.; Del Rio, D.; Mena, P. Health effects of 100% fruit and vegetable juices: evidence from human subject intervention studies. *Nutr. Res. Rev.* **2024**, *37*, 194–238, doi:10.1017/S095442242300015X.
172. Ravn-Haren, G.; Dragsted, L.O.; Buch-Andersen, T.; Jensen, E.N.; Jensen, R.I.; Németh-Balogh, M.; Paulovicsová, B.; Bergström, A.; Wilcks, A.; Licht, T.R.; et al. Intake of whole apples or clear apple juice has contrasting effects on plasma lipids in healthy volunteers. *Eur. J. Nutr.* **2013**, *52*, 1875–1889, doi:10.1007/s00394-012-0489-z.
173. Guo, C.; Wei, J.; Yang, J.; Xu, J.; Pang, W.; Jiang, Y. Pomegranate juice is potentially better than apple juice in improving antioxidant function in elderly subjects. *Nutr. Res.* **2008**, *28*, 72–77, doi:10.1016/j.nutres.2007.12.001.
174. Ko, S.-H.; Choi, S.-W.; Ye, S.-K.; Cho, B.-L.; Kim, H.-S.; Chung, M.-H. Comparison of the antioxidant activities of nine different fruits in human plasma. *J. Med. Food* **2005**, *8*, 41–46, doi:10.1089/jmf.2005.8.41.

175. Barth, S.W.; Koch, T.C.L.; Watzl, B.; Dietrich, H.; Will, F.; Bub, A. Moderate effects of apple juice consumption on obesity-related markers in obese men: impact of diet-gene interaction on body fat content. *Eur. J. Nutr.* **2012**, *51*, 841–850, doi:10.1007/s00394-011-0264-6.
176. Hagl, S.; Deusser, H.; Soyalan, B.; Janzowski, C.; Will, F.; Dietrich, H.; Albert, F.W.; Rohner, S.; Richling, E. Colonic availability of polyphenols and D-(-)-quinic acid after apple smoothie consumption. *Mol. Nutr. Food Res.* **2011**, *55*, 368–377, doi:10.1002/mnfr.201000252.
177. Trošt, K.; Ulaszewska, M.M.; Stanstrup, J.; Albanese, D.; Filippo, C. de; Tuohy, K.M.; Natella, F.; Scaccini, C.; Mattivi, F. Host: Microbiome co-metabolic processing of dietary polyphenols - An acute, single blinded, cross-over study with different doses of apple polyphenols in healthy subjects. *Food Res. Int.* **2018**, *112*, 108–128, doi:10.1016/j.foodres.2018.06.016.
178. Régnier, M.; van Hul, M.; Knauf, C.; Cani, P.D. Gut microbiome, endocrine control of gut barrier function and metabolic diseases. *J. Endocrinol.* **2021**, *248*, R67-R82, doi:10.1530/JOE-20-0473.
179. Yamane, T.; Kozuka, M.; Wada-Yoneta, M.; Sakamoto, T.; Nakagaki, T.; Nakano, Y.; Ohkubo, I. Aronia juice suppresses the elevation of postprandial blood glucose levels in adult healthy Japanese. *Clinical Nutrition Experimental* **2017**, *12*, 20–26, doi:10.1016/j.clnex.2017.01.002.
180. Simeonov, S.B.; Botushanov, N.P.; Karahanian, E.B.; Pavlova, M.B.; Husianitis, H.K.; Troev, D.M. Effects of Aronia melanocarpa juice as part of the dietary regimen in patients with diabetes mellitus. *Folia Med. (Plovdiv)* **2002**, *44*, 20–23.
181. Milutinovic, M.; Velickovic Radovanovic, R.; Savikin, K.; Radenkovic, S.; Arvandi, M.; Pesic, M.; Kostic, M.; Miladinovic, B.; Brankovic, S.; Kitic, D. Chokeberry juice supplementation in type 2 diabetic patients - impact on health status. *J. Appl. Biomed.* **2019**, *17*, 218–224, doi:10.32725/jab.2019.020.
182. Loo, B.-M.; Erlund, I.; Koli, R.; Puukka, P.; Hellström, J.; Wähälä, K.; Mattila, P.; Julia, A. Consumption of chokeberry (*Aronia mitschurinii*) products modestly lowered blood pressure and reduced low-grade inflammation in patients with mildly elevated blood pressure. *Nutr. Res.* **2016**, *36*, 1222–1230, doi:10.1016/j.nutres.2016.09.005.
183. Pokimica, B.; García-Conesa, M.-T.; Zec, M.; Debeljak-Martačić, J.; Ranković, S.; Vidović, N.; Petrović-Oggiano, G.; Konić-Ristić, A.; Glibetić, M. Chokeberry Juice Containing Polyphenols Does Not Affect Cholesterol or Blood Pressure but Modifies the Composition of Plasma Phospholipids Fatty Acids in Individuals at Cardiovascular Risk. *Nutrients* **2019**, *11*, doi:10.3390/nu11040850.
184. Olechno, E.; Puścion-Jakubik, A.; Socha, K.; Pipino, C.; Zujko, M.E. Consumption of Chokeberry Bio-Products Improves Specific Metabolic Parameters and Increases the Plasma Antioxidant Status. *Antioxidans (Basel)* **2024**, *13*, doi:10.3390/antiox13060699.
185. Sidor, A.; Gramza-Michałowska, A. Black Chokeberry *Aronia melanocarpa* L.-A Qualitative Composition, Phenolic Profile and Antioxidant Potential. *Molecules* **2019**, *24*, doi:10.3390/molecules24203710.
186. Park, Y.K.; Kim, J.-S.; Kang, M.-H. Concord grape juice supplementation reduces blood pressure in Korean hypertensive men: double-blind, placebo controlled intervention trial. *Biofactors* **2004**, *22*, 145–147, doi:10.1002/biof.5520220128.
187. Park, Y.K.; Lee, S.H.; Park, E.; Kim, J.-S.; Kang, M.-H. Changes in antioxidant status, blood pressure, and lymphocyte DNA damage from grape juice supplementation. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **2009**, *1171*, 385–390, doi:10.1111/j.1749-6632.2009.04907.x.

188. Coimbra, S.R.; Lage, S.H.; Brandizzi, L.; Yoshida, V.; Da Luz, P.L. The action of red wine and purple grape juice on vascular reactivity is independent of plasma lipids in hypercholesterolemic patients. *Braz. J. Med. Biol. Res.* **2005**, *38*, 1339–1347, doi:10.1590/s0100-879x2005000900008.
189. Toscano, L.T.; Tavares, R.L.; Toscano, L.T.; Da Silva, C.S.O.; Almeida, A.E.M. de; Biasoto, A.C.T.; Da Gonçalves, M.C.R.; Silva, A.S. Potential ergogenic activity of grape juice in runners. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2015**, *40*, 899–906, doi:10.1139/apnm-2015-0152.
190. Bishop, D.; Jenkins, D.G.; Mackinnon, L.T. The relationship between plasma lactate parameters, Wpeak and 1-h cycling performance in women. *Med. Sci. Sports Exerc.* **1998**, *30*, 1270–1275, doi:10.1097/00005768-199808000-00014.
191. Esefeld, K.; Kress, S.; Behrens, M.; Zimmer, P.; Stumvoll, M.; Thurm, U.; Gehr, B.; Halle, M.; Brinkmann, C. Diabetes, Sport und Bewegung. *Diabetologie und Stoffwechsel* **2022**, *17*, S301–S310, doi:10.1055/a-1901-0690.
192. Staltner, R.; Sánchez, V.; Bergheim, I.; Baumann, A. Acute Intake of Sucrose but Not of the Intense Sweetener Sucralose Is Associated with Post-Prandial Endotoxemia in Healthy Young Adults-A Randomized Controlled Trial. *Nutrients* **2023**, *15*, doi:10.3390/nu15184038.
193. Gill, S.K.; Teixeira, A.; Rama, L.; Prestes, J.; Rosado, F.; Hankey, J.; Scheer, V.; Hemmings, K.; Ansley-Robson, P.; Costa, R.J.S. Circulatory endotoxin concentration and cytokine profile in response to exertional-heat stress during a multi-stage ultra-marathon competition. *Exerc. Immunol. Rev.* **2015**, *21*, 114–128.
194. Hill, G.W.; Gillum, T.L.; Lee, B.J.; Romano, P.A.; Schall, Z.J.; Hamilton, A.M.; Kuennen, M.R. Prolonged treadmill running in normobaric hypoxia causes gastrointestinal barrier permeability and elevates circulating levels of pro- and anti-inflammatory cytokines. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2020**, *45*, 376–386, doi:10.1139/apnm-2019-0378.
195. Karhu, E.; Forsgård, R.A.; Alanko, L.; Alfthan, H.; Pussinen, P.; Hämäläinen, E.; Korpela, R. Exercise and gastrointestinal symptoms: running-induced changes in intestinal permeability and markers of gastrointestinal function in asymptomatic and symptomatic runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2017**, *117*, 2519–2526, doi:10.1007/s00421-017-3739-1.
196. Sessions, J.; Bourbeau, K.; Rosinski, M.; Szczygiel, T.; Nelson, R.; Sharma, N.; Zuhl, M. Carbohydrate gel ingestion during running in the heat on markers of gastrointestinal distress. *Eur. J. Sport Sci.* **2016**, *16*, 1064–1072, doi:10.1080/17461391.2016.1140231.
197. Deutsches Nationalkomitee im Internationalen Milchwirtschaftsverband – IDF; Verband der Deutschen Milchwirtschaft e. V. – VDM. IDF Factsheet “The importance of dairy (food) matrix in the evaluation of the nutritional quality and health effects of food” (accessed on 4 November 2024).
198. Moszak, M.; Szulińska, M.; Bogdański, P. You Are What You Eat-The Relationship between Diet, Microbiota, and Metabolic Disorders-A Review. *Nutrients* **2020**, *12*, doi:10.3390/nu12041096.
199. Kelly, C.J.; Zheng, L.; Campbell, E.L.; Saeedi, B.; Scholz, C.C.; Bayless, A.J.; Wilson, K.E.; Glover, L.E.; Kominsky, D.J.; Magnuson, A.; et al. Crosstalk between Microbiota-Derived Short-Chain Fatty Acids and Intestinal Epithelial HIF Augments Tissue Barrier Function. *Cell Host Microbe* **2015**, *17*, 662–671, doi:10.1016/j.chom.2015.03.005.
200. Saeedi, B.J.; Kao, D.J.; Kitzenberg, D.A.; Dobrinskikh, E.; Schwisow, K.D.; Masterson, J.C.; Kendrick, A.A.; Kelly, C.J.; Bayless, A.J.; Kominsky, D.J.; et al. HIF-dependent regulation of claudin-1 is central to intestinal epithelial tight junction integrity. *Mol. Biol. Cell* **2015**, *26*, 2252–2262, doi:10.1091/mbc.E14-07-1194.

201. Miao, T.; Song, G.; Yang, J. Protective Effect of Apple Polyphenols on H₂O₂-Induced Oxidative Stress Damage in Human Colon Adenocarcinoma Caco-2 Cells. *Chem. Pharm. Bull. (Tokyo)* **2023**, *71*, 262–268, doi:10.1248/cpb.c22-00348.
202. Koivula, T.; Lempiäinen, S.; Rinne, P.; Rannikko, J.H.; Hollmén, M.; Sundberg, C.J.; Rundqvist, H.; Minn, H.; Heinonen, I. The effect of acute exercise on circulating immune cells in newly diagnosed breast cancer patients. *Sci. Rep.* **2023**, *13*, 6561, doi:10.1038/s41598-023-33432-4.
203. Sand, K.L.; Flatebo, T.; Andersen, M.B.; Maghazachi, A.A. Effects of exercise on leukocytosis and blood hemostasis in 800 healthy young females and males. *World J. Exp. Med.* **2013**, *3*, 11–20, doi:10.5493/wjem.v3.i1.11.
204. Biondi, R.; Tassi, C.; Rossi, R.; Benedetti, C.; Ferranti, C.; Paolocci, N.; Parisse, I.; Bellis, F. de; Capodicasa, E. Changes in plasma level of human leukocyte elastase during leukocytosis from physical effort. *Immunopharmacol. Immunotoxicol.* **2003**, *25*, 385–396, doi:10.1081/iph-120024506.
205. Bowtell, J.L.; Sumners, D.P.; Dyer, A.; Fox, P.; Mileva, K.N. Montmorency cherry juice reduces muscle damage caused by intensive strength exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2011**, *43*, 1544–1551, doi:10.1249/MSS.0b013e31820e5adc.
206. Brancaccio, P.; Maffulli, N.; Buonauro, R.; Limongelli, F.M. Serum enzyme monitoring in sports medicine. *Clin. Sports Med.* **2008**, *27*, 1-18, vii, doi:10.1016/j.csm.2007.09.005.
207. Owens, D.J.; Twist, C.; Copley, J.N.; Howatson, G.; Close, G.L. Exercise-induced muscle damage: What is it, what causes it and what are the nutritional solutions? *Eur. J. Sport Sci.* **2019**, *19*, 71–85, doi:10.1080/17461391.2018.1505957.
208. Tanner, E.A.; Gary, M.A.; Davis, A.A.; Michalik, S.; McFarlin, B.K. Alterations in Systemic Inflammatory Response Following a Half-Marathon Race with a Combined Curcumin and Pomegranate Supplement: A Feasibility Study. *J. Diet. Suppl.* **2021**, *18*, 461–477, doi:10.1080/19390211.2020.1786206.
209. Bachi, A.L.L.; Sierra, A.P.R.; Rios, F.J.O.; Gonçalves, D.A.; Ghorayeb, N.; Abud, R.L.; Victorino, A.B.; Dos Santos, J.M.B.; Kiss, M.A.D.P.; Pithon-Curi, T.C.; et al. Athletes with higher VO₂max present reduced oxLDL after a marathon race. *BMJ Open Sport Exerc. Med.* **2015**, *1*, doi:10.1136/bmjsem-2015-000014.
210. Wang, J.-S.; Lee, T.; Chow, S.-E. Role of exercise intensities in oxidized low-density lipoprotein-mediated redox status of monocyte in men. *J. Appl. Physiol. (1985)* **2006**, *101*, 740–744, doi:10.1152/jappphysiol.00144.2006.
211. Powers, S.K.; Goldstein, E.; Schrager, M.; Ji, L.L. Exercise Training and Skeletal Muscle Antioxidant Enzymes: An Update. *Antioxidans (Basel)* **2022**, *12*, doi:10.3390/antiox12010039.
212. Isenmann, E.; Trittel, L.; Diel, P. The effects of alpha lipoic acid on muscle strength recovery after a single and a short-term chronic supplementation - a study in healthy well-trained individuals after intensive resistance and endurance training. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2020**, *17*, 61, doi:10.1186/s12970-020-00389-y.
213. Hooper, D.R.; Orange, T.; Gruber, M.T.; Darakjian, A.A.; Conway, K.L.; Hausenblas, H.A. Broad Spectrum Polyphenol Supplementation from Tart Cherry Extract on Markers of Recovery from Intense Resistance Exercise. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2021**, *18*, 47, doi:10.1186/s12970-021-00449-x.
214. Yang, L.; Chen, X.; Chen, D.; Yu, B.; He, J.; Luo, Y.; Zheng, P.; Chen, H.; Yan, H.; Huang, Z. Effects of protocatechuic acid on antioxidant capacity, mitochondrial biogenesis and skeletal muscle fiber transformation. *J. Nutr. Biochem.* **2023**, *116*, 109327, doi:10.1016/j.jnutbio.2023.109327.

215. Le Sayec, M.; Xu, Y.; Laiola, M.; Gallego, F.A.; Katsikioti, D.; Durbidge, C.; Kivisild, U.; Armes, S.; Lecomte, M.; Faça-Berthon, P.; et al. The effects of Aronia berry (poly)phenol supplementation on arterial function and the gut microbiome in middle aged men and women: Results from a randomized controlled trial. *Clin. Nutr.* **2022**, *41*, 2549–2561, doi:10.1016/j.clnu.2022.08.024.
216. Townsend, R.R.; Wilkinson, I.B.; Schiffrin, E.L.; Avolio, A.P.; Chirinos, J.A.; Cockcroft, J.R.; Heffernan, K.S.; Lakatta, E.G.; McEniery, C.M.; Mitchell, G.F.; et al. Recommendations for Improving and Standardizing Vascular Research on Arterial Stiffness: A Scientific Statement From the American Heart Association. *Hypertension* **2015**, *66*, 698–722, doi:10.1161/HYP.0000000000000033.
217. Garcia-Mantrana, I.; Selma-Royo, M.; Alcantara, C.; Collado, M.C. Shifts on Gut Microbiota Associated to Mediterranean Diet Adherence and Specific Dietary Intakes on General Adult Population. *Front. Microbiol.* **2018**, *9*, 890, doi:10.3389/fmicb.2018.00890.
218. Bruyne, T. de; Steenput, B.; Roth, L.; Meyer, G.R.Y. de; Santos, C.N.D.; Valentová, K.; Dambrova, M.; Hermans, N. Dietary Polyphenols Targeting Arterial Stiffness: Interplay of Contributing Mechanisms and Gut Microbiome-Related Metabolism. *Nutrients* **2019**, *11*, doi:10.3390/nu11030578.
219. Li, J.; Zhao, F.; Wang, Y.; Chen, J.; Tao, J.; Tian, G.; Wu, S.; Liu, W.; Cui, Q.; Geng, B.; et al. Gut microbiota dysbiosis contributes to the development of hypertension. *Microbiome* **2017**, *5*, 14, doi:10.1186/s40168-016-0222-x.
220. Lopez-Siles, M.; Duncan, S.H.; Garcia-Gil, L.J.; Martinez-Medina, M. Faecalibacterium prausnitzii: from microbiology to diagnostics and prognostics. *ISME J.* **2017**, *11*, 841–852, doi:10.1038/ismej.2016.176.
221. Vitale, M.; Giacco, R.; Laiola, M.; Della Pepa, G.; Luongo, D.; Mangione, A.; Salamone, D.; Vitaglione, P.; Ercolini, D.; Rivellesse, A.A. Acute and chronic improvement in postprandial glucose metabolism by a diet resembling the traditional Mediterranean dietary pattern: Can SCFAs play a role? *Clin. Nutr.* **2021**, *40*, 428–437, doi:10.1016/j.clnu.2020.05.025.
222. Wang, H.-Y.; Wang, H.; Wang, J.-H.; Wang, Q.; Ma, Q.-F.; Chen, Y.-Y. Protocatechuic Acid Inhibits Inflammatory Responses in LPS-Stimulated BV2 Microglia via NF- κ B and MAPKs Signaling Pathways. *Neurochem. Res.* **2015**, *40*, 1655–1660, doi:10.1007/s11064-015-1646-6.
223. Castro, H.; Raij, L. Potassium in hypertension and cardiovascular disease. *Semin. Nephrol.* **2013**, *33*, 277–289, doi:10.1016/j.semnephrol.2013.04.008.
224. Makanae, Y.; Ato, S.; Kido, K.; Fujita, S. Dietary Aronia melanocarpa extract enhances mTORC1 signaling, but has no effect on protein synthesis and protein breakdown-related signaling, in response to resistance exercise in rat skeletal muscle. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2019**, *16*, 60, doi:10.1186/s12970-019-0328-1.
225. Yun, C.-E.; So, H.-K.; Vuong, T.A.; Na, M.W.; Anh, S.; Lee, H.-K.; Kim, K.H.; Kang, J.-S.; Bae, G.-U.; Lee, S.-J. Aronia Upregulates Myogenic Differentiation and Augments Muscle Mass and Function Through Muscle Metabolism. *Front. Nutr.* **2021**, *8*, 753643, doi:10.3389/fnut.2021.753643.
226. Garcia-Alonso, A.; Sánchez-Paniagua López, M.; Manzanares-Palenzuela, C.L.; Redondo-Cuenca, A.; López-Ruiz, B. Edible plant by-products as source of polyphenols: prebiotic effect and analytical methods. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2023**, *63*, 10814–10835, doi:10.1080/10408398.2022.2084028.

227. Ma, S.; Kim, C.; Neilson, A.P.; Griffin, L.E.; Peck, G.M.; O'Keefe, S.F.; Stewart, A.C. Comparison of Common Analytical Methods for the Quantification of Total Polyphenols and Flavanols in Fruit Juices and Ciders. *J. Food Sci.* **2019**, *84*, 2147–2158, doi:10.1111/1750-3841.14713.
228. Casey, J.L.; Meijer, J.L.; IglayRager, H.B.; Ball, S.C.; Han-Markey, T.L.; Braun, T.M.; Burant, C.F.; Peterson, K.E. Comparing Self-Reported Dietary Intake to Provided Diet during a Randomized Controlled Feeding Intervention: A Pilot Study. *Dietetics (Basel)* **2023**, *2*, 334–343, doi:10.3390/dietetics2040024.
229. Castro-Quezada, I.; Ruano-Rodríguez, C.; Ribas-Barba, L.; Serra-Majem, L. Misreporting in nutritional surveys: methodological implications. *Nutr. Hosp.* **2015**, *31 Suppl 3*, 119–127, doi:10.3305/nh.2015.31.sup3.8760.
230. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. TAhRget (2023-2024): Charakterisierung ernährungsbedingter, AhR-abhängiger Immunantworten in gesunden Personen (accessed on 8 November 2024).
231. Dolci, F.; Kilding, A.E.; Chivers, P.; Piggott, B.; Hart, N.H. High-Intensity Interval Training Shock Microcycle for Enhancing Sport Performance: A Brief Review. *J. Strength Cond. Res.* **2020**, *34*, 1188–1196, doi:10.1519/JSC.0000000000003499.
232. Chtara, M.; Chamari, K.; Chaouachi, M.; Chaouachi, A.; Koubaa, D.; Feki, Y.; Millet, G.P.; Amri, M. Effects of intra-session concurrent endurance and strength training sequence on aerobic performance and capacity. *Br. J. Sports Med.* **2005**, *39*, 555–560, doi:10.1136/bjsm.2004.015248.
233. Rønnestad, B.R.; Hansen, J.; Vegge, G.; Tønnessen, E.; Slettaløkken, G. Short intervals induce superior training adaptations compared with long intervals in cyclists - an effort-matched approach. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2015**, *25*, 143–151, doi:10.1111/sms.12165.
234. Seiler, S.; Jørranson, K.; Olesen, B.V.; Hetlelid, K.J. Adaptations to aerobic interval training: interactive effects of exercise intensity and total work duration. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2013**, *23*, 74–83, doi:10.1111/j.1600-0838.2011.01351.x.
235. Jeacocke, N.A.; Burke, L.M. Methods to standardize dietary intake before performance testing. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2010**, *20*, 87–103, doi:10.1123/ijsnem.20.2.87.
236. Leite, C.D.F.C.; Zovico, P.V.C.; Rica, R.L.; Barros, B.M.; Machado, A.F.; Evangelista, A.L.; Leite, R.D.; Barauna, V.G.; Maia, A.F.; Bocalini, D.S. Exercise-Induced Muscle Damage after a High-Intensity Interval Exercise Session: Systematic Review. *IJERPH* **2023**, *20*, doi:10.3390/ijerph20227082.
237. Michailidis, Y.; Jamurtas, A.Z.; Nikolaidis, M.G.; Fatouros, I.G.; Koutedakis, Y.; Papassotiropoulos, I.; Kouretas, D. Sampling time is crucial for measurement of aerobic exercise-induced oxidative stress. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2007**, *39*, 1107–1113, doi:10.1249/01.mss.0b013e318053e7ba.
238. Close, G.L.; Hamilton, D.L.; Philp, A.; Burke, L.M.; Morton, J.P. New strategies in sport nutrition to increase exercise performance. *Free Radic. Biol. Med.* **2016**, *98*, 144–158, doi:10.1016/j.freeradbiomed.2016.01.016.
239. Garcia-Ramos, A.; Jaric, S. Two-Point Method: A Quick and Fatigue-Free Procedure for Assessment of Muscle Mechanical Capacities and the 1 Repetition Maximum. *Strength & Conditioning Journal* **2018**, *40*, 54–66, doi:10.1519/SSC.0000000000000359.
240. Held, S.; Rappelt, L.; Deutsch, J.-P.; Donath, L. Valid and Reliable Barbell Velocity Estimation Using an Inertial Measurement Unit. *IJERPH* **2021**, *18*, doi:10.3390/ijerph18179170.

241. Bosy-Westphal, A.; Schautz, B.; Later, W.; Kehayias, J.J.; Gallagher, D.; Müller, M.J. What makes a BIA equation unique? Validity of eight-electrode multifrequency BIA to estimate body composition in a healthy adult population. *Eur. J. Clin. Nutr.* **2013**, *67 Suppl 1*, S14–21, doi:10.1038/ejcn.2012.160.
242. Dittmar, M.; Reber, H. Validation of different bioimpedance analyzers for predicting cell mass against whole-body counting of potassium (40K) as a reference method. *Am. J. Hum. Biol.* **2004**, *16*, 697–703, doi:10.1002/ajhb.20078.
243. Miyatani, M.; Yang, P.; Thomas, S.; Craven, B.C.; Oh, P. Bioelectrical impedance and dual-energy x-ray absorptiometry assessments of changes in body composition following exercise in patients with type 2 diabetes mellitus. *J. Obes.* **2012**, *2012*, 953060, doi:10.1155/2012/953060.
244. Luy, S.C.; Dampil, O.A. Comparison of the Harris-Benedict Equation, Bioelectrical Impedance Analysis, and Indirect Calorimetry for Measurement of Basal Metabolic Rate among Adult Obese Filipino Patients with Prediabetes or Type 2 Diabetes Mellitus. *J. ASEAN Fed. Endocr. Soc.* **2018**, *33*, 152–159, doi:10.15605/jafes.033.02.07.
245. Bioelectrical impedance analysis in body composition measurement: National Institutes of Health Technology Assessment Conference Statement. *Am. J. Clin. Nutr.* **1996**, *64*, 524S–532S, doi:10.1093/ajcn/64.3.524S.
246. Sergi, G.; Rui, M. de; Stubbs, B.; Veronese, N.; Manzato, E. Measurement of lean body mass using bioelectrical impedance analysis: a consideration of the pros and cons. *Aging Clin. Exp. Res.* **2017**, *29*, 591–597, doi:10.1007/s40520-016-0622-6.
247. Freepik. Freepik. Available online: <https://de.freepik.com> (accessed on 11 December 2024).
248. Smart SERVIER MEDICAL ART. Blood test – Tube. Available online: https://smart.servier.com/smart_image/regular-tube/ (accessed on 12 December 2024).
249. Smart SERVIER MEDICAL ART. Intestinal villi. Available online: https://smart.servier.com/smart_image/intestinal-villi/ (accessed on 12 December 2024).

8 Anhang

8.1 Messparameter und Inhaltsstoffe der Studiengetränke

Tabelle A1 Messparameter und Inhaltsstoffe der naturtrüben Apfelsaftschorle (60% Fruchtsaftgehalt) und des Placebos

Parameter	Apfelsaftschorle (60% Fruchtsaftgehalt)	Placebo
Brix korr.	6,72	6,72
Glukose [g/L]	13,4	13,4
Fruktose [g/L]	35,0	35,0
Saccharose [g/L]	9,1	9,1
Gesamtzuckergehalt [g/L]	57,5	57,5
Sorbit [g/L]	2,20	2,20
L-Äpfelsäure [g/L]	3,36	3,36
Kalium [g/L]	0,59	0,59
Apfelaroma 4714 [ml/L]	---	4,70
Polyphenole gesamt [mg/L]	554,4	---

Tabelle A2 Messparameter und Inhaltsstoffe des Aronia-Mischfruchtsafts und des Placebos

Parameter	Aronia- Mischfruchtsaft Charge 1	Aronia- Mischfruchtsaft Charge 2	Aronia- Mischfruchtsaft Charge 3	Mittelwert	Placebo Charge 1	Placebo Charge 2	Mittelwert
Dichte [kg/L]	1,0614	1,0613	1,0614	1,0614	1,04867	1,04867	1,04867
Brix [°Bx]	15,22	15,45	15,4	15,36	12,0	12,1	12,05
Leitwert	2380	2260	2380	2340	2060	2060	2060
Extrakt [g/L]	159,6	159	159,6	159,4	126,3	126,3	126,3
Zuckerfreier Extrakt [g/L]	40,7	41,9	40,7	41,1	18,2	18,2	18,2
Zucker [g/L]	118,9	117,1	118,9	118,3	108,1	108,1	108,1
Glukose [g/L]	58,4	56,3	58,4	57,7	52,4	52,4	52,4
Fruktose [g/L]	60,6	58,5	60,6	59,9	55,7	55,7	55,7
Saccharose [g/L]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Glukose/Fruktose-Ratio	0,96	0,96	0,96	0,96	0,94	0,94	0,94
pH-Wert	3,42	3,34	3,42	3,39	3,29	3,29	3,29
Gesamtsäure pH 8,1 cal. Cs [g/L]	7,24	7,03	7,9	7,39	6,47	6,6	6,54
Ascorbinsäure [mg/L]	5	7	<15	k.A.	n.n.	n.n.	n.n.
Flüchtige Säuren [g/L]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02
L-Äpfelsäure [g/L]	2,91	2,86	2,91	2,89	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Zitronensäure [g/L]	4,45	4,85	4,45	4,58	6,76	6,76	6,76
Polyphenole gesamt [mg/L]	4052	4159	4100	4103,67	91	91	91
Zink [mg/L]	0,6	0,6	0,6	0,6	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen [mg/L]	1,5	1,4	1,5	1,47	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Kalium [mg/L]	1429	1467	1500	1465,33	1498	1500	1499
Calcium [mg/L]	158	164	158	160	< 1	< 1	< 1
Magnesium [mg/L]	97	94	97	96	< 1	< 1	< 1
Kupfer [mg/L]	0,1	0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

8.2 Original-Publikationen

Article

Effect of Sugar- and Polyphenol-Rich, Diluted Cloudy Apple Juice on the Intestinal Barrier after Moderate Endurance Exercise and in Ultra-Marathon Runners

Sarah Valder ^{1,†}, Raphaela Staltner ^{2,†}, Daniel Alexander Bizjak ³ , Tuba Esatbeyoglu ⁴ , Volker Herdegen ⁵, Magdalena Köpsel ⁴ , Tihomir Kostov ¹ , Ina Bergheim ² and Patrick Diel ^{1,*}

¹ Department of Molecular and Cellular Sports Medicine, German Sports University Cologne, 50933 Cologne, Germany; valder@heim-spiele.com (S.V.); t.kostov@dshs-koeln.de (T.K.)

² Department of Nutritional Sciences, Molecular Nutritional Science, University of Vienna, 1090 Vienna, Austria; raphaela.staltner@univie.ac.at (R.S.); ina.bergheim@univie.ac.at (I.B.)

³ Division of Sports and Rehabilitation Medicine, University Hospital Ulm, 89075 Ulm, Germany; daniel.bizjak@uniklinik-ulm.de

⁴ Molecular Food Chemistry and Food Development, Institute of Food and One Health, Gottfried Wilhelm Leibniz University Hannover, 30167 Hannover, Germany; esatbeyoglu@lw.uni-hannover.de (T.E.); koepsel@lw.uni-hannover.de (M.K.)

⁵ Eckes-Granini Group GmbH, 55268 Nieder-Olm, Germany

* Correspondence: diel@dshs-koeln.de

† These authors contributed equally to this work.

Abstract: Background: Exercise and the consumption of sugars result in a dysfunction of the intestinal barrier (IB). Here, we determined the effect of sugar in a natural matrix on the intestinal barrier after moderate (A) and intensive endurance exercise (B). Method: The IB function was determined before (pre) and after running (post), and 120 and 180 min after consuming the drink by measuring serum endotoxin concentrations (lipopolysaccharides—LPS), IL-6, CD14, and i-FABP. In study A, nonspecifically trained participants ($n = 24$, males and females, age 26 ± 4) ran for one hour at 80% of their individual anaerobic threshold (IAT). After finishing, the runners consumed, in a crossover setup, either 500 mL of water, diluted cloudy apple juice (test drink), or an identical drink (placebo) without the fruit juice matrix (FJM). In study B, the participants ($n = 30$, males and females, age 50 ± 9) completed an ultra-marathon run, were divided into groups, and consumed one of the above-mentioned drinks. Results: Study A: Exercise resulted in a significant increase in serum LPS, i-FABP, and IL-6, which decreased fast after finishing. No impact of the different drinks on LPS i-FABP, or IL-6 could be observed, but there was an impact on CD14. Study B: The ultra-marathon resulted in a strong increase in serum LPS, which decreased fast after finishing in the water and test drink groups, but not in the placebo group. Conclusions: The consumed drinks did not affect the kinetics of IB regeneration after moderate exercise, but impacted CD14 serum concentrations, indicating possible beneficial effects of the FJM on the immune system. After an ultra-marathon, IB function regenerates very fast. The intake of sugar (placebo) seems to have had a negative impact on IB regeneration, which was diminished by the presence of the FJM.

Keywords: endotoxin; endurance exercise; health; intestinal barrier; apple juice



Citation: Valder, S.; Staltner, R.; Bizjak, D.A.; Esatbeyoglu, T.; Herdegen, V.; Köpsel, M.; Kostov, T.; Bergheim, I.; Diel, P. Effect of Sugar- and Polyphenol-Rich, Diluted Cloudy Apple Juice on the Intestinal Barrier after Moderate Endurance Exercise and in Ultra-Marathon Runners. *Nutrients* **2024**, *16*, 1353. <https://doi.org/10.3390/nu16091353>

Academic Editor: Miguel Mariscal-Arcas

Received: 20 March 2024

Revised: 25 April 2024

Accepted: 26 April 2024

Published: 30 April 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The consumption of drinks containing carbohydrates during or after exercise has been described as providing energy (during) and supporting recovery processes after exercise [1,2]. Therefore, such drinks are intensively advertised and their consumption has become very popular among athletes [3]. Unfortunately, both exercise and sugar consumption have been described as resulting in a dysfunction of the intestinal barrier (IB). Impairments of the intestinal barrier function can subsequently lead to elevated bacterial

endotoxin levels and inflammation [4,5]. With respect to physical activity, the induction of inflammation is, on the one hand, important for the stimulation of exercise-related physiological adaptations [6,7]; on the other hand, chronic inflammation may result in overtraining scenarios [8] and increase the risk for the development of metabolic diseases (for an overview, see [9]). In several studies, it has been demonstrated that the function of the IB is affected by physical activity and that heavy physical exercise, like marathon running or ultra-marathon running, results in massive endotoxemia [10–12]. It has also been shown that even an acute or short-term intake of specific foods or food compounds, like saturated fats or fructose and sucrose [13–15], may impair IB function and increase bacterial endotoxin levels in humans, thereby adding to the development of so-called post-prandial endotoxemia [16]. However, whether sugars consumed in their natural matrix state, like fruits or fruit juices, affect IB function and the translocation of bacterial wall compounds in the same way, has not yet been clarified in humans. Indeed, in contrast to most soft drinks, fruit juices contain a variety of secondary plant metabolites that are absorbed in the intestine and are also metabolized by intestinal cells. For instance, the results of in vitro and ex vivo studies have suggested that polyphenols, like those found in apple juice, are absorbed and metabolized [17,18], and may thereby affect inflammatory processes and even DNA damage [19,20]. Information about the combinatory effects of sugar consumption and exercise on the IB is limited.

Thus, it was the purpose of this study to analyze the combinatory effects of sugars consumed in their natural matrix (diluted cloudy apple juice with a high content of polyphenols (test drink)) or in water (placebo), in comparison to water, and in combination with exercise, on the markers of the IB. In the first study, this was analyzed after moderate exercise in a placebo-controlled, blinded, crossover design (study A). In addition, the effects of the same drinks were tested in a second study after high-volume endurance exercise (study B). Here, the finishers of an ultra-marathon were divided into groups and consumed the test drink, the placebo, or water directly after finishing.

2. Methods

2.1. Participants

2.1.1. Study A

All the participants in this study were recruited from local running groups or from courses at the German Sport University Cologne. This study was carried out between December 2021 and October 2022. The sample size was calculated with G*Power and a total of 24 participants were considered sufficient for enrollment (Gpower, Version 3.1.9.2, Düsseldorf, Germany), based on the effect sizes of previous studies [2].

A total of 24 men and women were enrolled in this study, of whom a total of 17 participants completed this study. Participants dropped out of this study due to family reasons ($n = 2$), illness ($n = 2$), or unspecified reasons ($n = 3$). None of the participants smoked, suffered from chronic or acute diseases, or was overweight (BMI between 18.5 kg/m^2 and 24.9 kg/m^2). All the participants followed an omnivorous diet. None of the participants reported drinking more than a moderate amount of alcohol (no more than one glass of beer or wine, so that a quantity of $>10 \text{ g/day}$ for women and $>20 \text{ g/day}$ for men was not exceeded). They were healthy, generally physical active, but not specifically endurance-trained. In addition, the subjects had to be between 18 and 35 years old, have no acute injuries or chronic illnesses, take any medications, and have a running time for 10,000 m of $<55 \text{ min}$ for women and $<50 \text{ min}$ for men. High-performance athletes with low body fat and individuals trained specifically for national and international competitions were also excluded. Before the subjects were included in this study, they were informed about the study design and objectives and had to give their written consent to participate. All personal data collected were anonymized and in compliance with data protection regulations in Germany. An overview of the subjects' characteristics is given in Table 1.

Table 1. Overview of subjects characteristics. Shown are mean results $\pm$ standard deviation (SD).

Sex	Male (14), Female (3)
Age (years)	26 $\pm$ 4
Height (cm)	178.94 $\pm$ 7.28
Body mass (kg)	70.94 $\pm$ 8.17
BMI (kg/m ²)	22.12 $\pm$ 1.80

2.1.2. Study B

Ultra-marathon (TorTour de Ruhr[®]) participation required a medical sports examination conducted less than 6 months before the race and that confirmed the physical resilience of the athlete. The inclusion criteria for study participation were as follows: male/female; endurance athlete and 160.9 km or 230 km participant in the TorTour de Ruhr[®] 2022; no previous injuries; and the ability to understand this study's procedure and to give informed consent. The exclusion criteria included the following: participants in the 100 km race (owing to organizational restrictions); nicotine consumption; diseases of the intestine; blood clotting disorders or intake of blood-thinning medications; acute or chronic vascular (blood flow) disorders; cardiovascular, metabolic, or autoimmune diseases; and non-consenting subjects. An overview of the subjects characteristics is given in Table 2.

Table 2. Anthropometric data, finish time, and nutrition details for this study's participants. All data are presented as mean $\pm$ standard deviation.

Anthropometry							
Age (years)		Height (cm)		Body Mass (kg)		Body Mass Index (kg/m ²)	
160.9 km	230 km	160.9 km	230 km	160.9 km	230 km	160.9 km	230 km
50.20 (7.98)	50.14 (9.74)	174.80 (4.62)	177.43 (8.74)	71.14 (4.18)	71.89 (11.30)	23.30 (1.29)	22.79 (2.93)
Finish time (hours)							
160.9 km					22.56 (3.31)		
230 km					32.28 (2.95)		

All the subjects received information about this study's content and the use of the data and provided their written consent.

Both study parts were approved in their entire study designs by the local ethics committee of the German Sports University Cologne in October 2021 (reference number: 171/2021) and registered with the DKRS under trial No. DRKS00027860.

2.2. Study Design

2.2.1. Study A

This study was designed as a randomized, double-blind trial with a crossover design. To ensure accuracy, there was a washout period of at least 2 weeks between intervention phases to account for possible training adaptations and the effects of the study beverages. The intervention consisted of a one-hour endurance run at an intensity of 80% of the individual anaerobic threshold (IAT). To determine the IAT, a field incremental exercise test was conducted. The test started at a velocity of 2.4 m/s, increasing by 0.4 m/s every 5 min. Each increment was followed by a 30 s rest period that allowed for capillary blood sampling, enabling the analysis of the blood lactate concentration [21]. The test continued until volitional exhaustion was reached, determined when at least two of the following three criteria were met: (1) reaching the age-predicted maximum heart rate, (2) a blood lactate concentration of 8 mmol/L or higher, and (3) a rating of 18 or higher on the Borg Scale [22]. The analysis of the IAT included a mathematical calculation of the lactate concentration

with the Dmod method [23]. This method determines the maximum distance between a third-degree polynomial curve—representing the lactate data from the incremental test for each participant—and the line connecting the first point of lactate rise (increase of ≥ 0.4 mmol/L between two increments) to the final measured lactate concentration.

The endurance run was carried out three times, with the test drink, placebo, and water supplementation. The study beverages were ingested immediately after the run. Blood samples were taken at defined time points (T0 (pre-exercise (pre-ex)), T2 (post-exercise (post-ex)), T3 (+80 min), T4 (+120 min), and T5 (+180 min)) throughout the study day and a further blood sample was taken on the following day. Figure 1 displays the entire study design.

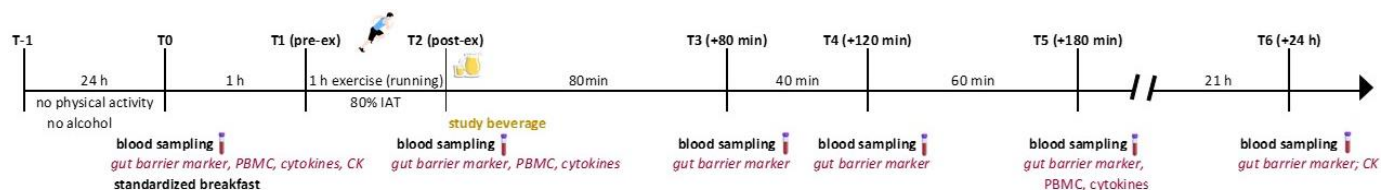


Figure 1. Study design of study A. CK = creatine kinase; IAT = individual anaerobic threshold; PBMC = peripheral blood mononuclear cells; pre-ex = pre-exercise; post-ex = post-exercise.

On the evening before each of the three study days, the 17 healthy subjects consumed a standard dinner. The meal consisted of pasta in a tomato cream sauce with zucchini and mozzarella with the macronutrients, i.e., the energy derived from carbohydrates at 56 E%, fat at 30 E%, and protein at 14 E%, based on the recommendations of the German, Austrian, and Swiss nutrition societies (DACH) (see Table 3 for meal composition). Protein levels were adjusted for the higher needs of athletes [24]. The energy content of the meal was based on the ‘normal’ energy intake of each participant, taking gender, physical activity, and age into consideration. To assess the ‘normal’ energy intake of the participants, two independent 24 h recalls (for one weekday and one weekend day) were performed by a trained nutritionist. The nutritional intake and standardization of the meal were calculated via the computer software EBISpro (Version 2011, Willstätt, Germany).

Table 3. Composition of the standardized meal served to the participants on the evening before the intervention day.

Meal Components	Energy (kcal/100 g)	Carbohydrates (g/100 g)	Fat (g/100 g)	Protein (g/100 g)	Fiber (g/100 g)
Egg-based pasta	352.3	68.3	2.8	12.3	5.0
Zucchini	19.1	2.0	0.4	1.6	1.1
Onion	28.0	4.9	0.3	1.3	1.8
Olive oil	881.7	0.2	99.6	-	-
Tomato	17.4	2.6	0.2	0.9	0.9
Cream (10% fat content)	116.6	3.3	10.0	3.1	-
Mozzarella	254.8	-	19.8	19.0	-
Salt	-	-	-	-	-

Values were determined using the software EBISpro.

The results of the 24 h recalls and the values of the energy and macronutrient composition of the standard meal are shown in Supplementary Tables S1 and S2.

On each study day, all study participants arrived at the German Sport University Cologne in a fasting state in the morning, having fasted for at least 12 h since their last meal. Upon their arrival, a first blood sample was taken (T0). Subsequently, all the subjects

received a standardized breakfast, which consisted of an amount of oatmeal adjusted to their nutritional needs for their body weight determined by 2 independent 24 h recalls, 5 g of honey or agave syrup, a banana, and hot water (ad libitum). After a defined resting period of one hour, all study participants completed a one-hour endurance run at an intensity of 80% IAT. During the defined one-hour endurance run, their heart rates (HR) were recorded using heart rate monitors. Immediately after the completion of the run, blood lactate levels were measured for the blood obtained from the capillary blood of the ear for load control, and a second blood sample was collected (T2, post-ex). Subsequently, the drinks (500 mL water, placebo, or test drink) were consumed by the participants within 5 min. During the post-exercise period, additional blood samples were collected after 80 min (T3, +80 min), 120 min (T4, +120 min), 180 min (T5, +180 min), and after 21 h (T6, +24 h), following the completion of beverage consumption. The subjects were not allowed to engage in additional physical activity during this time interval, and they were not permitted to consume any meals until after the T5 (+180 min) blood sample was taken. After the completion of the study day (+24 h blood sampling on the following day), there was a washout period of at least 14 days before the study procedure was repeated with the remaining study drinks on a sample-specific basis.

2.2.2. Study B

The study participants competing in the TorTour de Ruhr® ultra-marathon (230 km and 160.9 km distances) ($n = 30$) were randomly divided into three groups ($n = 10$), and ingested the study beverages immediately after the run. Blood samples were taken at defined time points (T0 (pre-exercise (pre-ex)), T2 (post-exercise (post-ex)), T3 (+120 min), and T4 (+180 min)). Blood samples were stored at 4 °C until transportation to the analysis facility. All samples were transported within a time frame of a maximum of four hours, and were either measured immediately in the laboratory or stored at −80 °C for further analysis. Figure 2 displays the entire study design.

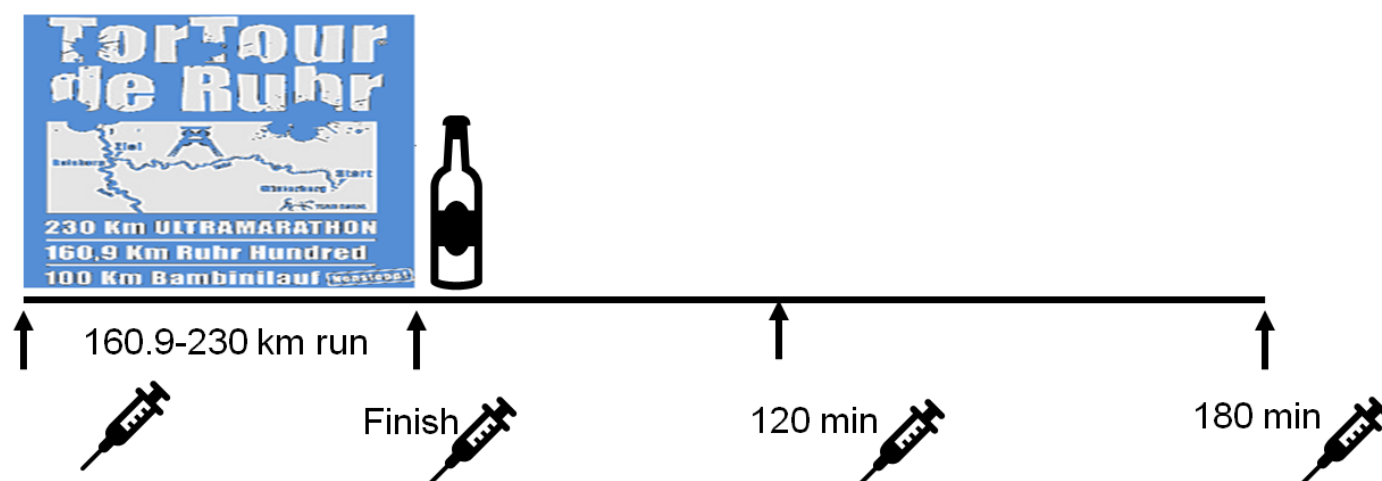


Figure 2. Study design of study B.

2.3. Study Beverages

The study beverages were either 500 mL water (as the negative control), a sugary iso-sweet and iso-caloric control drink (placebo), or diluted cloudy apple juice (test drink). Volvic water (Danone Deutschland GmbH, Frankfurt am Main, Germany) was used as the negative control because it is particularly low in nutrients and minerals. The sugary comparative drink (placebo) contained sugars (fructose, glucose, and sucrose) in the same proportion as the diluted cloudy apple juice, as well as the aromas and acids typical of apple juice, and was isotonic. Compared to the diluted cloudy apple juice, the placebo contained no polyphenols or secondary plant substances. The diluted cloudy apple juice

had a fruit juice content of 60% naturally cloudy apple juice with the highest possible polyphenol content (see Table 4).

Table 4. Ingredients in diluted cloudy apple juice (test drink) and matched sugary control drink (placebo) per liter.

Parameter	Diluted Cloudy Apple Juice (60% Juice Content)	Placebo
Brix corr.	6.72	6.72
Glucose [g/L]	13.4	13.4
Fructose [g/L]	35.0	35.0
Sucrose [g/L]	9.1	9.1
Total sugar [g/L]	57.5	57.5
Sorbitol [g/L]	2.20	2.20
L-malic acid [g/L]	3.36	3.36
Potassium [g/L]	0.59	0.59
Apple flavor [ml/L]	---	4.70
Total polyphenol content [mg/L]	554.4	---

2.3.1. Density and Brix

The density of the juice was measured using a bending oscillator (Anton Paar, Seelze, Germany). The corresponding Brix value was calculated using the density table of the IFU (International Fruit and Vegetable Juice Association) No. 01a (Rev. 2005), and should correspond to the corrected Brix value (Bx. Corr.) [25].

2.3.2. Total Acidity

The total acidity was determined titrimetrically, based on method no. 03 (Rev. 2017) of the IFU (International Fruit and Vegetable Juice Association) [26].

2.3.3. Determination of the Mineral Content Using ICP-OES (Optical Emission Spectrometry with Inductively Coupled Plasma)

The mineral content of the juice was determined after microwave digestion using ICP-OES. The minerals were determined analogously to the ASU method L.00.00-19/1 [27]. Prior to this, the juice samples were prepared using microwave digestion, which was carried out analogously to ASU method L.00.00-144 [27].

2.3.4. Enzymatic Determination of the Sorbitol Content

The sorbitol content of the juice was automatically determined enzymatically and kinetically using a test kit from Boehringer Mannheim/r-biopharm (Darmstadt, Germany).

2.3.5. The Sugars Present in the Juice Were Characterized and Quantified Using HPLC-RID (High-Performance Liquid Chromatography with Refractive Index Detector)

The sugar types—glucose, fructose, and sucrose—were also quantified using HPLC-RID based on method no. 67 (Rev. 2005) of the IFU (International Fruit and Vegetable Juice Association) [28].

2.3.6. Total Phenol Content, Determined with Folin–Ciocalteu

The Folin–Ciocalteu reagent was used to determine the total phenol content of the juice, according to the method of Prior et al. (2005) [29].

2.4. Blood Analysis

Bacterial endotoxin levels were assessed by using a limulus amebocyte lysate assay (Charles River, Ecully, France), as detailed previously in [30].

The protein concentrations of the intestinal fatty acid-binding protein (i-FABP) and soluble cluster of differentiation 14 (CD14) in the serum of the participants were determined by using commercially available ELISA kits (Bio-Techne Corp., Minneapolis, MN, USA)

according to the manufacturer's instructions. The serum concentrations of interleukin 6 (IL-6) protein were assessed via human IL-6 ELISA Kit (R&D Systems, Minneapolis, MN, USA).

The skeletal muscle-specific creatine kinase (CK) concentration in the serum was determined as a marker for skeletal muscle damage using a COBAS h 232 point-of-care system (Roche Diagnostic Systems, Rotkreuz, Switzerland).

2.5. Statistical Analysis

The data were analyzed using SPSS (IBM SPSS Statistics 26.0, Ehningen, Germany) and R version 4.3.0 [31]. Linear mixed-effects regression models (LME) with a random intercept, and fixed effects for the group (water vs. placebo vs. juice), time (before vs. post-exercise vs. +180 min after exercise), and their interaction (group $\times$ time), were used to analyze the effects of the intervention over time on the IL-6 protein in the serum. As the assumption of a linear regression was not met for the IL-6 protein, a robust linear mixed regression was conducted for the IL-6 protein levels (R-package: robust mm) [32]. To review the robustness of the results, we repeated the analyses, adjusting for possible covariates of sex, age, and BMI (see Supplemental Materials). The effect size partial η^2 is reported for the group effects, time effects, and group $\times$ time interaction. The measurement parameters that were collected in relation to the one-hour running load were tested for normal distribution with the Kolmogorov–Smirnov test. The raw data for CK were transformed into their natural logarithms (ln) before data analysis. Subsequently, the CK blood concentration was analyzed for time (pre-exercise vs. post-exercise), group (water vs. placebo vs. apple juice spritzer), and time $\times$ group interaction, with a repeated measures ANOVA. The running-related parameters of HR and lactate were also analyzed with one-way ANOVA for the three different study beverage conditions. The reported p -values of the LME were two-tailed, the p -values of the ANOVA were one-tailed, and both had a significance level of $\alpha < 0.05$.

The data for endotoxin concentrations, i-FABP, and CD14 are presented as the mean $\pm$ SEM. The test for normality was analyzed using the Shapiro–Wilk normality test. Grubb's test was performed before the statistical analysis to identify outliers. To assess the effects between different time points, a paired t -test was used. An ordinary one-way ANOVA with Dunnett's and Turkey's multiple comparison test was used to determine statistically significant differences between the interventions. All the data were analyzed with GraphPad Prism software version 10 (GraphPad Prism Software Inc., Solana Beach, CA, USA). Significance was considered for a p -value < 0.05 .

3. Results

3.1. Study A

3.1.1. Effects of One-Hour Running Load on CK, Lactate, and HR

For the analysis of CK blood concentration, 16 subjects were included because it was not possible to take one blood sample at T6 (+21 h) due to the time constraints of one subject. A repeated measures ANOVA determined that the mean CK blood concentrations were statistically significantly different before and after the one-hour running load ($F(1, 45) = 50.36, p < 0.001, \eta^2 = 0.528$) (Figure 3A,B). Among the study beverage conditions, the water, placebo, and test drink CK values were not statistically significantly different ($F(2, 60) = 0.289, p = 0.750$) (Figure 3C). Furthermore, no significant time $\times$ group interaction could be identified ($F(2, 45) = 0.41; p = 0.667$).

The mean lactate blood concentration (Figure 3B) showed no statistically significant difference between the three beverage conditions ($F(2, 48) = 0.566, p = 0.57$). Similarly, there were also no statistically significant differences for the HR values (Figure 3A ($F(2, 48) = 0.114, p = 0.892$)).

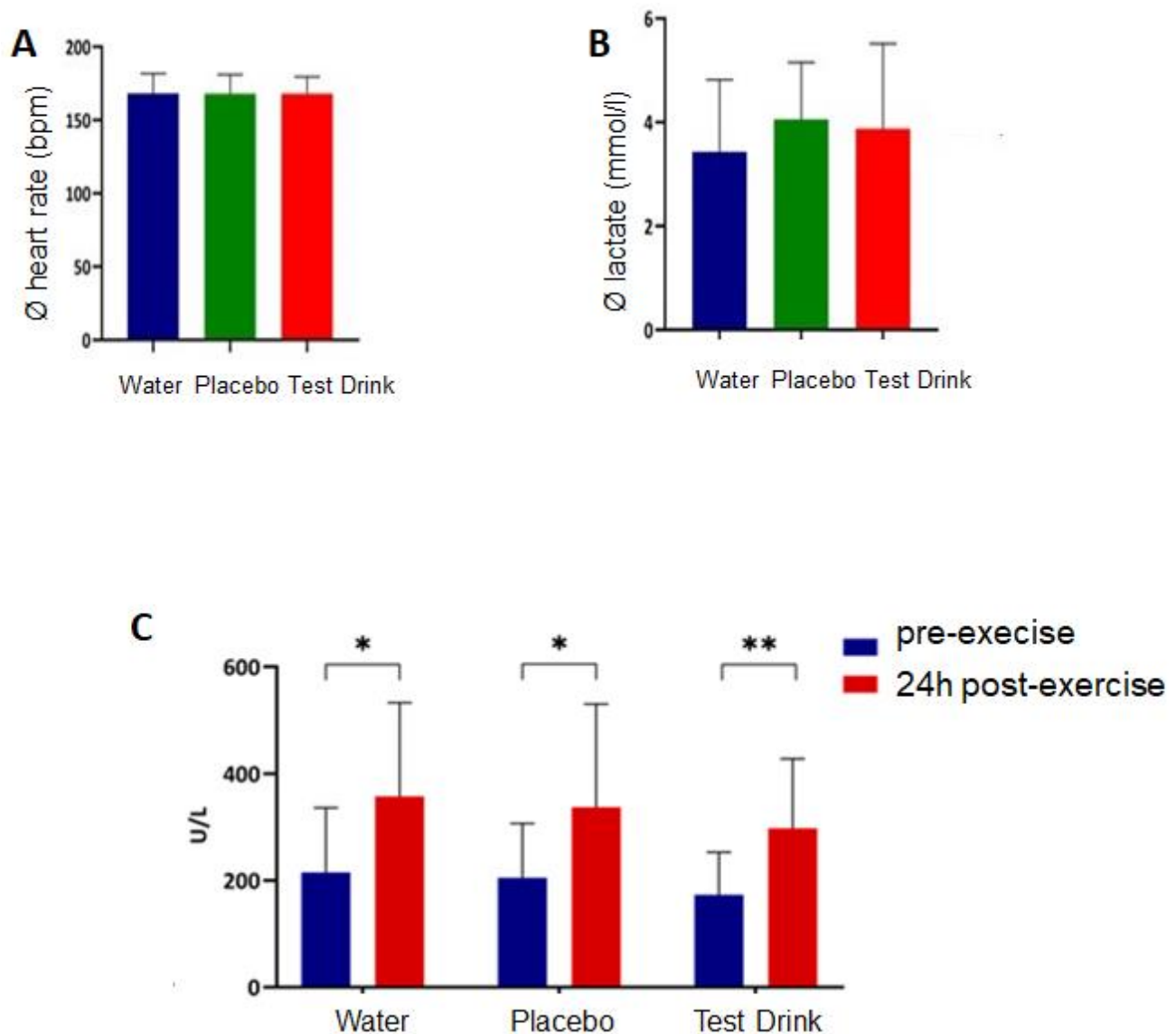


Figure 3. Effect of the one-hour running load on heart rate (HR), lactate, and creatine kinase (CK). Shown are the mean values of the three runs. (A) Average heart rate, (B) average lactate serum concentrations at the end of the run, (C) change in CK concentrations (delta) for all three runs. Mean comparisons are based on unpaired *t*-tests and ANOVA with repeated means (water, $n = 15$; placebo, $n = 13$; test drink, $n = 14$; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$).

The results shown in Figure 3 demonstrate that the running load was comparable for all three interventions (water, placebo, test drink) among the individuals (Figure 3A,B), and the running intensity was sufficient to result in moderate skeletal muscle damage (Figure 3C).

3.1.2. Effects of One-Hour Moderate Running Load on Endotoxin, i-FABP, and CD14

To analyze the impact of the running load on the IB function, the serum concentrations of endotoxin, i-FABP, and CD14 protein were measured for the blood samples collected at T0 and T2. The results are shown in Figure 4.

As shown in Figure 4, the one-hour running activity at moderate intensity resulted in a statistically significant increase in LPS, i-FABP, CD14, and IL-6 in the serum of our volunteers.

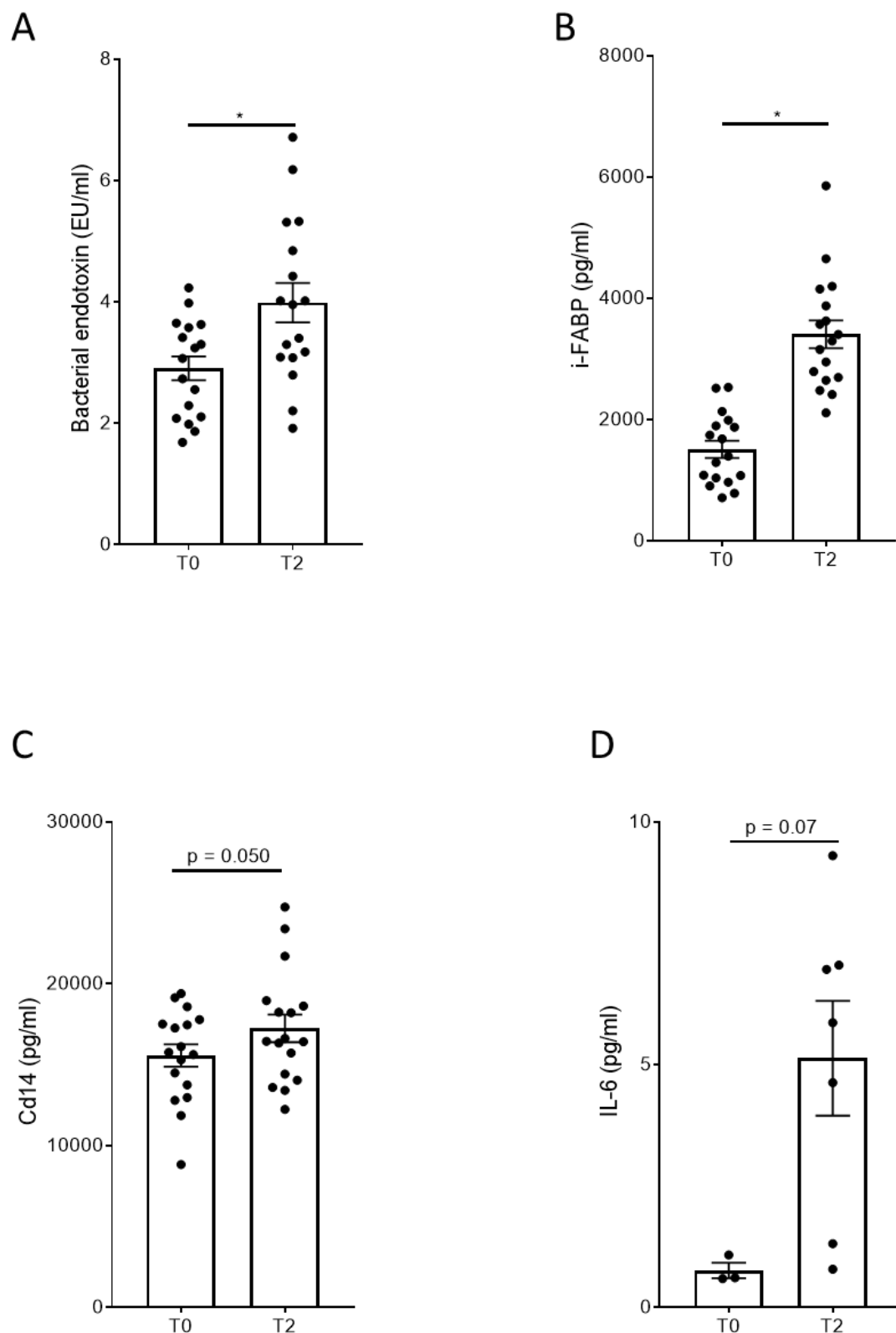


Figure 4. Effect of the physical activity on the markers of intestinal permeability and inflammation in the serum of participants. (A) Bacterial endotoxin, (B) i-FABP, (C) CD14 protein, and (D) IL-6 protein levels before (T0) and after (T2) the physical activity in the serum of participants. Values are means $\pm$ SEM; $n = 17$ except for (D), $n = 3-7$; *, $p < 0.05$. i-FABP = intestinal fatty acid-binding protein; CD14 = cluster of differentiation 14; IL-6 = interleukin 6. Results show that a moderate running intensity significantly increases serum markers for the functionality of the intestinal barrier.

3.1.3. Effects of Study Beverages on Time-Dependent Change in Serum Concentrations of Bacterial Endotoxin as Well as in i-FABPIL-6 and CD14 Protein in Serum after Run

To analyze how the intake of the respective beverages after running affects the time-dependent concentration of the target biomarkers for intestinal barrier function and inflammation, the volunteers consumed the test beverages directly after their runs. Blood samples were collected before the consumption of the respective drinks, after 120 min, and after 180 min. The results are shown in Figure 5.

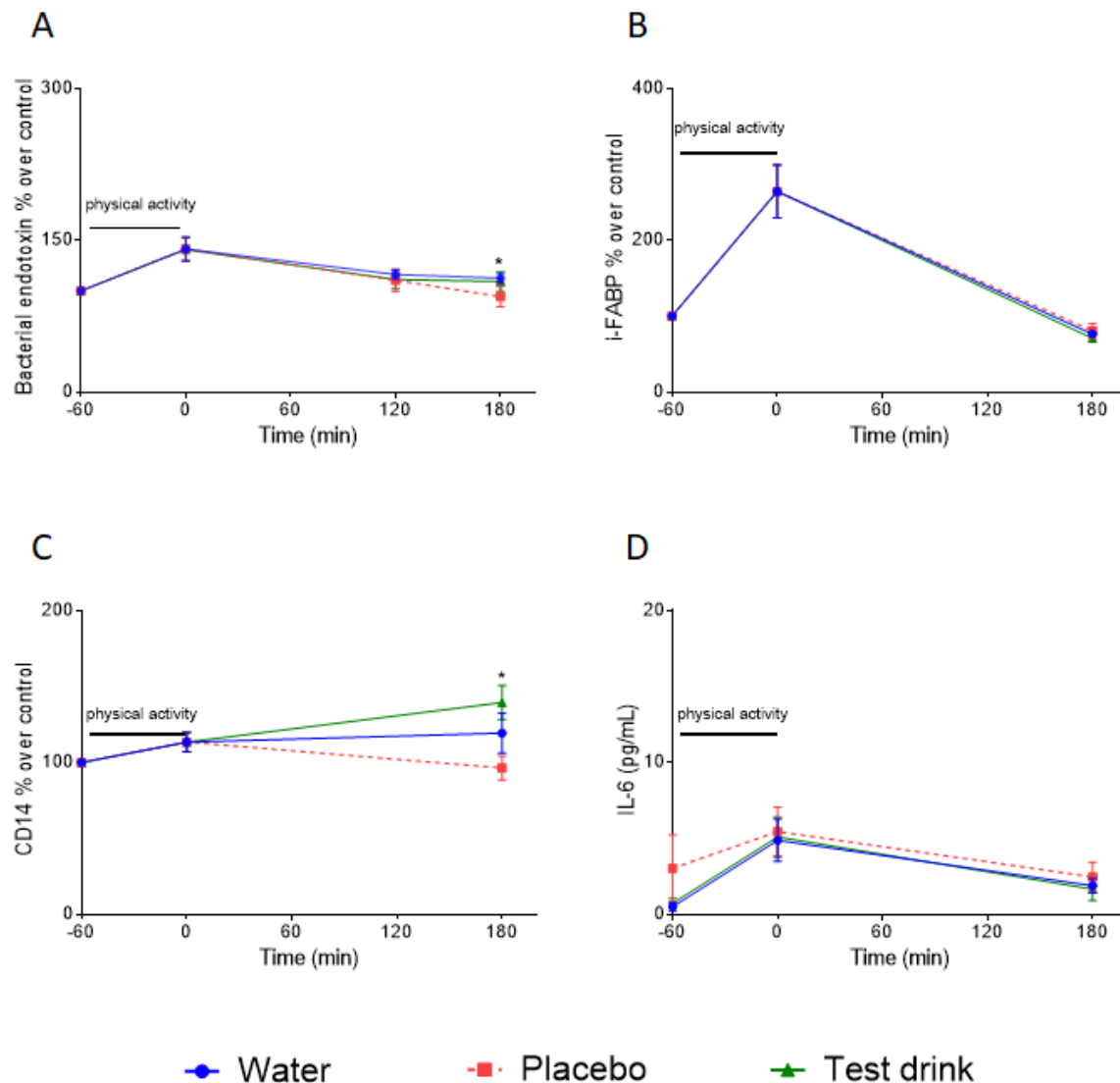


Figure 5. Effect of different beverages after physical activity on markers of intestinal permeability and inflammation in serum of participants. (A) Bacterial endotoxin concentration, (B) i-FABP, (C) CD14, and (D) IL-6 protein concentration after 120 and 180 min in serum of participants following 1 h of physical activity (−60–0 min) at 80% IAT. Values are means $\pm$ SEM; $n = 17$; for (A), * indicates $p < 0.05$ for water vs. placebo after 180 min; and for (C), * indicates $p < 0.05$ for placebo vs. test drink. i-FABP = intestinal fatty acid-binding protein; CD14 = cluster of differentiation 14; IL-6 = interleukin 6.

In Figure 5, it is visible that after exercise the serum levels of endotoxin (Figure 5A), i-FABP (Figure 5B), and IL-6 protein (Figure 5D) decreased in all groups at a comparable rate. The increase in the respective serum concentrations induced by the running activity returned to pre-exercise levels after 180 min. No statistically significant impact of the different drinks could be observed. For CD14, significant differences could be observed

between the placebo group and the test drink group, with the latter being significantly higher than after intake of the placebo.

3.2. Study B

Of the 30 participants, only 10 finished the race and ingested the study beverages immediately after the run (water, $n = 3$; placebo, $n = 3$; test drink, $n = 4$). Blood samples were taken before the run, immediately before consumption of the study beverages, and 120 min and 180 min post-exercise.

3.2.1. Effects of the 160 and 240 km Runs on Serum Concentrations of Bacterial Endotoxin and IL-6 Protein in Serum

To analyze the impact of the ultra-marathon on the IB and the inflammatory status of the participants, blood samples were collected from the finishers and serum concentrations of bacterial endotoxin and IL-6 protein were determined. The results are presented in Figure 6.

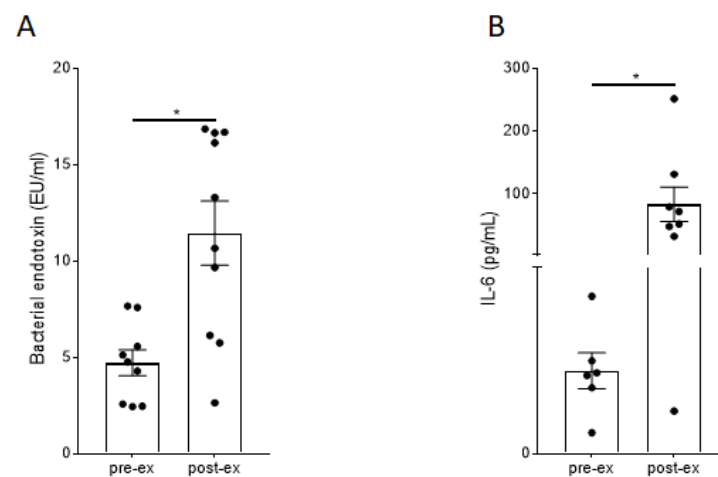


Figure 6. Effect of the ultra-marathon on bacterial endotoxin levels and IL-6 protein in the serum of the participants. (A) Bacterial endotoxin and (B) IL-6 levels in the serum of the athletes. Values are the means $\pm$ SEM. For (A,B): $n = 6$ – 10 ; *, $p < 0.05$.

As shown in Figure 6, the ultra-marathon results in a strong significant increase in serum bacterial endotoxin (Figure 6A) and serum IL-6 protein concentrations (Figure 6B). Serum concentrations of IL-6 exceeded the serum concentrations detected after moderate running activity (Figure 4) more than 20-fold.

3.2.2. Effects of the Study Beverages on Time-Dependent Serum Concentrations of Serum Endotoxin after the Run

To evaluate the impact of the three respective beverages administered after the ultra-marathon on the time-dependent serum concentration of bacterial endotoxin, the volunteers consumed the beverages directly after finishing the run. Blood samples were collected before consuming the respective drinks, and after 120 min and 180 min. The results are shown in Figure 7.

After the ultra-marathon, serum endotoxin levels decreased very quickly. This could be observed in the volunteers consuming water, but also in those consuming the test drink. However, in the volunteers consuming the placebo, the AUC over the 180 min testing period was significantly higher compared to the water group.

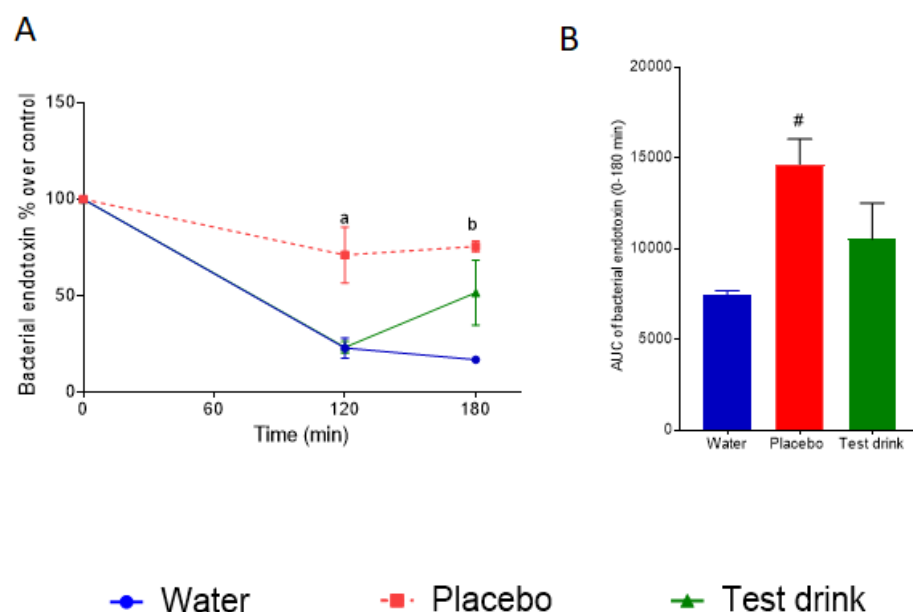


Figure 7. Effect of different beverages after finishing an ultra-marathon on serum concentration of bacterial endotoxin. (A) Bacterial endotoxin levels and (B) AUC (0–180 min) of bacterial endotoxin levels of participants. Values are means $\pm$ SEM. For (A,B): $n = 3$ –4; ^a $p < 0.05$; placebo vs. water, water vs. test drink; ^b $p < 0.05$; placebo vs. water; [#] $p < 0.05$ placebo vs. water. IL-6 = interleukin 6; AUC = area under the curve.

4. Discussion

In our studies, we investigated the impact of sugars and the matrix ingredients of cloudy apple juice (FJM) on the IB after moderate and intensive physical activity.

Study A was conducted using a crossover design. As shown in Figure 3, the training load for our volunteers was comparable in all three interventions. Moreover, the intensity of the running activities resulted in moderate skeletal muscle damage, indicated by the increased CK serum concentrations. Therefore, well-defined baseline conditions were established to compare the impact of our three different drinks on the IB after exercise in the crossover design. In Figure 4, it is evident that a moderate training load of 80% of IAT for a duration of 60 min resulted in a significant increase in serum endotoxin, i-FABP, and IL-6 protein. For the bacterial endotoxin, this is in agreement with the published data [33]. For i-FABP, an increase in serum protein has been shown before after 90 min of running activity [11]. Our data demonstrate that moderate exercise has an impact on the IB and results in an induction of inflammation, as indicated by the increase in IL-6 protein levels in the serum. In all three groups, the levels of serum endotoxin and IL-6 protein quickly returned to the baseline levels within a period of 180 min after exercise (Figure 5). To our knowledge, this fast decrease has not been described before. Immediately after completing the running exercise in study A, the volunteers received their respective drinks. In previous investigations it has been demonstrated that the uptake of sugars, especially fructose, has an impact on the IB and results in leakiness [14,15]. Therefore, it was one of our hypotheses that the uptake of sugar-containing drinks after exercise may harm the IB in an additive manner, and may also impact the time-dependent regeneration of the IB after setting the stressor. As shown in Figure 5, neither the placebo drink nor the test drink seems to have affected the time-dependent decrease in our marker's bacterial endotoxin, i-FABP, or IL-6. For the i-FABP and IL-6 protein, no statistically significant difference could be observed compared to water. For the endotoxins, a statistically significant difference could be observed between the placebo and water after 180 min. However, whether this effect is of physiological relevance is questionable. No differences could be observed between water and the test drink, demonstrating that the test drink acts, independent of its sugar content, comparably to water (Figure 5D).

More complex are the effects observed for CD14. Soluble CD14 detected in serum is known to be a nonspecific marker of monocyte activation, independent of bacterial endotoxin [34]. The observed increase in the CD14 protein induced by exercise is in line with reports from the literature [35]. In Figure 5C, it is clearly visible that the concentration of soluble CD14 in the serum differed between the respective groups 180 min after exercise. A time-dependent decrease in the CD14 protein could be observed in the test drink group, whereas after drinking the placebo, a statistically significant increase in the CD14 protein was detectable. We speculate that the pattern for CD14 is different than that for IL-6, endotoxin, and i-FABP because CD14 seems to be more affected by exercise than by endotoxin. Whether the increase in the CD14 protein in the test drink group indicates an adverse or beneficial effect is unclear. However, in the water group, the CD14 protein levels also did not decrease after 180 min. The observed increase in the CD14 protein serum concentrations 180 min after exercise could be interpreted as an indirect marker for leukocytosis [35,36]. Exercise has been shown to increase circulating neutrophil and monocyte counts and reduce circulating lymphocyte counts during recovery after physical activity. This redeployment of effector lymphocytes is an integral part of the physiological stress response to exercise. Some evidence suggests that reduced immune cell function may coincide with rates of illness after exercise. Therefore, a longer detectable leukocytosis could be interpreted as an increase in immune cell function to protect against infections after exercise.

In study B, we tried to analyze the impact of our test drinks in a situation where the IB was already strongly stressed. After ultra-marathon runs, it has been demonstrated that the IB function is massively disturbed [37]. Therefore, we recruited 30 participants in an ultra-marathon run over 160–230 km, but because only 10 of these participants finished the ultra-marathon, this investigation must be characterized as a pilot study.

As shown in Figure 6, the finishers' serum endotoxin concentrations and serum IL-6 levels increased dramatically during the race. This agrees with the published data [10] and indicates a massively leaky IB and enormous systemic inflammation after finishing the race. The serum levels of LPS exceeded the levels detected after moderate exercise for one hour at 80% IAT by 3-fold. The serum levels of IL-6 protein after finishing the ultra-endurance race were 20-fold higher than after the one-hour run at 80% IAT. Remarkably, our volunteers who drank water immediately after finishing showed a fast decrease in endotoxins in the first 120 min after arrival (Figure 7). It is remarkable that endotoxin serum levels returned to normal concentrations so fast after an ultra-marathon. This observation is in agreement with the data from Jeukendrup et al., who collected blood samples from 29 athletes before, immediately after, and 1, 2, and 16 h after a long-distance triathlon to measure endotoxin, tumor necrosis factor-alpha, and IL-6 levels [38].

Even more remarkable is the impact of our beverages. In Figure 7, it is clearly visible that the consumption of the placebo, containing free sugars, resulted in significantly higher bacterial endotoxin concentrations in these participants after 120 min, compared to the water group. Also, the AUC over the 180 min for this group is significantly higher than for the water group. This might be an indication that the uptake of free sugar-containing drinks in a situation with an already enormously stressed IB may negatively impact its regeneration. Such effects, to our knowledge, have not been described in previous studies, but agree with findings that have demonstrated that free sugars have a negative impact on the IB [14,15] under resting conditions. In study A (Figure 5), a comparable effect could not be observed, indicating that this impact may be more pronounced after high volume performance intensity.

A surprising result is our observation that among our volunteers who consumed our test drink, which contained the same amount of sugar and had a composition like that of the placebo but was embedded in the FJM, the measured serum LPS levels are not different to those for water after 120 min. This is also the case for the AUC over the 180 min period. This observation indicates that the fruit juice matrix may have counteracted some of the negative impact of the sugars on the IB in the period after running.

Limitations and Outlook

This study introduces novel insights into the effect of physical activity on intestinal barrier function; however, when interpreting the presented data, some limitations need to be considered.

In study A, the volunteers' dietary intake was only standardized 12 h before we started the intervention (standardized dinner), and on the day of the intervention, until the 3 h post-running sampling point. A longer period of nutrition standardization would be preferable, and may result in the clearer effects of our drinks on IB functionality, as has been shown before by [14,15]. However, in this study this could not be realized for organizational reasons. Also, in study A, the majority of the participants were male.

In study B, nutrition could not be standardized at all because of the racing conditions and ethical reasons surrounding the ultra-marathon run. Also, after finishing, a standardization of nutrition would have been preferable and may have led to clearer results. However, this was also not possible for ethical reasons regarding the individuals who wanted to finish an ultra-marathon competition.

Also, another limitation was the high drop-off rate of our ultra-marathon runners. Climate conditions during the race worsened and were a major reason for these unexpectedly high drop-off rates. The limited number of finishers resulted in a small sample size for the following investigation, which limits the scientific quality of our data. However, the results are interesting and we believe that similar effects could be also observed in marathon finishers. Therefore, we plan to extend this study in a similar setting during a regular marathon with a much higher number of participants under better-standardized conditions.

5. Conclusions

In our study, we show that even moderate endurance exercise results in a slight but significant increase in serum endotoxin levels, indicating a leakiness of the IB. The IB regenerates fast after moderate exercise. The consumed drinks did not affect the kinetics of IB regeneration, but had an impact on the CD14 serum concentrations, indicating that the FJM of apple juice may have beneficial effects on the immune system after exercise. An ultra-marathon results in a very strong increase in serum endotoxins, indicating IB dysfunction. Here also, IB function regenerated very fast after the consumption of water, whereas the intake of plain sugar (placebo) seems to have had a negative impact on IB regeneration, which was diminished by the presence of the FJM in the test drink. Because the uptake of sugars is necessary for recovery after intensive exercise, the results of this study provide evidence that the negative impact of plain sugars on the IB may be compensated for by the ingredients of the FJM. Diluted apple juice is a well-known drink for rehydration after physical exercise. Beside these already well-known beneficial effects, it may also have positive effects on the IB and the immune system after exercise.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/nu16091353/s1>, Table S1: Results of the 24-h recalls of the participants. Table S2: Energy and macronutrient composition of the standardized meal served to the participants on the evening before the intervention day.

Author Contributions: Conceptualization, S.V. and P.D.; methodology, P.D. and I.B.; measurement of biomarkers in the blood, R.S. and S.V.; organization of the ultra-marathon, D.A.B.; performance diagnostics, supervision of training, and taking biological samples during the ultra-marathon, D.A.B., T.K. and S.V.; writing—original draft preparation, P.D. and S.V.; writing—review, visualization, and editing, S.V., D.A.B., I.B., T.E., M.K., T.K. and V.H.; creation and analysis of the test beverages, T.E. and M.K.; manufacturing of the test beverages, V.H.; supervision, I.B.; project administration, P.D.; funding acquisition, P.D. and T.E. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Forschungskreis der Ernährungsindustrie (FEI), Bonn, Germany, grant number AiF 21925 N.

Institutional Review Board Statement: This study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and approved by the Ethics Committee of the German Sports University Cologne (reference numbers 171/2021 and 25/2020) and registered with the DKRS under trial No. DRKS00027860.

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all the subjects involved in this study.

Data Availability Statement: The raw data can be viewed upon request.

Acknowledgments: Acknowledgment to Anika Voß for performing the laboratory work and to Eduard Isenmann for consulting. The authors would like to thank all the test subjects for their voluntary participation in this study.

Conflicts of Interest: Author Volker Herdegen was employed by the company Eckes-Granini Group GmbH. The remaining authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Abbreviations

AUC	area under the curve
BMI	body mass index
CD14	cluster of differentiation 14
CK	creatine kinase
DGE	German nutrition society
FJM	fruit juice matrix
GAE	gallic acid equivalent
HPLC-RID	high-performance liquid chromatography with refractive index detector
HR	heart rate
IAT	individual anaerobic threshold
IB	intestinal barrier
I-FABP	intestinal fatty acid-binding protein
IFU	international fruit and vegetable juice association
IL	interleukin
LBP	lipopolysaccharide-binding proteins
LME	linear mixed-effects regression models
LPS	bacterial endotoxins/lipopolysaccharides
PBMC	peripheral blood mononuclear cells
SD	standard deviation
SEM	standard error of the mean

References

1. Close, G.L.; Hamilton, D.L.; Philp, A.; Burke, L.M.; Morton, J.P. New strategies in sport nutrition to increase exercise performance. *Free Radic. Biol. Med.* **2016**, *98*, 144–158. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
2. Isenmann, E.; Blume, F.; Bizjak, D.A.; Hundsdörfer, V.; Pagano, S.; Schibrowski, S.; Simon, W.; Schmandra, L.; Diel, P. Comparison of Pro-Regenerative Effects of Carbohydrates and Protein Administred by Shake and Non-Macro-Nutrient Matched Food Items on the Skeletal Muscle after Acute Endurance Exercise. *Nutrients* **2019**, *11*, 744. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
3. Maughan, R.J.; Depiesse, F.; Geyer, H. The use of dietary supplements by athletes. *J. Sports Sci.* **2007**, *25* (Suppl. S1), S103–S113. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
4. Hollander, D.; Kaunitz, J.D. The “Leaky Gut”: Tight Junctions but Loose Associations? *Dig. Dis. Sci.* **2020**, *65*, 1277–1287. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
5. Di Tommaso, N.; Gasbarrini, A.; Ponziani, F.R. Intestinal Barrier in Human Health and Disease. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 12836. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
6. Forcina, L.; Cosentino, M.; Musarò, A. Mechanisms Regulating Muscle Regeneration: Insights into the Interrelated and Time-Dependent Phases of Tissue Healing. *Cells* **2020**, *9*, 1297. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
7. Volpe-Fix, A.R.; de França, E.; Silvestre, J.C.; Thomatieli-Santos, R.V. The Use of Some Polyphenols in the Modulation of Muscle Damage and Inflammation Induced by Physical Exercise: A Review. *Foods* **2023**, *12*, 916. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
8. La Torre, M.E.; Monda, A.; Messina, A.; de Stefano, M.I.; Monda, V.; Moscatelli, F.; Tafuri, F.; Saraiello, E.; Latino, F.; Monda, M.; et al. The Potential Role of Nutrition in Overtraining Syndrome: A Narrative Review. *Nutrients* **2023**, *15*, 4916. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

9. Mohammad, S.; Thiemeermann, C. Role of Metabolic Endotoxemia in Systemic Inflammation and Potential Interventions. *Front. Immunol.* **2020**, *11*, 594150. [CrossRef]
10. Gill, S.K.; Hankey, J.; Wright, A.; Marczak, S.; Hemming, K.; Allerton, D.M.; Ansley-Robson, P.; Costa, R.J.S. The Impact of a 24-h Ultra-Marathon on Circulatory Endotoxin and Cytokine Profile. *Int. J. Sports Med.* **2015**, *36*, 688–695. [CrossRef]
11. Karhu, E.; Forsgård, R.A.; Alanko, L.; Alfthan, H.; Pussinen, P.; Hämäläinen, E.; Korpela, R. Exercise and gastrointestinal symptoms: Running-induced changes in intestinal permeability and markers of gastrointestinal function in asymptomatic and symptomatic runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2017**, *117*, 2519–2526. [CrossRef]
12. Martínez-Navarro, I.; Sanchez-Gómez, J.M.; Aparicio, I.; Priego-Quesada, J.I.; Pérez-Soriano, P.; Collado, E.; Hernando, B.; Hernando, C. Effect of mountain ultramarathon distance competition on biochemical variables, respiratory and lower-limb fatigue. *PLoS ONE* **2020**, *15*, e0238846. [CrossRef] [PubMed]
13. André, P.; Laugerette, F.; Féart, C. Metabolic Endotoxemia: A Potential Underlying Mechanism of the Relationship between Dietary Fat Intake and Risk for Cognitive Impairments in Humans? *Nutrients* **2019**, *11*, 1887. [CrossRef] [PubMed]
14. Nier, A.; Brandt, A.; Rajcic, D.; Bruns, T.; Bergheim, I. Short-Term Isocaloric Intake of a Fructose- but not Glucose-Rich Diet Affects Bacterial Endotoxin Concentrations and Markers of Metabolic Health in Normal Weight Healthy Subjects. *Mol. Nutr. Food Res.* **2019**, *63*, e1800868. [CrossRef] [PubMed]
15. Staltner, R.; Sánchez, V.; Bergheim, I.; Baumann, A. Acute Intake of Sucrose but Not of the Intense Sweetener Sucralose Is Associated with Post-Prandial Endotoxemia in Healthy Young Adults—A Randomized Controlled Trial. *Nutrients* **2023**, *15*, 4038. [CrossRef] [PubMed]
16. Malesza, I.J.; Malesza, M.; Walkowiak, J.; Mussin, N.; Walkowiak, D.; Aringazina, R.; Bartkowiak-Wieczorek, J.; Mądry, E. High-Fat, Western-Style Diet, Systemic Inflammation, and Gut Microbiota: A Narrative Review. *Cells* **2021**, *10*, 3164. [CrossRef] [PubMed]
17. Kahle, K.; Kempf, M.; Schreier, P.; Scheppach, W.; Schrenk, D.; Kautenburger, T.; Hecker, D.; Huemmer, W.; Ackermann, M.; Richling, E. Intestinal transit and systemic metabolism of apple polyphenols. *Eur. J. Nutr.* **2011**, *50*, 507–522. [CrossRef] [PubMed]
18. Deusser, H.; Rogoll, D.; Scheppach, W.; Volk, A.; Melcher, R.; Richling, E. Gastrointestinal absorption and metabolism of apple polyphenols ex vivo by the pig intestinal mucosa in the Ussing chamber. *Biotechnol. J.* **2013**, *8*, 363–370. [CrossRef] [PubMed]
19. Barth, S.W.; Fährndrich, C.; Bub, A.; Dietrich, H.; Watzl, B.; Will, F.; Briviba, K.; Rechkemmer, G. Cloudy apple juice decreases DNA damage, hyperproliferation and aberrant crypt foci development in the distal colon of DMH-initiated rats. *Carcinogenesis* **2005**, *26*, 1414–1421. [CrossRef]
20. Schaefer, S.; Baum, M.; Eisenbrand, G.; Dietrich, H.; Will, F.; Janzowski, C. Polyphenolic apple juice extracts and their major constituents reduce oxidative damage in human colon cell lines. *Mol. Nutr. Food Res.* **2006**, *50*, 24–33. [CrossRef]
21. Heck, H.; Mader, A.; Hess, G.; Mücke, S.; Müller, R.; Hollmann, W. Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *Int. J. Sports Med.* **1985**, *6*, 117–130. [CrossRef] [PubMed]
22. Midgley, A.W.; McNaughton, L.R.; Polman, R.; Marchant, D. Criteria for determination of maximal oxygen uptake: A brief critique and recommendations for future research. *Sports Med.* **2007**, *37*, 1019–1028. [CrossRef] [PubMed]
23. Bishop, D.; Jenkins, D.G.; Mackinnon, L.T. The relationship between plasma lactate parameters, Wpeak and 1-h cycling performance in women. *Med. Sci. Sports Exerc.* **1998**, *30*, 1270–1275. [CrossRef] [PubMed]
24. König, D.; Carlsohn, A.; Braun, H.; Großhauser, M.; Lampen, A.; Mosler, S.; Nieß, A.; Schäbenthal, K.; Schek, A.; Stehle, P.; et al. Position of the working group sports nutrition of the German Nutrition Society (DGE): Protein intake in sports. *Dtsch. Z. Für Sportmed.* **2020**, *71*, 192–198. [CrossRef]
25. International Fruit and Vegetable Juice Association. *Relative Density–Relative Density Method*; International Fruit and Vegetable Juice Association: Paris, France, 2005; (No. 01a); Available online: <https://ifu-fruitjuice.com/page/ListofIFUMethods> (accessed on 19 March 2024).
26. International Fruit and Vegetable Juice Association. *Titrateable Acidity*; International Fruit and Vegetable Juice Association: Paris, France, 2017; (No. 03); Available online: <https://ifu-fruitjuice.com/page/ListofIFUMethods> (accessed on 19 March 2024).
27. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit. *Amtliche Sammlung von Untersuchungsmethoden (ASU) Nach §64 LFGB*. Deutschland (L.00.00–144). Available online: https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/01_Lebensmittel/01_Aufgaben/02_AmtlicheLebensmittelueberwachung/08_AmtlicheSammlung/Im_AmtlicheSammlung_node.html (accessed on 19 March 2024).
28. International Fruit and Vegetable Juice Association. *Determination of Sugars and Sorbitol (HPLC)*; International Fruit and Vegetable Juice Association: Paris, France, 2005; (No. 67); Available online: <https://ifu-fruitjuice.com/page/ListofIFUMethods> (accessed on 19 March 2024).
29. Prior, R.L.; Wu, X.; Schaich, K. Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *J. Agric. Food Chem.* **2005**, *53*, 4290–4302. [CrossRef] [PubMed]
30. Sellmann, C.; Baumann, A.; Brandt, A.; Jin, C.J.; Nier, A.; Bergheim, I. Oral Supplementation of Glutamine Attenuates the Progression of Nonalcoholic Steatohepatitis in C57BL/6J Mice. *J. Nutr.* **2017**, *147*, 2041–2049. [CrossRef] [PubMed]
31. The R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing: Reference Index. Available online: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf> (accessed on 10 May 2023).
32. Koller, M. Robustlmm: An R Package for Robust Estimation of Linear Mixed-Effects Models. Available online: <http://www.ispm.unibe.ch/> (accessed on 21 August 2023).

33. Pals, K.L.; Chang, R.T.; Ryan, A.J.; Gisolfi, C.V. Effect of running intensity on intestinal permeability. *J. Appl. Physiol.* (1985) **1997**, *82*, 571–576. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Shive, C.L.; Jiang, W.; Anthony, D.D.; Lederman, M.M. Soluble CD14 is a nonspecific marker of monocyte activation. *AIDS* **2015**, *29*, 1263–1265. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Koivula, T.; Lempiäinen, S.; Rinne, P.; Rannikko, J.H.; Hollmén, M.; Sundberg, C.J.; Rundqvist, H.; Minn, H.; Heinonen, I. The effect of acute exercise on circulating immune cells in newly diagnosed breast cancer patients. *Sci. Rep.* **2023**, *13*, 6561. [[CrossRef](#)]
36. Sand, K.L.; Flatebo, T.; Andersen, M.B.; Maghazachi, A.A. Effects of exercise on leukocytosis and blood hemostasis in 800 healthy young females and males. *World J. Exp. Med.* **2013**, *3*, 11–20. [[CrossRef](#)]
37. Brock-Utne, J.G.; Gaffin, S.L.; Wells, M.T.; Gathiram, P.; Sohar, E.; James, M.F.; Morrell, D.F.; Norman, R.J. Endotoxaemia in exhausted runners after a long-distance race. *S. Afr. Med. J.* **1988**, *73*, 533–536. [[PubMed](#)]
38. Jeukendrup, A.E.; Vet-Joop, K.; Sturk, A.; Stegen, J.H.; Senden, J.; Saris, W.H.; Wagenmakers, A.J. Relationship between gastrointestinal complaints and endotoxaemia, cytokine release and the acute-phase reaction during and after a long-distance triathlon in highly trained men. *Clin. Sci.* **2000**, *98*, 47–55. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Article

The Influence of a Polyphenol-Rich Red Berry Fruit Juice on Recovery Process and Leg Strength Capacity after Six Days of Intensive Endurance Exercise in Recreational Endurance Athletes

Sarah Valder ¹, Elisabeth Habersatter ², Tihomir Kostov ² , Sina Quenzer ^{3,4}, Lukas Herzig ², Jakob von Bernuth ², Lynn Matits ^{5,6} , Volker Herdegen ³, Patrick Diel ² and Eduard Isenmann ^{2,*}

¹ Department of Preventive and Rehabilitative Sport Medicine, Institute of Cardiovascular Research and Sport Medicine, German Sport University Cologne, 50933 Cologne, Germany

² Department of Molecular and Cellular Sport Medicine, Institute for Cardiovascular Research and Sport Medicine, German Sport University Cologne, 50933 Cologne, Germany

³ Eckes-Granini Group GmbH, 55268 Nieder-Olm, Germany

⁴ Department of Beverage Research, Chair Analysis and Technology of Plant-Based Foods, Geisenheim University, 65366 Geisenheim, Germany

⁵ Clinical & Biological Psychology, Institute of Psychology and Education, Ulm University, 89081 Ulm, Germany

⁶ Division of Sports and Rehabilitation Medicine, Department of Medicine, Ulm University Hospital, 89081 Ulm, Germany

* Correspondence: e.isenmann@dshs-koeln.de

Abstract: Background: Various nutritional strategies are increasingly used in sports to reduce oxidative stress and promote recovery. Chokeberry is rich in polyphenols and can reduce oxidative stress. Consequently, chokeberry juices and mixed juices with chokeberry content are increasingly used in sports. However, the data are very limited. Therefore, this study investigates the effects of the short-term supplementation of a red fruit juice drink with chokeberry content or a placebo on muscle damage, oxidative status, and leg strength during a six-day intense endurance protocol. Methods: Eighteen recreational endurance athletes participated in a cross-over high intensity interval training (HIIT) design, receiving either juice or a placebo. Baseline and post-exercise assessments included blood samples, anthropometric data, and leg strength measurements. Results: A significant increase was measured in muscle damage following the endurance protocol in all participants (Δ CK juice: 117.12 ± 191.75 U/L, Δ CK placebo: 164.35 ± 267.00 U/L; $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.17$). No group effects were detected in exercise-induced muscle damage ($p = 0.371$, $\eta^2 = 0.010$) and oxidative status ($p = 0.632$, $\eta^2 = 0.000$). The reduction in strength was stronger in the placebo group, but group effects are missing statistical significance (Δ e1RM juice: 1.34 ± 9.26 kg, Δ e1RM placebo: -3.33 ± 11.49 kg; $p = 0.988$, $\eta^2 = 0.000$). Conclusion: Although a reduction in strength can be interpreted for the placebo treatment, no statistically significant influence of chokeberry could be determined. It appears that potential effects may only occur with prolonged application and a higher content of polyphenols, but further research is needed to confirm this.

Keywords: polyphenol-rich fruit juice; HIIT; muscle damage; oxidative status; leg strength capacity



Citation: Valder, S.; Habersatter, E.; Kostov, T.; Quenzer, S.; Herzig, L.; von Bernuth, J.; Matits, L.; Herdegen, V.; Diel, P.; Isenmann, E. The Influence of a Polyphenol-Rich Red Berry Fruit Juice on Recovery Process and Leg Strength Capacity after Six Days of Intensive Endurance Exercise in Recreational Endurance Athletes. *Nutrients* **2024**, *16*, 1428. <https://doi.org/10.3390/nu16101428>

Academic Editor: David Rowlands

Received: 17 March 2024

Revised: 6 May 2024

Accepted: 7 May 2024

Published: 9 May 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Physical activity can lead to a shift in physiological homeostasis. Depending on the exercise intensity, volume, and load, exercise-induced muscle damage (EIMD), inflammation, and reactive oxygen species (ROS) accumulation can occur [1–4]. High-intensity endurance training, in particular, can lead to a shift in physiological homeostasis, resulting in reduced performance [5,6]. Nutritional strategies are used to restore homeostasis as quickly as possible. One strategy that has been discussed for a while is the use of polyphenol-rich foods [7]. Research suggests that chokeberry juice and mixed juices with chokeberry content may be

a promising source of polyphenols for athletes due to their high levels of phenolic acids, proanthocyanidins, anthocyanins, flavonols, and flavanones [8]. Furthermore, chokeberry juice shows the strongest antioxidant properties compared to other polyphenol-rich beverages, with Trolox equivalence antioxidant capacity (TEAC) values that are four times higher than those of blueberry juice, cranberry juice, or red wine [9]. To combat the effects of increased oxidative stress, reduced performance, and loss of strength, some experts recommend taking polyphenol supplements or fruit juices [10,11].

Initial studies [11] determined that the consumption of polyphenol-rich juices improves the regeneration of skeletal muscles by up to 13% and can reduce muscle soreness by up to 29%. Fuster-Muñoz et al. [12] observed similar effects in endurance-based athletes ($n = 10$) who consumed 200 mL/day of pure polyphenol-rich pomegranate juice in comparison to 200 mL pomegranate juice diluted 1:1 with water ($n = 10$) and a control group not supplementing pomegranate juice ($n = 10$) for over 21 days. They found that subjects who consumed pure fruit juice exhibited lower concentrations of oxidative stress, as measured by carbonyl compounds and malondialdehyde (MDA), than those who consumed diluted pomegranate juice or an isoenergetic seasonal piece of fruit in the control group. Similar beneficial effects were also observed in studies with chokeberry. Stevanović et al. found that the acute consumption of 200 mL of pure chokeberry juice (with a total phenol content of 1296.8 mg) in comparison to 200 mL of placebo juice (identical in composition without polyphenols) consumed with a standardized breakfast before a half marathon supported a significant reduction in exercise-induced platelet activity, as measured by platelet–monocyte and platelet–neutrophil aggregates in 10 healthy male runners. This reduction was related to the increased polyphenol intake [13]. Further positive effects on cytokine profiles and total antioxidant capacity (TAC) were shown in elite polish rowers who consumed 150 mL of chokeberry juice (anthocyanin content 23 and 24 mg/mL, respectively) in three portions of 50 mL daily for four and eight weeks in training camps in comparison to placebo supplementation [14,15]. During the four-week training camp, participants ($n = 9$) in the juice intervention group displayed markedly lower glutathione peroxidase activity after 1 min and significantly reduced superoxide dismutase activity 24 h following the 2000 m rowing ergometer test in comparison to the placebo group ($n = 10$) [14]. After juice intake in the eight-week training camp, the rowers ($n = 10$) exhibited lower post-exercise levels of tumor necrosis factor alpha (TNF- α). Additionally, they exhibited significantly higher total antioxidant capacities (TACs) following a 2000 m rowing ergometer test at the end of the eight-week training camp in comparison to the placebo group ($n = 9$) [15]. These findings suggest an improved oxidative stress status in the juice group compared to other participants. This can be attributed to the increased intake of anthocyanins and flavonoids, which have antioxidant and, in particular, flavonoid scavenger properties, inactivating free radicals [14,15]. However, it is known that oxidative stress is also necessary for muscular adaptations. Sorrenti et al. [16] point out that polyphenols should be ingested before or after a certain period of physical activity and not immediately afterward, to avoid completely suppressing exercise-induced inflammatory processes and inhibiting possible adaptation processes.

In contrast to previous studies, no data are available on the short-term repeated application of chokeberry juice or a red fruit juice drink with chokeberry content during an intensive endurance running training week. Therefore, a commercially available and tasty red fruit juice drink containing 25% chokeberry, 64% red grape, 7% passion fruit, and 2% lemon juice was used. The juice was rated as very palatable in a sensory evaluation. It did not have the same astringent effect as pure chokeberry juice and was, therefore, more suitable as a sports drink. This study aimed to investigate whether a red fruit juice drink with a chokeberry content of 25% and the associated polyphenol intake could already be an adequate natural sports beverage with an impact on exercise-induced muscle damage as well as strength in the lower body. It is also assumed that the ingredients of the red fruit juice drink could influence oxidative stress after the intensive training week.

2. Materials and Methods

2.1. Participants

To determine the sample size, a power analysis (F-tests, ANOVA fixed effects, special, main effects, and interaction) was performed a priori. For the calculation, a medium effect (f) (0.25), an α -error of 0.05, and a power of 0.8 ($1-\beta$ error) were specified. Based on the study design and the two-arm crossover model ($df = 1$), a sample size of 17 subjects (34 in total) was calculated. The power analysis and the study design are based on previous studies [17–19]. The study was successfully completed with 18 subjects, comprising 4 women and 14 men. Figure 1 provides an overview of the recruitment process and the reasons for drop-out.

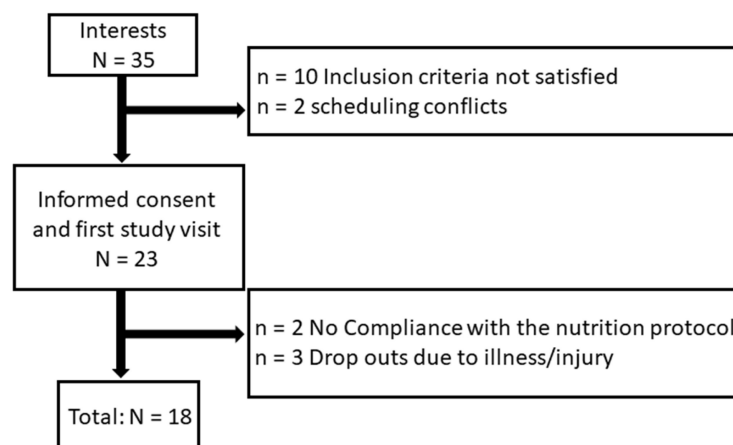


Figure 1. Overview study recruitment.

All participants of the study were recruited from local running groups and endurance courses of the German Sport University Cologne.

They were healthy and generally physically active but not trained specifically. In addition, subjects had to be between 18 and 35 years old, not consume a vegan diet, be non-smokers, have no acute injuries or chronic illnesses, not take any medication, and have a running time for 10,000 m of <55 min for women and <50 min for men. High performance athletes with training volumes of $>100 \text{ km} \times \text{wk}^{-1}$ and individuals trained specifically for national and international competitions with >10 training sessions $\times \text{wk}^{-1}$ or $>10 \text{ h}$ training time $\times \text{wk}^{-1}$ were also excluded [20–22].

Before the subjects were included in the study, they were informed about the study design and objectives and had to give their written consent to participate. All personal data collected were anonymized in compliance with the data protection regulations in Germany.

The entire study design was approved by the local ethics committee of the German Sports University Cologne in August 2022 (Ethics number: 132/2022, date of approval: 22 August 2022) and is in accordance with the Declaration of Helsinki.

2.2. Study Design

The study was designed as a randomized, double-blind trial with a crossover design. To ensure accuracy, there was a washout period of 4 weeks between intervention phases to account for possible training adaptations. The intervention phase, which included a six-day endurance training program, was carried out twice with juice and placebo supplementation. The supplementation intervals were split into a three-day familiarization phase and a six-day intervention phase. Throughout the study, all participants used a nutrition documentation app to record their dietary intake. At the start and finish of each training phase, an initial and baseline examination was conducted, including taking a blood sample, determining anthropometric data such as body weight and height, and measuring leg strength capacity using a velocity-based deep back squat method [23]. Figure 2 displays the entire study design.

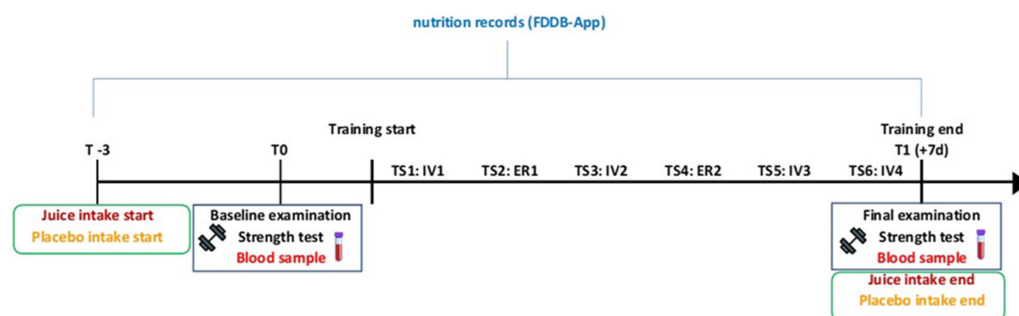


Figure 2. Study design. TS = Training session, IV = Interval training, ER = Endurance run. Pictorial sources: Dumbbell—Free sports icons (flaticon.com).

2.3. Study Beverages

As part of the study, participants were instructed to consume 200 mL of a red fruit juice drink or a placebo every morning and evening after a meal. These drinks were provided by the Eckes-Granini Group. The red fruit juice contained a minimum of 98% fruit juice content, with 64% red grape, 25% chokeberry, 7% passion fruit, and 2% lemon juice, according to the label. The placebo used was an iso-caloric, dark-colored drink that closely resembled the fruit juice in color, taste, and potassium content. However, the polyphenol content of the placebo was minimized to a level of 91 mg/L, in contrast to the 4105.5 mg/L on average found in the red fruit juice (see Table S1 in Supplementary Materials). To distinguish between placebo and fruit juice, the bottles were coded differently and blinded. Only an independent person could later assign the study drinks. The produced drinks were maintained throughout the full storage period at 18 °C in a dark storage room.

2.4. Analysis of Phenolic Ingredients

The UV-VIS spectrophotometer (PerkinElmer, Lambda 365, Waltham, MA, USA (serial number 365K9120205)) was used to determine the total polyphenol content of the raw materials. These measurements were performed using Folin–Ciocalteu reagents (VWR, Darmstadt, Germany, Art. No. ICNA19518690).

The total phenolic content was determined as the equivalent amount of catechin. To establish the linear calibration line, 212.4 mg catechin hydrate was pre-dissolved in a 100 mL volumetric flask with a few milliliters of methanol and then filled up to 100 mL with deionized water. Catechin solutions of 40 mg/L, 200 mg/L, 400 mg/L, 600 mg/L, and 1000 mg/L were then prepared from the stock solution.

To measure the samples, 8.4 mL of deionized water was added using a dispenser. Then, 100 µL of the sample and 500 µL of Folin–Ciocalteu reagent were added, and the solution was shaken using a test tube shaker. For the reagent blank, 100 µL of deionized water was added instead of 100 µL of sample. After a short reaction time of approximately three minutes, 1000 µL of sodium carbonate solution was added to each test tube and mixed well. In the presence of phenolic compounds, a reaction is visible after a short time, as a blue color complex is formed. After one hour, the samples are read at 720 nm against the reagent blank. The ingredients and important measurement parameters of the analyses described can be found in Table S1 in Supplementary Materials.

2.5. Study Day Schedule

All participants arrived at the morning examination after being well-rested without exercise for 48 h and fasting without a meal for 12 h. Anthropometric measurements for bodyweight and height were taken (seca model 2741900099), and a blood sample was collected (T0). After finishing the first part, a warm-up program was initiated according to the NSCA guidelines [24]. Prior to the study, participants were familiarized with the methodology and execution of the squat. In order to accomplish this, three sets of ten repetitions without additional weight on the squat bar were performed twice, each with a rest interval of 5 min. A speed-based approach was selected to minimize the risk of injury

to the musculature during testing for inexperienced weightlifting participants [23]. The Speed4Lift velocity sensor (SL4, Madrid, Spain) was used to record velocity at defined load levels to ensure accurate measurement. This indirect one-repetition maximum (1RM) test commenced with the first load level set at approximately 30% of the participant's self-estimated 1RM. If the 1RM could not be estimated, the first load level was set at 40% of the body weight. Subsequently, additional load levels were introduced at an increase of 20% of the self-proclaimed 1RM or 20% of body weight, respectively, until the speed reached ≤ 0.6 m per s (70% of 1RM and cut off-point for the high reliability of the data [23]). Assuming a linear regression of the force–velocity relation and a mean velocity of the 1RM of the squat at 0.2 m per s, the estimated 1RM (e1RM) was determined [23].

2.6. Endurance Training Protocol

On the following day, the subjects began the six-day endurance training protocol, which consisted of four high-intensity interval training sessions and two endurance running sessions with moderate intensity. A sequence of interval session, endurance run, interval session, endurance run, and two interval sessions at the end was chosen to meet the general guidelines for a HIIT protocol training design [25]. The training intensity was controlled by the individual lactate threshold calculated by the D-mod method (LT(D)) [26] of the study participants and comprised 120% of the LT(D) in the interval units of 5×4 min load (rest 2 min of low-intensity running) and 65% of the LT(D) in the endurance runs. Intensity, number of repetitions, and duration of the interval units, as well as the intensity and duration of the endurance runs, were again set according to the guidelines for a HIIT training design [25]. The LT(D) was determined subject-specifically before the study via a field-level test. In addition, each session always included a warm-up and cool-down phase (low-intensity running) as well as a stretching or agility program before the interval sessions. The documentation of the training process of the study participants was carried out using subject-specific apps (Apple Fitness+, Apple Distribution International Ltd., Cupertino, CA, USA; or Strava, Strava, Inc., San Fransisco, CA, USA). The complete training plan can be found in Figure 3. After the completion of the training protocol, all subjects reappeared the following day fasted (12 h without a meal) in the morning for baseline testing with the repeated collection of anthropometric data, a blood draw (T1), and for the measurement of leg strength using the deep back squat according to the methodology described in the previous section.

TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
Warm-up: 12 min of LIR Mobility: 5–10 min Intervals: 5 × 4 min 120% of LT(D) Break: 2 min of LIR Cool-down: 10 min of LIR	Warm-up: 10 min of LIR Moderate run: 45 min 65% of LT(D) Cool-down: 10 min of LIR	Warm-up: 12 min of LIR Mobility: 5–10 min Intervals: 5 × 4 min 120% of LT(D) Break: 2 min of LIR Cool-down: 10 min of LIR	Warm-up: 10 min of LIR Moderate run: 45 min 65% of LT(D) Cool-down: 10 min of LIR	Warm-up: 12 min of LIR Mobility: 5–10 min Intervals: 5 × 4 min 120% of LT(D) Break: 2 min of LIR Cool-down: 10 min of LIR	Warm-up: 12 min of LIR Mobility: 5–10 min Intervals: 5 × 4 min 120% of LT(D) Break: 2 min of LIR Cool-down: 10 min of LIR

Figure 3. Six-day training plan consisting of four interval units with 120% of the LT(D) and two endurance runs with 65% of the LT(D) as load intensity specification (accompanying warm-up and cool-down phase included). LT(D) = lactate threshold calculated by the D-mod method. LIR = low intensity running.

2.7. Blood Analyses

In order to assess the designated level of training intensity, skeletal muscle-specific creatine kinase (CK) concentration in serum was determined as a marker using a COBAS h 232 point-of-care system (Roche Diagnostic Systems, Rotkreuz, Switzerland).

For the evaluation of the endurance exercise-induced oxidative stress status, oxidized low-density lipoprotein (oxLDL) serum concentrations were measured using the Human oxLDL Adduct Elisa Kit (Bensheim, Germany).

Serum concentrations of interleukins (IL) 6 and 10 were analyzed via Human IL-6 and Human IL-10 Quantikine ELISA Kits (R&D Systems, Minneapolis, MN, USA) to monitor modifications in pro- and anti-inflammatory responses related to endurance exercise training as well as the intake of the polyphenol-rich red fruit juice.

2.8. Nutrition Records

Dietary logging for the duration of the two intervention intervals was performed using the Food Diary Food Database (FDDB) Extender (Food Database GmbH, 28217 Bremen, Germany). The subjects were instructed to keep their diet constant over the two intervention periods and to consume the same foods in each case. Participants were asked to abstain from alcohol and very polyphenol-rich foods such as coffee, fruit juices, cocoa or chocolate, and black and green tea during intervention periods. The food protocols were then transferred to EBISpro 2016 in order to cover a wider range of nutrients.

2.9. Statistical Analyses

The data were analyzed using R version 4.3.0 [27]. The results are presented as means and standard deviations (SD). All parameters underwent a Z transformation at each time point to detect and assess potential outliers. Values exceeding a triple SD were excluded from the analysis. The parameters of the endurance training protocol (training time, training km, endurance km, interval km, and pace/total) as well as the nutritional data (energy, carbohydrate, fat, protein, EAA, and leucine) were analyzed using a paired *t*-test. Q-Q plots, histograms, and the Shapiro–Wilk test were used to test for a normal distribution of the residuals. In instances where data did not conform to a normal distribution (energy and carbohydrate intake per day), the Wilcoxon test, suitable for non-normally distributed datasets, was employed. The raw data of CK, oxLDL, IL-6, and IL-10 were transformed to their decadic logarithm ($\log_{10}$) before data analysis. The transformed data are additionally presented as means and standard error (SE) in Table S3 in Supplementary Materials. Linear mixed-effects regression models were used with time (before vs. after) and group (juice vs. placebo) and their interaction (time $\times$ group) as predictors for the effects of juice on training protocol (R package lme4; [28]).

The Akaike Information Criterion (AIC) and the Bayesian Information Criterion (BIC) were employed to choose the linear mixed-effects regression model that strikes the optimal balance between model fit and complexity. This selection was based on evaluating minimum values in relation to the likelihood function, aiming to identify the model with the highest probability for an effective fit while considering its overall complexity. Due to the high intraclass correlation (ICC = [0.310; 0.792]), random intercepts were assumed. Where necessary (assessed via χ^2 test, AIC, BIC), a random effect for the intervention was assumed (oxLDL, IL-6, IL-10, e1RM, relative e1RM (rel. e1RM)). Shapiro–Wilk tests, Q-Q plots, and histograms were used to determine the normality and homoscedasticity of the model residuals. To review the robustness of the results, we repeated the analyses adjusting for possible covariates of sex, age, and BMI with no further influence on the results. (see Supplementary Materials). As effect size partial η^2 is reported for time effects, group effects, and time $\times$ group interaction. All reported *p*-values were two-tailed with a significance level of $\alpha < 0.050$.

3. Results

The 18 participants consistently followed the study guidelines throughout the research period, including the prescribed beverage intervention and exercise plan where feasible. In the analysis of CK, one subject could not be included due to exceptionally high CK levels at baseline, surpassing values beyond a triple SD in the Z-transformed data. All anthropometric data are shown in Table 1.

Table 1. Overview of subject characteristics.

Sex	Men (14), Women (4)
Age [years]	24.5 ± 3.1
Height [m]	1.79 ± 0.06
Body weight [kg]	73.10 ± 8.30
BMI [kg/m ²]	22.84 ± 1.74

BMI = body mass index.

In both study arms, all participants completed the intensive endurance training protocol with 210.00 ± 00.00 min of exercise and a total of 47.76 ± 9.34 km in the juice condition and 47.40 ± 9.33 km in the placebo condition. With 27.67 ± 7.24 km in the juice treatment and 26.66 ± 7.42 km in the placebo treatment, the kilometers run during the interval sessions were slightly higher than the kilometers run during the endurance run sessions (juice: 20.09 ± 2.49 km; placebo: 20.74 ± 2.40 km). The mean running speed was almost identical for both intervention drinks, at 4.58 ± 0.84 min/km for juice and 4.58 ± 0.81 min/km for placebo. Therefore, there were no statistically significant differences between the two study drinks in any of the training parameters (see Table 2). Individual values can be found in Table S2 in Supplementary Materials.

Table 2. Six-day endurance training protocol documentation for the study conditions of juice and placebo.

Parameter	Juice	Placebo	p-Value
Training time [min]	210.00 ± 00.00	210.00 ± 00.00	---
Training km [km]	47.76 ± 9.34	47.40 ± 9.33	0.654
ER km [km]	20.09 ± 2.49	20.74 ± 2.40	0.094
Interval [km]	27.67 ± 7.24	26.66 ± 7.42	0.075
Pace/total [min/km]	4.58 ± 0.84	4.58 ± 0.81	0.981

ER = endurance run.

3.1. Effects of Six-Day Running and Juice on Skeletal Muscle Damage—Creatine Kinase

To determine the effectiveness of the six-day endurance training program, the concentration of CK in the serum was measured to assess the status of muscle damage.

After the six-day repeated training load (T1 (+7d)), in both groups, CK serum concentrations increased significantly over time ($p \leq 0.001$, $\eta^2 = 0.170$, Figure 4). However, there was no significant group effect ($p = 0.371$, $\eta^2 = 0.010$), and there was also no significant group * time interaction at T1 (post) ($p = 0.976$, $\eta^2 = 0.000$).

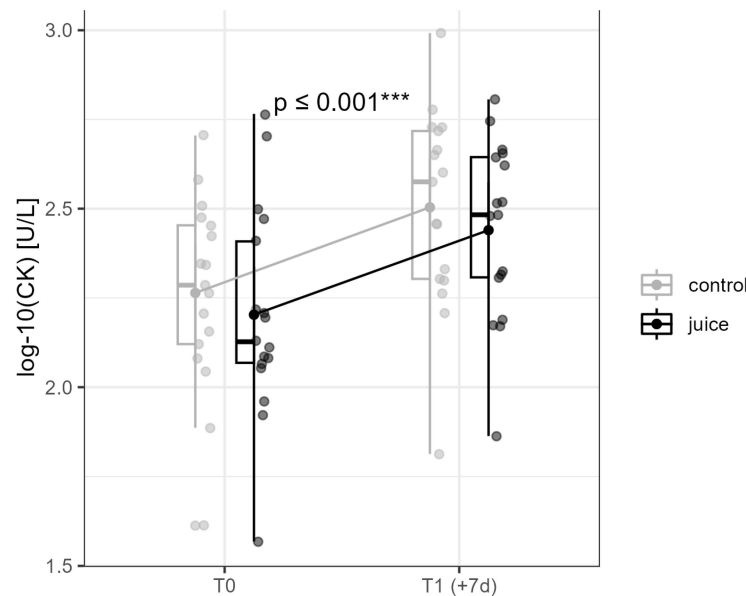


Figure 4. Interaction diagram for CK in the control and juice intervention (before and after an endurance exercise interval of 6 days). CK = creatine kinase. *** ≤ 0.001 .

3.2. Effects of Six-Day Running and Juice on oxLDL

The concentrations of oxLDL, as a marker of oxidative stress, were analyzed in serum at T0 and T1 (+7d) to investigate the effect of training and juice and their possible interactions on endogenous oxidative stress level (Figure 5). No significant changes were detected over time between T0 and T1 (+7d) ($p = 0.120$, $\eta^2 = 0.040$). There were also no significant differences between the groups ($p = 0.632$, $\eta^2 = 0.000$), and no significant interactions between the group and time were observed ($p = 0.354$, $\eta^2 = 0.010$).

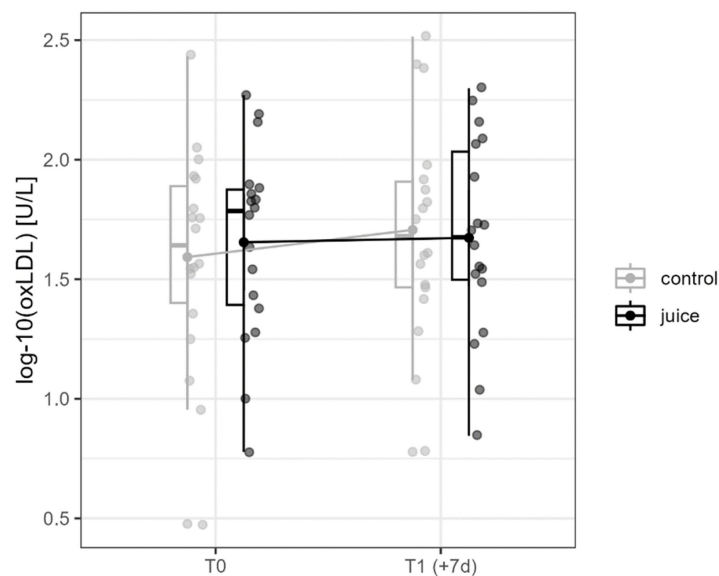


Figure 5. Interaction diagram for oxLDL in the control and juice intervention (before and after an endurance exercise interval of 6 days). oxLDL = oxidized low-density lipoprotein.

3.3. Effects of Juice on Recovery Processes and Strength Capacity following Six-Day Running

To analyze the connection between oxidative stress (related to physical activity), inflammatory responses, and beverage intakes, the serum concentrations of the pro-inflammatory cytokine IL-6 and the anti-inflammatory cytokine IL-10 were determined at T0 and T1 (+7d) (Figure 6).

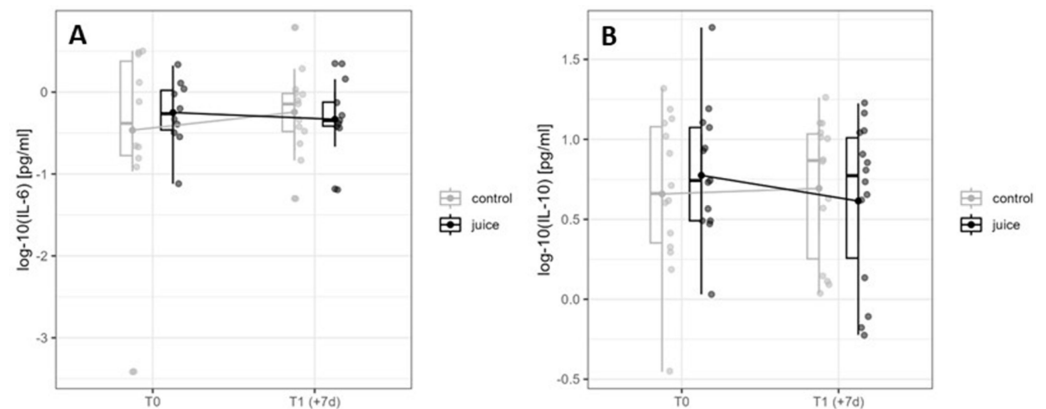


Figure 6. Interaction diagram for IL-6 (A) and IL-10 (B) in the control and juice intervention (before and after an endurance exercise interval of 6 days). IL-6 = Interleukin 6. IL-10 = Interleukin 10.

After the six-day repeated training load, there was no significant change observed in time and group for IL-6 (time: $p = 0.256$, $\eta^2 = 0.040$; group: $p = 0.383$, $\eta^2 = 0.020$; Figure 6A). Likewise, no significant effects were observed for IL-10 (time: $p = 0.737$, $\eta^2 = 0.000$; group: $p = 0.434$, $\eta^2 = 0.010$; Figure 6B). No time group effect was detected at T1 for either parameter (IL-6: $p = 0.278$, $\eta^2 = 0.030$; IL-10: $p = 0.189$, $\eta^2 = 0.040$).

3.4. Effects of Six-Day Running and Juice on e1RM and relative e1RM in Back Squat

After six days of training, in the juice intervention, leg strength increased from 104.22 ± 24.21 kg to 105.56 ± 24.54 kg. In contrast, leg strength decreased from 104.28 ± 22.00 kg to 100.95 ± 17.74 kg when the placebo was consumed (Figure 7A). However, this difference was not statistically significant for time ($p = 0.168$, $\eta^2 = 0.030$), group ($p = 0.988$, $\eta^2 = 0.000$), and time $\times$ group interaction ($p = 0.172$, $\eta^2 = 0.030$). Comparable results are shown for the relative e1RM with no significant effects for time ($p = 0.438$, $\eta^2 = 0.010$), group ($p = 0.941$, $\eta^2 = 0.000$), and time $\times$ group interaction ($p = 0.269$, $\eta^2 = 0.000$, Figure 7B).

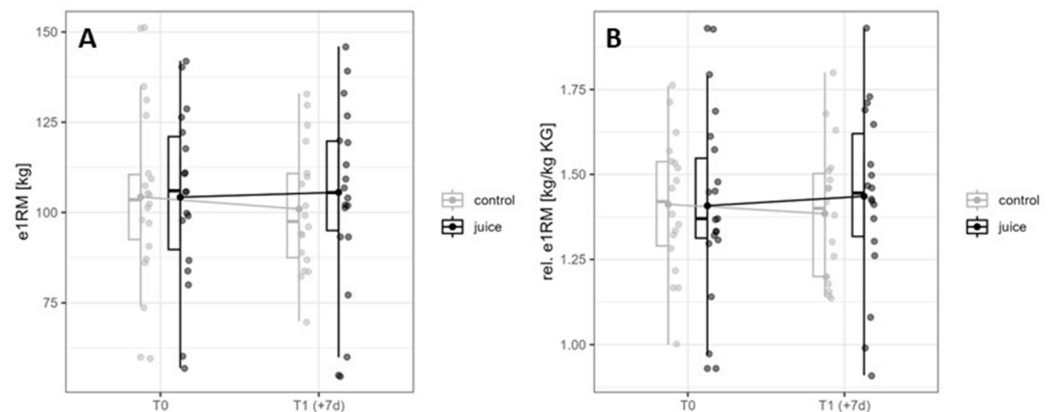


Figure 7. Interaction diagram for e1RM (A) and relative e1RM (B) in the control and juice intervention (before and after an endurance exercise interval of 6 days). e1RM = estimated 1RM. rel. e1RM = relative e1RM.

All results are summarized in Table S3 in Supplementary Materials.

3.5. Evaluation and Comparison of the Nutrient Intake during the Fruit Juice Intervention and Placebo Consumption Phase

The intake of energy, carbohydrates, leucine, and EAA was measured during the juice intervention and placebo consumption phase.

No statistically significant variance was detected in energy, fat, protein, leucine, and essential amino acid (EAA) intake per day between the cases of consuming juice and

placebo. However, carbohydrate intake per day was marginally higher during the placebo consumption phase (refer to Table 3). Unfortunately, it was impossible to determine the actual intake of polyphenols with EBISpro.

Table 3. Intake of energy, carbohydrates, leucine, and EAA during juice intervention and placebo consumption phase.

	Juice Group	Placebo Group	<i>p</i> -Value
Energy [kcal/d]	2598.12 ± 723.73	2650.14 ± 739.60	0.163
Carbohydrates [g/d]	321.79 ± 91.19	330.79 ± 97.09	0.044
% of Energy	49.82 ± 6.51%	51.00 ± 4.97%	
Fat [g/d]	96.50 ± 30.56	97.32 ± 30.01	0.469
% of Energy	32.88 ± 4.11%	32.58 ± 4.20	
Protein [g/d]	103.87 ± 8.43	105.76 ± 8.347	0.095
% of Energy	16.41 ± 2.85%	16.41 ± 2.76%	
Leucine [g/d]	8.38 ± 2.86	8.53 ± 2.83	0.101
EAA [g/d]	50.95 ± 17.139	51.85 ± 17.00	0.099

EAA = Essential amino acids.

4. Discussion

This study aimed to investigate the influence of a short-term application of a polyphenol-rich red fruit juice drink as a naturally based sports beverage with a chokeberry content of 25% during an intense six-day endurance exercise protocol on training-induced skeletal muscle damage (CK serum concentration), oxidative status (oxLDL), inflammatory processes (IL-6 and IL-10), and strength capacity in recreational athletes.

The results clearly indicate that the designed endurance training protocol significantly increased CK serum concentration ($p = 0.001$, $\eta^2 = 0.17$) without sex differences, and there was repetitive loading training stimulation. However, the intake of the study beverages showed no significant effects on CK concentration. These observations are in line with previous studies investigating the effects of strength training [29] or marathon running [30] on serum CK concentration without differences between a polyphenol-rich Montmorency Cherry Juice and a placebo intake [29,30]. Conversely, Pilaczynska-Szczesniak et al. [14] found significantly lower serum CK concentrations after aronia juice application only one min after a 2000 m rowing ergometer test. In contrast to Pilaczynska-Szczesniak et al. [14], the CK concentration was not measured acutely after exercise but 24 h after exercise, which can lead to different results. It is known that the CK concentration can be influenced by various factors, such as performance level or training protocol, and that the peak concentration occurs between 24 and 96 h after exercise [31]. Concerning oxidative stress, similar to Nieman et al. [32], no significant difference in oxLDL concentration was found after exercise or between the treatments. In contrast, previous studies have shown a reduction in oxLDL concentration immediately after exercise [33,34]. It appears that the time of blood sampling in this study and in Nieman et al. [32] was chosen too far away from the last exercise so that no change could be detected. However, initial studies also show that continuous physical activity can also reduce the oxLDL concentration [33–35]. Consequently, no statement can be made regarding whether a polyphenol-rich red berry fruit juice can reduce training-induced oxidative stress. In context, it appears that the performance level and the exercise protocol influence the change in oxLDL concentrations. Studies indicate that marathon runners with low VO₂max values have higher oxLDL concentrations and that intensive exercise induces a higher increase [36,37].

Similar to oxidative stress, no significant time or treatment effect could be observed for IL-6 and IL-10.

This is consistent with the review by Rickards et al. [11], who found no effects on IL-6 of polyphenol-containing foods, juices, and concentrates. However, it has already been shown that consumption of tart cherry juice, which contains polyphenols, can attenuate

cytokine concentrations of the pro-inflammatory IL-6 during prolonged endurance exercise such as a marathon or simulated cycle race [30,38]. The controversial results may be due to the significantly higher serum IL-6 concentrations after a marathon (juice: 41.8 pg/mL vs. placebo: 82.1 pg/mL) [30] compared to the present IL-6 concentrations after the six-day intensive endurance training (juice: 0.74 ± 0.64 pg/mL; placebo: 1.09 ± 1.54 pg/mL). A similar assumption can be made for IL-10, as combined curcumin and pomegranate extract supplementation (1000 mg/d) before (26 d) and after (4 h and 24 h) a half marathon race resulted in significantly higher serum concentrations of the anti-inflammatory cytokine [39]. Additionally, the lack of statistical significance in the cytokine outcomes of this study might be attributed to the polyphenolic composition present in the fruit juice. The commercially available and naturally based red fruit juice drink used in this study contained only 25% chokeberry and, therefore, 821.1 mg polyphenols/200 mL (bottle). Compared to 200 mL of pure chokeberry juice used in the study by Stevanović et al. [13], this is 475.7 mg less polyphenols. It should be emphasized that pure chokeberry juice exhibits a high potassium content of 1969 mg/L [9], while the red fruit juice in our study averages only 1448 mg/L, indicating a difference of 521 mg/L. This variance in potassium intake from pure chokeberry juice might contribute to its beneficial effects. The supplementary potassium could potentially compensate for losses through sweating or potassium ion flux from the muscle membrane during depolarization in neuronal action potentials, thereby promoting muscle regeneration [40].

As a novel approach, this study integrated both molecular and functional parameters to investigate the interplay between muscle damage, polyphenol intake, and subsequent strength loss, a dimension less explored in previous research [41].

As shown in Figure 7, the absolute values of e1RM in the deep squat indicate a positive effect of juice compared to placebo (placebo: $\Delta -3.33 \pm 11.49$; juice: $\Delta 1.34 \pm 9.26$). The absolute loss of strength in the placebo group is similar to previous studies [19]. However, no significant differences over time and treatment were found. This could be due to the velocity sensor methodology used. Even though the e1RM measurement using speed sensors is a valid method, it has some limitations. A decisive factor is the larger standard deviation than when determining the actual maximum force [23]. The study of Hooper et al. [42] also showed no statistically significant results for the consumption of 500 mg of a polyphenol-rich tart cherry juice extract for 7 days in terms of countermovement jump (CMJ) power in 13 men performing six sets of 10 repetitions of squats compared to a placebo. Similar to the results of the study presented here, jump height trended towards significance for the condition of polyphenol intake. As mentioned in the previous section, pure chokeberry juice may have better effects due to its higher potassium content. Recent study results show that low muscle glycogen levels and low intramuscular potassium ion concentrations can contribute to muscle fatigue and loss of performance [43].

Our study participants largely adhered to our directive of abstaining from particularly polyphenol-rich foods and maintaining a consistent diet during both intervention phases. This is supported by the fact that the intake of energy, fat, protein, essential amino acids, and leucine did not significantly differ between the juice and placebo intervention phases [44]. Leucine, found abundantly in high-quality protein sources, is a branched-chain essential amino acid that fuels protein synthesis and curbs protein breakdown. It is, therefore, considered highly relevant for muscle protein synthesis and regeneration [45,46].

While carbohydrate intake was on average ten grams higher during the placebo phase (refer to Table 3), this discrepancy is minimal and likely irrelevant. To put these results into perspective, ten grams of carbohydrates roughly equate to half a banana or two rice cakes. Taken together, no significant differences in nutrient or energy intake were observed that could account for an impact on strength capacity.

Limitations/Outlook

This study introduces novel insights while acknowledging practical limitations inherent in its execution. These should be taken into account when interpreting the results.

OxLDL as a marker of oxidative and exercise-induced stress status showed no statistically significant results, probably because the time of measurement was inadequate. Other studies measure over a window of time from the immediate post-exercise period up to 72 h after exercise [32,35,36]. Changes due to intensive endurance training and juice consumption were probably not recorded in this study because measurements were taken at only one point in time. In addition, the measurement of oxidative stress should be complemented by other markers such as total antioxidant capacity (TAC), glutathione peroxidase, and superoxide dismutase activity, as these have been shown as antioxidant effects of chokeberry juice in studies of intensive endurance exercise [14,15] and are considered to be established markers of the oxidative stress state in exercise [47].

Another limitation is the velocity-based deep back squat method which can only estimate the 1RM and potentially does not produce statistically significant results in the strength test. However, it should be noted that the speed-based approach used in this study has an acceptable level of accuracy compared to conventional 1RM tests, which has been scientifically validated [48].

In addition, the definition of intensity as a percentage of LT(D) in the six-day endurance training protocol can be seen as a limitation, as effort-matched approaches are considered to be a more realistic way for athletes to approach their training [6,49]. However, the training sessions in this study could only be carried out if the subjects were able to train independently according to the defined protocol. In comparison to studies with older people [50], we cannot be sure that the training has been in accordance with the specifications down to the last detail, but this study shows that training tracking works with younger people and gives valid results.

Another potential limitation is the reliance on self-reported data regarding food intake, which may not consistently align with the participants' actual dietary habits. Regrettably, the assessment using EBISpro did not allow for the evaluation of polyphenol intake.

However, as shown in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition (EPIC) study, Europeans consume, on average, 1.2 g of polyphenols per day, and the main food sources are coffee, tea, fruits, and wine [51]. Considering that our participants were instructed to avoid these food groups during the period of the study, we assume that an additional intake of about 1.6 g of polyphenols per day has significantly augmented the overall polyphenol consumption during the fruit juice intervention phase. More polyphenols could have been delivered if a higher proportion of chokeberry or pure chokeberry juice had been used in this study. However, this would have made the juice more unpleasant to taste. The sour, acidic, and astringent taste of chokeberry and chokeberry juice usually limits their use in pure form. However, mixed drinks containing chokeberry juice are already produced industrially and are accepted and consumed by consumers [9]. Finally, this study was able to show that a chokeberry content of 25% in the commercial red fruit juice drink is too low to achieve the effects already shown in studies with pure chokeberry juice. Therefore, for a natural fruit juice-based ergogenic sport beverage, the chokeberry content needs to be increased while maintaining the taste of the beverage.

5. Conclusions

This study explored the impact of a short-term polyphenol-rich red fruit juice drink or placebo on athletes undergoing a six-day endurance training protocol. While the designed training induced significant muscle damage, the study beverage showed no significant effects on exercise-induced muscle damage or oxLDL concentrations, consistent with findings in similar exercise interventions. The investigation integrated molecular and functional parameters, shedding light on the interplay between muscle damage and strength loss, an aspect less explored in previous research. Although the absolute values

of e1RM measured in the deep squat indicate a positive effect of the juice, these are not significant. In future studies, the potential positive effect of polyphenol-rich juice on leg strength should be investigated using a more precise methodology. Despite limitations in the timing of oxLDL measurement and the reliance on self-reported dietary data, our study provides valuable insights into the complex interactions of polyphenol intake and exercise on athletes' physiological responses during intensive endurance training, encouraging further exploration and methodological refinement in understanding the impact of polyphenols in athletes.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/nu16101428/s1>. Table S1: Measurement parameters and ingredients of the placebo and red fruit juice drink. Table S2: Overview of the six-day endurance training protocol documentation. Table S3: Strength test and blood parameters before and after a six-day intensive endurance training time interval for the placebo and juice interventions.

Author Contributions: Conceptualization, S.V. and E.I.; methodology, P.D.; data curation, L.H. and J.v.B.; realization of training plan design, T.K.; writing—original draft preparation, S.V.; writing—review and editing, S.V. and E.I.; visualization, S.V., L.M. and E.H.; collection and analysis of the nutritional data, support with planning, organization and preparation, carrying out the tasting, compiling the study beverages, E.H.; creating and analysis of the test beverages, S.Q.; manufacturing of the test beverages, V.H.; supervision, P.D.; project administration, P.D.; funding acquisition, P.D. editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was financially supported by Eckes-Granini Group GmbH, Nieder-Olm, Germany.

Institutional Review Board Statement: This study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and approved by the Ethics Committee of the German Sports University Cologne (protocol code 132/2022 and date of approval: 22 August 2022).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author. The data are not publicly available due to privacy.

Acknowledgments: We would like to acknowledge Anika Voß for the realization of the laboratory work and Oliver J. Quittmann for the exchange regarding the discussion of the manuscript. The authors would like to thank all test participants for their voluntary participation in this study.

Conflicts of Interest: Authors Sina Quenzer and Volker Herdegen were employed by the Eckes-Granini Group GmbH. The remaining authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest. The funder (Eckes-Granini Group GmbH) had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

Abbreviations

AIC	Akaike Information Criterion
BIC	Bayesian Information Criterion
BMI	Body mass index
CK	Creatine kinase
CMJ	Countermovement jump
e1RM	Estimated 1RM
EIMD	Exercise-induced muscle damage
ER	Endurance run
GAE	Gallic acid equivalent
HIIT	High intensity interval training
IL	Interleukin
Log10	Decadic logarithm
LT(D)	Lactate threshold calculated by the D-mod method
MDA	Malondialdehyde

oxLDL	Oxidized low-density lipoprotein
rel. e1RM	Relative e1RM
ROS	Reactive oxygen species
SD	Standard deviation
SE	Standard error
TAC	Total antioxidant capacity
TEAC	Trolox equivalence antioxidant capacity
TNF- α	Tumor necrosis factor alpha
1RM	One-repetition maximum
VO2max	Maximal oxygen uptake

References

1. Souissi, W.; Bouzid, M.A.; Farjallah, M.A.; Ben Mahmoud, L.; Boudaya, M.; Engel, F.A.; Sahnoun, Z. Effect of Different Running Exercise Modalities on Post-Exercise Oxidative Stress Markers in Trained Athletes. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 3729. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
2. Powers, S.K.; Smuder, A.J.; Kavazis, A.N.; Hudson, M.B. Experimental guidelines for studies designed to investigate the impact of antioxidant supplementation on exercise performance. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2010**, *20*, 2–14. [\[CrossRef\]](#)
3. Powers, S.K.; Jackson, M.J. Exercise-induced oxidative stress: Cellular mechanisms and impact on muscle force production. *Physiol. Rev.* **2008**, *88*, 1243–1276. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
4. Cooper, C.E.; Vollaard, N.B.J.; Choueiri, T.; Wilson, M.T. Exercise, free radicals and oxidative stress. *Biochem. Soc. Trans.* **2002**, *30*, 280–285. [\[CrossRef\]](#)
5. Owens, D.J.; Twist, C.; Cobley, J.N.; Howatson, G.; Close, G.L. Exercise-induced muscle damage: What is it, what causes it and what are the nutritional solutions? *Eur. J. Sport Sci.* **2019**, *19*, 71–85. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
6. Rønnestad, B.R.; Hansen, J.; Vegge, G.; Tønnessen, E.; Slettaløkken, G. Short intervals induce superior training adaptations compared with long intervals in cyclists—An effort-matched approach. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2015**, *25*, 143–151. [\[CrossRef\]](#)
7. D’Angelo, S. Polyphenols: Potential Beneficial Effects of These Phytochemicals in Athletes. *Curr. Sports Med. Rep.* **2020**, *19*, 260–265. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
8. Tolić, M.-T.; Jurčević, I.L.; Krbavčić, I.P.; Marković, K.; Vahčić, N. Phenolic Content, Antioxidant Capacity and Quality of Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) Products. *Food Technol. Biotechnol.* **2015**, *53*, 171–179. [\[CrossRef\]](#)
9. Kulling, S.E.; Rawel, H.M. Chokeberry (*Aronia melanocarpa*)—A review on the characteristic components and potential health effects. *Planta Med.* **2008**, *74*, 1625–1634. [\[CrossRef\]](#)
10. Bowtell, J.; Kelly, V. Fruit-Derived Polyphenol Supplementation for Athlete Recovery and Performance. *Sports Med.* **2019**, *49*, 3–23. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
11. Rickards, L.; Lynn, A.; Harrop, D.; Barker, M.E.; Russell, M.; Ranchordas, M.K. Effect of Polyphenol-Rich Foods, Juices, and Concentrates on Recovery from Exercise Induced Muscle Damage: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients* **2021**, *13*, 2988. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
12. Fuster-Muñoz, E.; Roche, E.; Funes, L.; Martínez-Peinado, P.; Sempere, J.M.; Vicente-Salar, N. Effects of pomegranate juice in circulating parameters, cytokines, and oxidative stress markers in endurance-based athletes: A randomized controlled trial. *Nutrition* **2016**, *32*, 539–545. [\[CrossRef\]](#)
13. Stevanović, V.; Pantović, A.; Krga, I.; Zeković, M.; Šarac, I.; Glibetić, M.; Vidović, N. Aronia juice consumption prior to half-marathon race can acutely affect platelet activation in recreational runners. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2020**, *45*, 393–400. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
14. Pilaczynska-Szczesniak, L.; Skarpanska-Steinborn, A.; Deskur, E.; Basta, P.; Horoszkiewicz-Hassan, M. The influence of chokeberry juice supplementation on the reduction of oxidative stress resulting from an incremental rowing ergometer exercise. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2005**, *15*, 48–58. [\[CrossRef\]](#)
15. Skarpańska-Stejnborn, A.; Basta, P.; Sadowska, J.; Pilaczynska-Szcześniak, L. Effect of supplementation with chokeberry juice on the inflammatory status and markers of iron metabolism in rowers. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2014**, *11*, 48. [\[CrossRef\]](#)
16. Sorrenti, V.; Fortinguerra, S.; Caudullo, G.; Buriani, A. Deciphering the Role of Polyphenols in Sports Performance: From Nutritional Genomics to the Gut Microbiota toward Phytonutritional Epigenomics. *Nutrients* **2020**, *12*, 1265. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
17. Isenmann, E.; Veit, S.; Flenker, U.; Lesch, A.; Lachenmeier, D.W.; Diel, P. Influence of short-term chronic oral cannabidiol application on muscle recovery and performance after an intensive training protocol—A randomized double-blind crossover study. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2024**, *21*, 2337252. [\[CrossRef\]](#)
18. Isenmann, E.; Blume, F.; Bizjak, D.A.; Hundsdörfer, V.; Pagano, S.; Schibrowski, S.; Simon, W.; Schmandra, L.; Diel, P. Comparison of Pro-Regenerative Effects of Carbohydrates and Protein Administered by Shake and Non-Macro-Nutrient Matched Food Items on the Skeletal Muscle after Acute Endurance Exercise. *Nutrients* **2019**, *11*, 744. [\[CrossRef\]](#)
19. Isenmann, E.; Trittel, L.; Diel, P. The effects of alpha lipoic acid on muscle strength recovery after a single and a short-term chronic supplementation—A study in healthy well-trained individuals after intensive resistance and endurance training. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2020**, *17*, 61. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

20. Billat, V.L.; Demarle, A.; Slawinski, J.; Paiva, M.; Koralsztein, J.P. Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2001**, *33*, 2089–2097. [\[CrossRef\]](#)
21. Haugen, T.; Sandbakk, Ø.; Enoksen, E.; Seiler, S.; Tønnessen, E. Crossing the Golden Training Divide: The Science and Practice of Training World-Class 800- and 1500-m Runners. *Sports Med.* **2021**, *51*, 1835–1854. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
22. De Pauw, K.; Roelands, B.; Cheung, S.S.; de Geus, B.; Rietjens, G.; Meeusen, R. Guidelines to classify subject groups in sport-science research. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2013**, *8*, 111–122. [\[CrossRef\]](#)
23. Garcia-Ramos, A.; Jaric, S. Two-Point Method: A Quick and Fatigue-Free Procedure for Assessment of Muscle Mechanical Capacities and the 1 Repetition Maximum. *Strength Cond. J.* **2018**, *40*, 54–66. [\[CrossRef\]](#)
24. Miller, T. *NSCA's Guide to Tests and Assessments*; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 2012; ISBN 9780736083683.
25. Dolci, F.; Kilding, A.E.; Chivers, P.; Piggott, B.; Hart, N.H. High-Intensity Interval Training Shock Microcycle for Enhancing Sport Performance: A Brief Review. *J. Strength Cond. Res.* **2020**, *34*, 1188–1196. [\[CrossRef\]](#)
26. Bishop, D.; Jenkins, D.G.; Mackinnon, L.T. The relationship between plasma lactate parameters, Wpeak and 1-h cycling performance in women. *Med. Sci. Sports Exerc.* **1998**, *30*, 1270–1275. [\[CrossRef\]](#)
27. The R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing: Reference Index. Available online: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf> (accessed on 10 May 2023).
28. Bates, D.; Mächler, M.; Bolker, B.; Walker, S. Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4. *J. Stat. Softw.* **2014**, *67*, 1–48.
29. Bowtell, J.L.; Sumners, D.P.; Dyer, A.; Fox, P.; Mileva, K.N. Montmorency cherry juice reduces muscle damage caused by intensive strength exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2011**, *43*, 1544–1551. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
30. Howatson, G.; McHugh, M.P.; Hill, J.A.; Brouner, J.; Jewell, A.P.; van Someren, K.A.; Shave, R.E.; Howatson, S.A. Influence of tart cherry juice on indices of recovery following marathon running. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2010**, *20*, 843–852. [\[CrossRef\]](#)
31. Brancaccio, P.; Maffulli, N.; Buonoau, R.; Limongelli, F.M. Serum enzyme monitoring in sports medicine. *Clin. Sports Med.* **2008**, *27*, 1–18, vii. [\[CrossRef\]](#)
32. Nieman, D.C.; Capps, C.L.; Capps, C.R.; Shue, Z.L.; McBride, J.E. Effect of 4-Week Ingestion of Tomato-Based Carotenoids on Exercise-Induced Inflammation, Muscle Damage, and Oxidative Stress in Endurance Runners. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2018**, *28*, 266–273. [\[CrossRef\]](#)
33. Neubauer, O.; König, D.; Kern, N.; Nics, L.; Wagner, K.-H. No indications of persistent oxidative stress in response to an ironman triathlon. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2008**, *40*, 2119–2128. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
34. Välimäki, I.A.; Vuorimaa, T.; Ahotupa, M.; Vasankari, T. Effect of Continuous and Intermittent Exercises on Oxidised HDL and LDL Lipids in Runners. *Int. J. Sports Med.* **2016**, *37*, 1103–1109. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
35. Elosua, R.; Molina, L.; Fito, M.; Arquer, A.; Sanchez-Quesada, J.L.; Covas, M.I.; Ordoñez-Llanos, J.; Marrugat, J. Response of oxidative stress biomarkers to a 16-week aerobic physical activity program, and to acute physical activity, in healthy young men and women. *Atherosclerosis* **2003**, *167*, 327–334. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Bachi, A.L.L.; Sierra, A.P.R.; Rios, F.J.O.; Gonçalves, D.A.; Ghorayeb, N.; Abud, R.L.; Victorino, A.B.; Dos Santos, J.M.B.; Kiss, M.A.D.P.; Pithon-Curi, T.C.; et al. Athletes with higher VO₂max present reduced oxLDL after a marathon race. *BMJ Open Sport Exerc. Med.* **2015**, *1*, bmjsem-2015-000014. [\[CrossRef\]](#)
37. Wang, J.-S.; Lee, T.; Chow, S.-E. Role of exercise intensities in oxidized low-density lipoprotein-mediated redox status of monocyte in men. *J. Appl. Physiol.* **2006**, *101*, 740–744. [\[CrossRef\]](#)
38. Bell, P.G.; Walshe, I.H.; Davison, G.W.; Stevenson, E.J.; Howatson, G. Recovery facilitation with Montmorency cherries following high-intensity, metabolically challenging exercise. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2015**, *40*, 414–423. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
39. Tanner, E.A.; Gary, M.A.; Davis, A.A.; Michalik, S.; McFarlin, B.K. Alterations in Systemic Inflammatory Response Following a Half-Marathon Race with a Combined Curcumin and Pomegranate Supplement: A Feasibility Study. *J. Diet. Suppl.* **2021**, *18*, 461–477. [\[CrossRef\]](#)
40. Lindinger, M.I.; Cairns, S.P. Regulation of muscle potassium: Exercise performance, fatigue and health implications. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2021**, *121*, 721–748. [\[CrossRef\]](#)
41. Doma, K.; Gahreman, D.; Connor, J. Fruit supplementation reduces indices of exercise-induced muscle damage: A systematic review and meta-analysis. *Eur. J. Sport Sci.* **2021**, *21*, 562–579. [\[CrossRef\]](#)
42. Hooper, D.R.; Orange, T.; Gruber, M.T.; Darakjian, A.A.; Conway, K.L.; Hausenblas, H.A. Broad Spectrum Polyphenol Supplementation from Tart Cherry Extract on Markers of Recovery from Intense Resistance Exercise. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2021**, *18*, 47. [\[CrossRef\]](#)
43. Cairns, S.P.; Renaud, J.-M. The potassium-glycogen interaction on force and excitability in mouse skeletal muscle: Implications for fatigue. *J. Physiol.* **2023**, *601*, 5669–5687. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
44. Duan, Y.; Li, F.; Li, Y.; Tang, Y.; Kong, X.; Feng, Z.; Anthony, T.G.; Watford, M.; Hou, Y.; Wu, G.; et al. The role of leucine and its metabolites in protein and energy metabolism. *Amino Acids* **2016**, *48*, 41–51. [\[CrossRef\]](#)
45. Campbell, B.I.; La Bounty, P.M.; Wilborn, C.D. Dietary Supplements Used in Combat Sports. *Strength Cond. J.* **2011**, *33*, 50–59. [\[CrossRef\]](#)
46. Norton, L.E.; Layman, D.K. Leucine regulates translation initiation of protein synthesis in skeletal muscle after exercise. *J. Nutr.* **2006**, *136*, 533S–537S. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
47. Michailidis, Y.; Jamurtas, A.Z.; Nikolaidis, M.G.; Fatouros, I.G.; Koutedakis, Y.; Papassotiropoulos, I.; Kouretas, D. Sampling time is crucial for measurement of aerobic exercise-induced oxidative stress. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2007**, *39*, 1107–1113. [\[CrossRef\]](#)

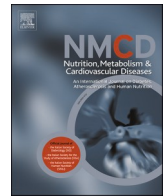
48. Held, S.; Rappelt, L.; Deutsch, J.-P.; Donath, L. Valid and Reliable Barbell Velocity Estimation Using an Inertial Measurement Unit. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 9170. [[CrossRef](#)]
49. Seiler, S.; Jørranson, K.; Olesen, B.V.; Hetlelid, K.J. Adaptations to aerobic interval training: Interactive effects of exercise intensity and total work duration. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2013**, *23*, 74–83. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
50. Hofmann, K.; Flenker, U.; Kiewardt, G.; Diel, P.R. Combinatory Effects of Training and Nutritive Administration of Carbohydrates and Protein via Food on Strength in Postmenopausal Women, and Old Men and Women. *Nutrients* **2023**, *15*, 1531. [[CrossRef](#)]
51. Zamora-Ros, R.; Knaze, V.; Rothwell, J.A.; Hémon, B.; Moskal, A.; Overvad, K.; Tjønneland, A.; Kyrø, C.; Fagherazzi, G.; Boutron-Ruault, M.-C.; et al. Dietary polyphenol intake in Europe: The European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition (EPIC) study. *Eur. J. Nutr.* **2016**, *55*, 1359–1375. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.



Contents lists available at ScienceDirect

Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nmcd

Research Paper

Effects of two weeks of daily consumption of (poly)phenol-rich red berry fruit juice, with and without high-intensity physical training, on health outcomes in individuals with pre-diabetes mellitus

Sarah Valder^a, Friedrich Schick^a, Noel Pietsch^a, Tim Wagner^a, Hanna Urban^a,
 Pauline Lindemann^a, Lena Riemer^a, Sina Quenzer^{c,d}, Volker Herdegen^c, Patrick Diel^b,
 Eduard Isenmann^{b,e,1}, Christian Brinkmann^{a,e,*,1}

^a Department of Preventive and Rehabilitative Sport Medicine, Institute of Cardiovascular Research and Sport Medicine, German Sport University Cologne, Cologne, Germany

^b Department of Molecular and Cellular Sport Medicine, Institute of Cardiovascular Research and Sport Medicine, German Sport University Cologne, Cologne, Germany

^c Eckes-Granini Group GmbH, 55268, Nieder-Olm, Germany

^d Department of Beverage Research, Analysis and Technology of Plant-Based Foods, Geisenheim University, Geisenheim, Germany

^e IST University of Applied Sciences, Düsseldorf, Germany

ARTICLE INFO

Handling Editor: Dr. A. Siani

Keywords:

Superfoods
 (Poly)phenols
 Diabetes
 Training
 Muscle mass
 Peripheral resistance

ABSTRACT

Background and aims: The combination of the consumption of so-called superfoods and regular exercise is a promising approach for the prevention of chronic diseases. This study investigates the effects of two weeks of daily consumption of a red berry fruit juice (containing a high content of chokeberries), with or without high-intensity concurrent strength and endurance training, on body weight and composition, glucose metabolism, oxidative stress, pulse wave velocity, and peripheral resistance in individuals with pre-diabetes mellitus.

Methods and results: Ten subjects participated in two crossover trials, each for 2×14 days: A) juice versus placebo, both without exercise, and B) juice versus placebo, both with concurrent strength and endurance training. Daily consumption of red berry fruit juice led to improvements in peripheral resistance, while no significant changes were observed in the placebo group (ANOVA: time $\times$ group, $p \leq 0.05$). Participants in the juice + training group maintained their relative muscle mass, while those in the placebo + training group experienced a slight decline in their relative muscle mass (ANOVA: time $\times$ group, $p \leq 0.05$).

Conclusion: Short-term repeated consumption of a (poly)phenol-rich red berry fruit juice (in combination with physical training) presents an easy-to-apply strategy to improve health outcomes and may particularly be beneficial for vascular health and muscle mass in individuals with pre-diabetes.

Registration number: DRKS00024969.

1. Introduction

A healthy, balanced diet and regular exercise can help prevent many chronic diseases, such as type 2 diabetes mellitus (T2DM) [1]. The combination of the consumption of so-called superfoods and regular exercise is a promising approach in this context, which can help attenuate oxidative stress and inflammation and improve glycemic control (HbA1c) and glucose dynamics [2–4].

(Poly)phenols as their possible functional ingredients are classified

based on their origin, chemical composition, or biological activity [5–7]. It has been shown in *in vitro* experiments that these substances have antioxidant properties and may exhibit additional antidiabetic effects [8]. Research suggests that chokeberry juice may be an ideal source of (poly)phenols due to its high level of phenolic acids and flavonoids [9–11]. The juice's Trolox equivalence antioxidant capacity (TEAC) is four times higher than that of blueberry juice, cranberry juice, or red wine [10]. A study by Simeonov et al. [12] investigated the acute and chronic effects of consumption of chokeberry juice in 41 individuals

* Corresponding author. German Sport University Cologne, Am Sportpark Müngersdorf 6, 50933, Cologne, Germany.

E-mail address: ch.brinkmann@gmx.net (C. Brinkmann).

¹ Shared senior authorship.

<https://doi.org/10.1016/j.numecd.2025.104121>

Received 18 December 2024; Received in revised form 30 April 2025; Accepted 5 May 2025

Available online 10 May 2025

0939-4753/© 2025 The Authors. Published by Elsevier B.V. on behalf of The Italian Diabetes Society, the Italian Society for the Study of Atherosclerosis, the Italian Society of Human Nutrition and the Department of Clinical Medicine and Surgery, Federico II University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

with T2DM. Within 60 min of consuming 200 mL of chokeberry juice, the participant's blood glucose levels decreased. The consumption of chokeberry juice twice daily for three months resulted in a significant reduction in fasting blood glucose and glycated hemoglobin (HbA1c) levels. A study involving healthy participants supports these findings, showing that the consumption of 100 mL chokeberry juice prior to a rice meal led to a significant reduction in postprandial blood glucose levels [13].

The incidence of pre-diabetes mellitus is rising at an alarming rate [14], but targeted lifestyle interventions can prevent its progression to T2DM [1,15]. Therefore, this study aims to investigate whether the daily consumption of a red fruit juice drink (containing a chokeberry content of $\approx 25\%$), can have positive effects on body weight and composition, glucose metabolism, oxidative stress, pulse wave velocity (PWV), and peripheral resistance in individuals with pre-diabetes mellitus (study section A). Furthermore, the effects of daily consumption of the red fruit juice drink during a concurrent strength and endurance training intervention will be investigated (study section B).

2. Methods

2.1. Study design and participants

Both sections of the study (sections A and B) were designed as crossover trials (2×14 days). Subjects were randomly assigned to study arm 1 (red berry juice) and study arm 2 (placebo). A washout period of one week was used in study section A, while it was four weeks in study section B, to account for any potential effects of the beverage and/or training adaptations. The washout phase durations were similar to those in a previous study [16]. The subjects of arms 1 and 2 were subsequently switched.

The study was carried out with 10 participants in each study section. Six subjects who had taken part in section A also took part in section B. The time between the two trials was at least 8 weeks. Fig. 1 presents an overview of the recruitment process and the reasons for drop-out.

Participants were recruited through a call on the website of the German Sport University Cologne, via flyers distributed in local general practices, diabetology clinics, and fitness centers in Cologne and the surrounding region. All participants had to be in a pre-diabetic state (hemoglobin A1c (HbA1c): 5.7–6.4 %) [17]. Furthermore, they were required to be untrained (i.e., patients who met the World Health Organization (WHO)'s recommendations for physical activity [18,19] or already engaged in strength or regular endurance training (more than 30 min per week) were excluded from the study). Physical activity was assessed through an interview. The subjects were required to be between 40 and 70 years old, to not consume alcohol regularly (no more than one glass of beer or wine daily, not more than 10 g/day for women and 20 g/day for men), be non-smokers, not have any performance-limiting kidney disease, renal disease, neurological disease, oncological disease (<5 years), infections (HIV, hepatitis) or psychiatric and/or addictive disorders. Participants who did not meet these criteria were excluded from the study.

Before the subjects were enrolled in the study, they were fully informed about the study design and objectives and had to provide written consent. The study was approved by the local Ethics Committee of the German Sport University Cologne in April 2023 (059/2023) and registered at the DRKS under trial No. DRKS00024969.

2.2. Study sections A and B

2.2.1. Study section A: Effects of 14 days of daily red berry fruit juice consumption

Participants of study section A consumed either red berry fruit juice or a placebo drink during the 14-day intervention phases. The beverages were consumed twice daily, once in the morning and once in the evening, following a meal. The study subjects of section A were instructed to maintain their usual diet and to avoid regular exercise. At the beginning and end of each intervention phase, blood samples were taken and anthropometric data were recorded.

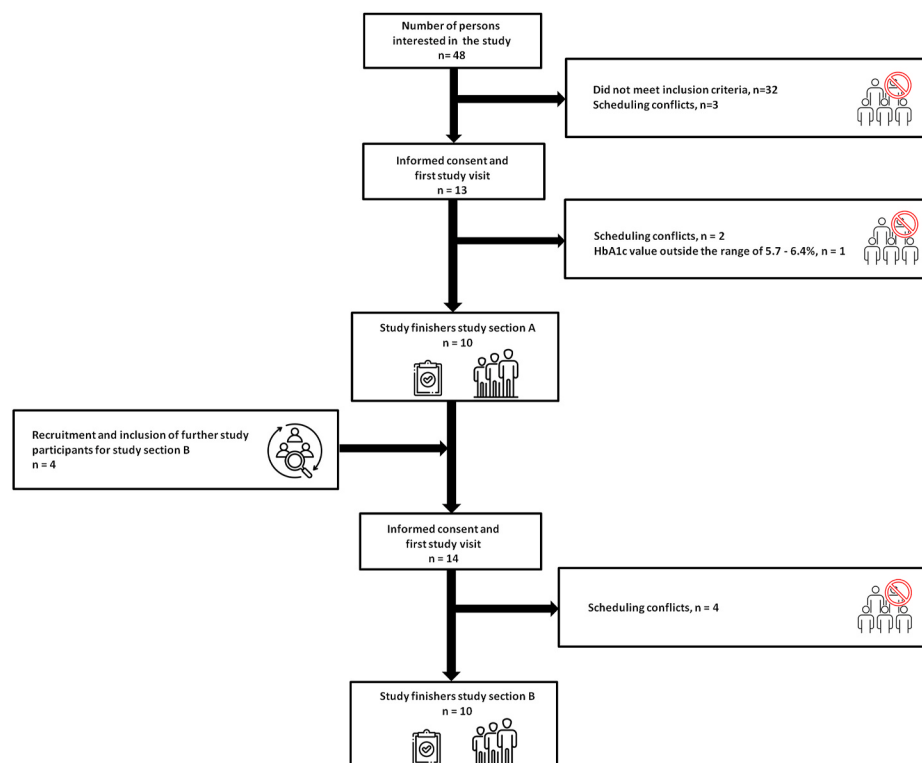


Fig. 1. Study flow diagram. Graphics from [freepik.com](https://www.freepik.com) and [flaticon.com](https://www.flaticon.com).

2.2.2. Study section B: Effects of 14 days of daily red berry fruit juice consumption during a concurrent strength and endurance training intervention

Participants of study section B consumed either red berry fruit juice or a placebo drink during the 14-day intervention phases. The beverages were consumed twice daily, once in the morning and once in the evening, following a meal. Additionally, the participants engaged in a concurrent strength and endurance training program. A cycling ergometer test was performed prior to the start of the training intervention to assess whether the subjects were physically fit enough to participate in the program. At the beginning and end of each intervention phase, blood samples were taken and anthropometric data were recorded. Furthermore, three 24-h dietary recalls were conducted at regular intervals throughout each training phase.

2.3. Study beverages used in study sections A and B

Participants were instructed to consume 200 mL of red berry fruit juice or a placebo drink every morning and evening after a meal. These drinks were specially provided for the study by the Eckes-Granini Group (Nieder-Olm, Germany). The red fruit juice contained a minimum of 98 % fruit juice content, comprising 64 % red grapes, 25 % chokeberries, 7 % passion fruits, and 2 % lemon juice without added sugar. The placebo drink was isocaloric, had almost the same potassium content (1498 mg/L versus 1429 mg/L), and closely resembled the fruit juice in color, taste and sugar content but had a significantly lower (poly)phenol content, namely 91 mg/L compared to 4100 mg/L found in the red berry juice drink (Table S1). The bottles of both drinks were coded and blinded to the participants and stored at 18 °C in a dark room until they were ready for use in the study.

2.4. Analysis of phenolic ingredients of study beverages

The UV-VIS spectrophotometer (Lambda 365, PerkinElmer, Waltham, United States) was used to measure the total (poly)phenol content of the study drinks. The measurements were performed using Folin-Ciocalteu reagents (VWR, Darmstadt, Germany). The total (poly)phenol content was expressed as the equivalent amount of catechin. To establish the linear calibration line, 212.4 mg catechin hydrate was pre-dissolved in a volumetric flask with a 5 mL of methanol and then diluted to 100 mL with deionized water. Catechin solutions of 40 mg/L, 200 mg/L, 400 mg/L, 600 mg/L and 1000 mg/L were then prepared from this stock solution. To measure the samples, 8.4 mL of deionized water was added using a dispenser. Subsequently, 100 µL of the sample and 500 µL Folin-Ciocalteu reagent were shaken using a test tube shaker. A reagent blank was prepared using 100 µL of deionized water in place of 100 µL of the sample. After a short reaction time of approximately 3 min, 1000 µL of sodium carbonate solution was added to each test tube and mixed well. In the presence of phenolic compounds, a reaction was soon visible (blue color complex). After 1 h, the samples were read out at 720 nm against the reagent blank. The results from this analysis are available in the Supplementary Material in Table S1.

2.5. Pre- and post-intervention measurements in study sections A and B

2.5.1. Body weight and body composition

All subjects were examined in the morning after they had rested (no exercise for 48 h) and fasted (12 h without food). Anthropometric data were collected by measuring their height (Seca Mod: 2741900099; Seca Germany; Hamburg, Germany), weight (Seca Medical Body Composition Analyser, Seca Germany; Hamburg, Germany), and waist circumference. The participants' body composition was measured using bioelectrical impedance analysis (BIA), with an alternating sinusoidal electric current of 400 µA at 50 kHz. For the BIA measurement, each subject lay horizontally on a medical couch with limbs slightly spread apart from the body for 10 min [20]. Disposable tab electrodes

(BIATRODES Akern Srl; Florence, Italy) were placed on the right side at the metacarpal and metatarsal sites of the right wrist and ankle [21]. After the measurements were performed (BIA Akern 101, Akern s.r.l.; Pisa, Italy), data were processed using BodyGramPro software (Version 3.0, Akern, Firenze, Italy) [22]. Relative fat mass (fat mass in relation to total body weight) and relative muscle mass (skeletal muscle mass in relation to total body weight) were determined.

2.5.2. Pulse wave velocity and peripheral resistance

Following another 5-min resting period, PWV and peripheral resistance were measured using the "Mobil-O-Graph" (PWA, I.E.M. GmbH, Stolberg, Germany) [23,24].

2.5.3. Blood analyses

Finally, a blood sample was collected. Effects on glucose metabolism were assessed by measuring fasting glucose (Atellica CH, Siemens Healthineers AG; Forchheim, Germany) and HbA1c (Tosoh G11, Tosoh Corporation; Tokyo, Japan). Insulin concentrations were also determined (Atellica IM, Siemens Healthineers AG; Forchheim, Germany). The homeostasis model assessment of insulin resistance (HOMA-IR) index was calculated based on the respective blood glucose and insulin concentrations using the formula: HOMA index = (fasting insulin (µU/mL) x fasting glucose (mg/dl))/405 [25]. Serum concentrations of interleukin (IL)-6 and thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) were measured using the Human IL-6 Quantikine ELISA Kit (R&D Systems, Minneapolis, United States) and the TBARS ELISA Kit (BT LAB, Shanghai, China).

2.6. Concurrent strength and endurance training program in study section B

The training protocol consisted of three sessions/week. All subjects completed six training sessions in addition to consuming their assigned beverage during the 14-day training intervention period. The recovery period between each training session was at least 48 h.

All training sessions were conducted and documented by a team of qualified coaches from the German Sport University Cologne. The training program followed the recommendations of the German Diabetes Association (DDG) for physical activity, suggesting either a minimum of 150 min per week of moderate-intensity exercise or 75 min per week of vigorous-intensity exercise, depending on the individual's physical capacity [26]. Each training session consisted of two 30-min intervals of very brisk walking, performed at an intensity at which the participants could no longer talk to each other without being out of breath. Between the walking intervals, all study participants engaged in bodyweight strength exercises. A high-intensity functional fitness training was selected to maximize training stimulation [27,28]. The prescribed exercises (push-ups, rows, dips, lunges, step-ups and squats) were performed using the 'Every Minute on the Minute' (EMOM) and 'As Many Repetitions As Possible' (AMRAP) approaches [27]. The training sessions were characterized by a high degree of exercise time and short recovery phases between the different exercises. Individual intensity was adjusted by modifying the number of repetitions and/or the range of motion. Each training session ended with stretching exercises, such as side, shoulder, triceps, quad, standing calf, neck or hamstring stretches.

2.7. 24-hour dietary recalls

In both study sections A and B, participants were instructed to maintain their usual diet. They were asked to abstain from consuming alcohol and foods rich in (poly)phenols such as coffee, fruit juices other than the one provided for the study, cocoa or chocolate, and black and green tea during the intervention periods. In study section B, three separate 24-h dietary recalls were conducted during each arm for two weekdays and one day on the weekend ($2 \times 3 = 6$ dietary recalls per

person in total), all on days when the exercise program was conducted. The 24-h dietary recalls were analyzed using the EBISpro software (Version 2011, Willstätt, Germany).

2.8. Statistical analyses

Data were analyzed using the SPSS software, version 29.0.0.0 (IBM SPSS Statistics, Ehningen, Germany). The results are presented as mean values and standard deviations (SD). Values exceeding a triple SD were excluded from the analysis. QQ plots, histograms, and the Shapiro-Wilk test were used to assess data distribution. All normally distributed outcomes were analyzed using an unpaired *t*-test to identify potential significant differences in baseline values. If data were not normally distributed (HOMA-IR index, TBARS (section A), and TBARS and peripheral resistance (section B)), the Mann-Whitney *U* test was performed. A repeated-measure mixed analysis of variance (mixed ANOVA) was conducted, with the within-subject factor being time (before vs. after) and the between-subject factor being group (juice vs. placebo). The HOMA-IR index and TBARS data sets (section A) as well as the peripheral resistance data set (section B) were log-transformed (log10) prior to the ANOVA procedure due to the fact that residuals were not normally distributed. For the same reason, the TBARS data set (section B) was transformed using the Johnson transformation prior to further analysis. A Bonferroni-adjusted post-hoc analysis was conducted. The effect size partial η^2 is reported for time effects and time $\times$ group interactions. Dietary data (intake of energy, carbohydrates, different types of dietary sugars, proteins, leucine, and fats) were analyzed using a paired *t*-test. All reported *p*-values were two-tailed, with the significance level set at $p < 0.05$.

3. Results

3.1. Study section A: Effects of 14 days of daily red berry fruit juice consumption

The characteristics of the study participants of study section A are presented in Table 1.

Study section A aimed to assess the impact of 14 days of red berry fruit juice consumption on body weight and composition, glucose metabolism, oxidative stress, pulse wave velocity, and peripheral resistance. The results are summarized in Table 2. No significant differences between groups were observed at baseline.

Peripheral resistance exhibited a time $\times$ group interaction effect ($p = 0.010$, partial $\eta^2 = 0.312$). Post-hoc tests revealed a significant decrease in peripheral resistance in the juice group ($p = 0.035$) but no significant change in the placebo group ($p = 0.093$).

3.2. Study section B: Effects of 14 days of daily red berry fruit juice consumption during a concurrent strength and endurance training intervention

The characteristics of the study participants of study section B are presented in Table 3.

Study section B aimed to assess the impact of 14 days of red berry fruit juice consumption with a concurrent strength and endurance training on body weight and composition, glucose metabolism,

oxidative stress, PWV, and peripheral resistance. The results are summarized in Table 4.

There were no significant differences between the groups at baseline. Muscle mass in relation to body weight showed a time $\times$ group interaction effect ($p = 0.026$, partial $\eta^2 = 0.247$). Post-hoc tests revealed a significant decrease in relative muscle mass in the placebo group ($p = 0.048$) while no significant change was observed in the juice group ($p = 0.205$).

3.3. Food intake during the training intervention

The data from the three 24-h dietary recalls provided information on the intake of energy, carbohydrates, different types of dietary sugars, proteins, leucine, and fats during both the juice and placebo consumption phases.

No statistically significant differences were observed in the nutritional variables.

4. Discussion

This study aimed to investigate the effects of a two-week daily intake of a (poly)phenol-rich red berry fruit juice with a chokeberry content of 25 % alone and in combination with a concurrent strength and endurance training program on body weight and composition, glucose metabolism, oxidative stress, PWV, and peripheral resistance in individuals with pre-diabetes mellitus. The consumption of juice alone (study section A) led to a significant reduction in peripheral resistance. When combined with training (study section B), the juice intake resulted in the maintenance of relative muscle mass, whereas a loss of relative muscle mass was recorded in the placebo + training group.

The indicated improvement in peripheral resistance in the juice group in study section A (time $\times$ group interaction effect), which was accompanied by an improvement in PWV (time effect), is in line with the results of Le Sayec et al. [29]. They found a significant reduction in the PWV in prehypertensive men and women (systolic blood pressure: 121–139 mmHg and/or diastolic blood pressure: 81–89 mmHg) aged 40–70 years, who had consumed one capsule of a (poly)phenol-rich chokeberry extract with 106 mg total (poly)phenols for 12 weeks. This suggests that the consumption of chokeberry ingredients may have a beneficial effect on vascular health. Reductions in peripheral resistance and PWV observed in the present study are positive adaptations because they indicate reduced arterial stiffness, which is a predictor of cardiovascular events [30]. Underlying mechanisms may include, but are not limited to, (poly)phenol-dependent increases in microbial diversity with changes in metabolite levels and the anti-inflammatory state, and reductions in systemic oxidative stress levels, thereby improving vascular health and the bioavailability of nitric oxide as a potent vasodilator [31–37]. However, the decreases in PWV observed in this study in both study groups (juice and placebo) require more clarification. It must be considered that both the red berry fruit juice and the placebo drink, supplemented twice daily, provided a substantial amount of potassium (approximately 600 mg/day), which might have also contributed to the positive effects on PWV [38–40]. A study has demonstrated that low potassium intake was associated with increased arterial stiffness [39]. This could also explain why a trend towards a change in PWV was observed in study part B (time effect: $p = 0.051$), where there was also no time $\times$ group interaction.

Beyond possible positive effects on vascular health, further beneficial effects of red berry juice consumption became evident in this study. A noteworthy finding is that the group that consumed the red berry fruit juice during the training intervention did not experience a loss of relative muscle mass, while there was a decrease in relative muscle mass in the placebo group post-training (time $\times$ group interaction). Total body mass was not significantly changed in any group. This suggests that the juice intake may have had a muscle-preserving effect. (Poly)phenols have been described as bioactive molecules that can attenuate muscle

Table 1
Subjects' characteristics (study section A).

Sex	males (4), females (6)
Age	62.4 $\pm$ 7.7
Height [cm]	171.6 $\pm$ 11.0
Weight [kg]	81.5 $\pm$ 18.6
Waist circumference [cm]	99.4 $\pm$ 16.6
BMI (kg/m ²)	28.3 $\pm$ 6.7

BMI = Body mass index.

Table 2

Body weight and composition, glucose metabolism, oxidative stress, pulse wave velocity, and peripheral resistance in study section A.

Variable	Unit	JUICE			PLACEBO			p-value		η^2	
		T0	T1	Δ	T0	T1	Δ	time	time x group	time	time x group
Body mass	[kg]	81.53 $\pm$ 18.66	81.37 $\pm$ 18.61	-0.16 $\pm$ 0.34	81.60 $\pm$ 18.50	81.52 $\pm$ 18.44	-0.08 $\pm$ 0.88	0.440	0.779	0.033	0.005
Relative fat mass	[%]	37.86 $\pm$ 10.38	37.82 $\pm$ 10.07	-0.04 $\pm$ 1.72	37.36 $\pm$ 10.11	38.21 $\pm$ 9.97	0.85 $\pm$ 2.25	0.380	0.334	0.043	0.052
Relative muscle mass	[%]	36.29 $\pm$ 6.19	37.38 $\pm$ 5.35	1.09 $\pm$ 2.14	36.69 $\pm$ 5.34	35.96 $\pm$ 5.61	-0.73 $\pm$ 2.10	0.709	0.070	0.008	0.170
HOMA-IR index n = 9		2.34 $\pm$ 1.14	2.30 $\pm$ 1.52	-0.27 $\pm$ 1.31	2.27 $\pm$ 1.66	2.88 $\pm$ 2.04	0.32 $\pm$ 1.04	0.949 ^a	0.397 ^a	0.000 ^a	0.045 ^a
HbA1c	[%]	6.01 $\pm$ 0.27	6.05 $\pm$ 0.27	0.04 $\pm$ 0.08	5.96 $\pm$ 0.26	5.95 $\pm$ 0.23	-0.01 $\pm$ 0.09	0.445	0.210	0.033	0.086
IL-6	[pg/mL]	8.49 $\pm$ 4.37	8.84 $\pm$ 4.11	0.35 $\pm$ 2.39	8.69 $\pm$ 6.33	8.85 $\pm$ 5.14	0.16 $\pm$ 3.97	0.729	0.898	0.007	0.001
TBARS	[nmol/mL]	6.92 $\pm$ 6.31	7.25 $\pm$ 7.41	0.32 $\pm$ 1.29	6.32 $\pm$ 5.30	6.50 $\pm$ 5.31	0.18 $\pm$ 0.61	0.431 ^a	0.383 ^a	0.035 ^a	0.043 ^a
PWV	[m/s]	9.16 $\pm$ 1.27	8.98 $\pm$ 1.21	-0.18 $\pm$ 0.24	9.20 $\pm$ 1.22	8.95 $\pm$ 1.26	-0.25 $\pm$ 0.28	0.002	0.555	0.431	0.020
Peripheral resistance	[s*mmHg/mL]	1.34 $\pm$ 0.15	1.23 $\pm$ 0.19	-0.10 $\pm$ 0.09	1.26 $\pm$ 0.23	1.34 $\pm$ 0.20	0.08 $\pm$ 0.18	0.726	0.010	0.007	0.312

HbA1c = Hemoglobin A1c, HOMA-IR = Homeostasis model assessment of insulin resistance; PWV = Pulse wave velocity; TBARS = Thiobarbituric acid reactive substances.

^a Values refer to the transformed data.

Table 3

Subjects' characteristics (study section B).

Sex	males (3), females (7)
Age	60.7 $\pm$ 7.4
Height (cm)	176.1 $\pm$ 8.4
Weight [kg]	85.8 $\pm$ 17.8
Waist circumference [cm]	99.8 $\pm$ 14.4
BMI (kg/m ²)	28.0 $\pm$ 7.2

BMI = Body mass index.

atrophy and enhance muscle health [41,42].

Several factors may have contributed to the loss of relative muscle mass in the training + placebo group. It is unclear whether the subjects were in a caloric surplus during the training program. A meta-analysis has shown that muscle hypertrophy is constrained during periods of caloric restriction [43]. In addition, depending on the intensity and volume of exercise, particularly in individuals who are not regularly engaged in physical activity, exercise-induced muscle damage (EIMD), accompanied by inflammation and the accumulation of reactive oxygen species, can occur and result in a loss of muscle mass [44–49]. (Poly)phenols could have reduced inflammation and oxidative stress thereby contributing to the preservation of muscle mass. However, there was no significant change in baseline oxidative stress (TBARS) in this study. Increases in oxidative stress can, however, occur transiently in a relatively short timeframe following acute exercise [50].

Another explanation for the loss of relative muscle mass may be that the participants' protein intake was insufficient (1–2.0 g of protein/kg body weight/day is recommended for individuals aged 60+ who engage in strength training) [51–53]. Analysis of the 24-h dietary recalls revealed that the subjects in this study consumed 0.96 $\pm$ 0.22 g of protein/kg body weight in the juice group and 0.92 $\pm$ 0.21 g of protein/kg body weight in the placebo group. These values are below the recommended values for people aged 60+ who engage in strength training [51–53]. An adequate protein intake is of particular importance in older adults to maximize the effects of strength training [52,54]. However, protein consumption was similar between groups.

The beneficial effects of chokeberry consumption on muscle mass observed in the present study are in line with the findings of previous

studies. Olechno et al. [55] found that the daily consumption of 100 mL chokeberry juice (with a total (poly)phenol content of 4566 mg gallic acid equivalent/kg) for 60 days resulted in increased muscle mass among metabolically healthy volunteers. Current research identified biological mechanisms that could explain the effects of chokeberries on muscle mass. In an animal study involving rats, ursolic acid from a chokeberry extract was administered for seven days. Following repeated electrical stimulation of muscles, the supply of ursolic acid increased rapamycin complex 1 (mTORC1) activity [55]. Moreover, chokeberry extract had a positive impact on myogenic differentiation, promoting the formation of multinucleated myotubes through the activation of the Akt pathway in C2C12 myoblasts [56]. In summary, these research findings suggest that chokeberry ingredients may have a beneficial effect on muscle metabolism. Other methods of body composition measurement, such as DXA, may be useful in the future to confirm the current results. It should also be noted that there may be differences in metabolism between sexes. However, no subgroup analyses were performed in the present study due to the small sample size.

4.1. Limitations

The relatively short duration of the intervention is a notable limitation of this study. It is likely that longer intervention periods might have produced more pronounced effects on the outcomes. Another limitation is the chokeberry content in the red berry fruit juice drink. A higher proportion of chokeberry content or the use of pure chokeberry juice would increase the amount of (poly)phenols and of other biochemical ingredients. In this study, 820 mg of (poly)phenols were contained in a 200 mL bottle. Compared to 200 mL of pure chokeberry juice (used in the study by Stevanović et al. [57]), there is a difference of 475.7 mg (poly)phenols. However, the sour, acidic, and astringent taste of chokeberry juice usually leads to aversion by consumers to its pure form. In contrast, mixed drinks containing chokeberries are well-accepted by consumers [10]. In order to improve taste and consumer acceptance, a significant amount of grape fruit juice (64 %) was added to the chokeberry juice in this study, which may also have health-related ergogenic effects [58]. Further limitations of the study are the small number of study participants in each study section and the lack

Table 4
Body weight and composition, glucose metabolism, oxidative stress, pulse wave velocity, and peripheral resistance in study section B.

Variable	Unit	JUICE		PLACEBO		Δ	p-value	η^2	
		T0	T1	T0	T1			time	time x group
Body mass	[kg]	85.59 ± 18.24	85.78 ± 17.61	85.81 ± 17.73	85.82 ± 17.47	0.01 ± 1.23	0.673	0.703	0.008
Relative fat mass	[%]	38.77 ± 10.54	39.14 ± 9.86	39.21 ± 8.99	39.12 ± 9.12	-0.09 ± 0.89	0.582	0.366	0.046
Relative muscle mass	[%]	37.30 ± 6.54	37.63 ± 6.62	37.27 ± 6.24	36.75 ± 6.30	-0.52 ± 0.82	0.578	0.026	0.247
HOMA-IR index		2.85 ± 1.74	2.84 ± 1.80	2.55 ± 1.34	2.43 ± 1.16	-0.12 ± 0.78	0.749	0.795	0.004
HbA1c	[%]	5.87 ± 0.25	5.81 ± 0.31	5.93 ± 0.23	5.87 ± 0.26	-0.06 ± 0.12	0.267	1.00	0.068
IL-6	[pg/mL]	14.02 ± 7.09	11.83 ± 4.04	12.32 ± 4.31	13.91 ± 5.31	1.59 ± 3.51	0.796	0.120	0.004
TBARS	[nmol/mL]	4.94 ± 4.66	6.96 ± 7.64	5.29 ± 5.33	4.67 ± 4.69	-0.62 ± 0.92	0.723 ^a	0.479 ^a	0.007 ^a
PWV	[m/s]	8.66 ± 1.08	8.45 ± 0.99	8.70 ± 1.05	8.59 ± 1.11	-0.11 ± 0.36	0.051	0.523	0.195
Peripheral resistance	[s*mmHg/mL]	1.17 ± 0.16	1.21 ± 0.11	1.21 ± 0.19	1.24 ± 0.17	0.03 ± 0.18	0.367 ^a	0.809 ^a	0.045 ^a

HbA1c = Hemoglobin A1c; HOMA-IR = Homeostasis model assessment of insulin resistance; PWV = Pulse wave velocity; TBARS = Thiobarbituric acid reactive substances.
^a Values refer to the transformed data.

of baseline information on the subjects' dietary habits. A precise documentation of the intake of (poly)phenols prior to the study could provide valuable information and explain changes in the results. An adjustment for baseline total intake of (poly)phenols should be considered in future studies and statistical analyses. The lack of information on the uptake of further (poly)phenols during the study, beyond those provided by the red berry juice, should also be noted as a limitation. (Poly)phenols could have come from other food sources, which may have influenced the intervention's effectiveness.

5. Conclusion

Short-term daily consumption of (poly)phenol-rich red berry fruit juice (combined with high-intensity concurrent strength and endurance training) may offer benefits for vascular health and muscle mass in individuals with pre-diabetes. In particular, consumption of red berry fruit juice showed improvements in peripheral resistance and prevented a loss of relative muscle mass during the training. Further studies should explore the long-term effects and further clarify underlying mechanisms.

Informed consent statement

Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Artificial intelligence (AI) statement

No AI was used for the preparation of the manuscript.

Data availability statement

The data presented in this study are available from the corresponding author on reasonable request.

Author contributions

SV, PD, EI, and CB: conceptualization; SV, FS, NP, TW, HU, PL, LR, SQ, VH, PD, EI, CB: methodology; FS, NP, TW, HU, PL and SV: data curation and analysis; SV: writing—original draft preparation; SV, EI and CB: writing—review and editing; PD, EI and CB: supervision; PD and CB: project administration; PD, EI, CB: funding acquisition. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Ethics declaration

This study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and approved by the Ethics Committee of the German Sport University Cologne (059/2023, date of approval: 25 April 2023).

Funding

This project was funded by a grant from the German Diabetes Foundation (Deutsche Diabetes Stiftung DDS), grant number FP-0456-2023. The Eckes-Granini Group provided the beverages for the study.

Declaration of competing interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests: Sina Quenzer and Volker Herdegen are employed by the Eckes-Granini Group GmbH. Christian Brinkmann is a member of the Abbott Advisory Board and received honoraria from Novo Nordisk and Lilly. The remaining authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest. The companies and the German Diabetes Foundation had no role in the design of the study, in

the collection, analyses, or interpretation of data, in the writing of the manuscript or in the decision to publish the results.

Acknowledgments

The authors would like to thank Anke Schmitz and Anika Voß for their technical assistance. They are also grateful to all volunteers who participated in the study, as well as the German Diabetes Foundation (DDS) and the Eckes Granini-Group for sponsoring the study.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2025.104121>.

References

- [1] Kolb H, Martin S. Environmental/lifestyle factors in the pathogenesis and prevention of type 2 diabetes. *BMC Med* 2017;15:131. <https://doi.org/10.1186/s12916-017-0901-x>.
- [2] Brinkmann C. Physical activity to combat type 2 diabetes mellitus – biomedical research and sports therapy 2.0. *Dtsch Z Sportmed* 2020;71:139–40. <https://doi.org/10.5960/dzsm.2020.440>.
- [3] Pires C. Superfoods for type 2 diabetes: a narrative review and proposal for new international recommendations. *Medicina (Kaunas, Lithuania)* 2023;59. <https://doi.org/10.3390/medicina59071184>.
- [4] Davis DW, Navalta JW, McGinnis GR, et al. Effects of acute dietary polyphenols and post-meal physical activity on postprandial metabolism in adults with features of the metabolic syndrome. *Nutrients* 2020;12. <https://doi.org/10.3390/nu12041120>.
- [5] Cásedas G, Les F, Gómez-Serranillos MP, et al. Anthocyanin profile, antioxidant activity and enzyme inhibiting properties of blueberry and cranberry juices: a comparative study. *Food Funct* 2017;8:4187–93. <https://doi.org/10.1039/c7fo01205e>.
- [6] Kashi DS, Shabir A, Da Boit M, et al. The efficacy of administering fruit-derived polyphenols to improve health biomarkers, exercise performance and related physiological responses. *Nutrients* 2019;11. <https://doi.org/10.3390/nu11102389>.
- [7] Tsao R. Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols. *Nutrients* 2010;2: 1231–46. <https://doi.org/10.3390/nu2121231>.
- [8] Adisakwattana S, Ruengsamran T, Kampa P, et al. In vitro inhibitory effects of plant-based foods and their combinations on intestinal α -glucosidase and pancreatic α -amylase. *BMC Compl Alternative Med* 2012;12:110. <https://doi.org/10.1186/1472-6882-12-110>.
- [9] King ES, Bolling BW. Composition, polyphenol bioavailability, and health benefits of aronia berry: a review. *J. Food Bioact* 2020;11:13–30. <https://doi.org/10.31665/JFB.2020.11235>.
- [10] Kulling SE, Rawel HM. Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) - a review on the characteristic components and potential health effects. *Planta Med* 2008;74: 1625–34. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1088306>.
- [11] Tolić M-T, Jurčević IL, Krbavčić IP, et al. Phenolic content, antioxidant capacity and quality of chokeberry (*aronia melanocarpa*) products. *Food Technol Biotechnol* 2015;53:171–9. <https://doi.org/10.17113/ft>.
- [12] Simeonov SB, Botushanov NP, Karahanian EB, et al. Effects of *Aronia melanocarpa* juice as part of the dietary regimen in patients with diabetes mellitus. *Folia Med* 2002;44:20–3.
- [13] Yamane T, Kozuka M, Wada-Yoneta M, et al. Aronia juice suppresses the elevation of postprandial blood glucose levels in adult healthy Japanese. *Clin Nutri Experiment* 2017;12:20–6. <https://doi.org/10.1016/j.jclex.2017.01.002>.
- [14] Beulens J, Rutters F, Rydén L, et al. Risk and management of pre-diabetes. *Euro J Prevent Cardiol* 2019;26:47–54. <https://doi.org/10.1177/2047487319880041>.
- [15] Kanaley JA, Colberg SR, Corcoran MH, et al. Exercise/physical activity in individuals with type 2 diabetes: a consensus statement from the American college of sports medicine. *Med Sci Sports Exerc* 2022;54:353–68. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002800>.
- [16] Valder S, Habersatter E, Kostov T, et al. The influence of a polyphenol-rich red berry fruit juice on recovery process and leg strength capacity after six days of intensive endurance exercise in recreational endurance athletes. *Nutrients* 2024; 16. <https://doi.org/10.3390/nu16101428>.
- [17] Magliano D, Boyko EJ. IDF diabetes atlas. tenth ed. Brussels: International Diabetes Federation; 2021.
- [18] World Health Organization. Global strategy on diet, physical activity and health. <https://www.who.int/publications/i/item/9241592222>. [Accessed 2 April 2025].
- [19] Organization WH. Global action plan on physical activity 2018-2030: more active people for healthier world, vol. 27. Geneva: Herndon: World Health Organization; Stylus Publishing, LLC; 2019 [Distributor].
- [20] Gavanda S, Geisler S, Quittmann OJ, et al. The effect of block versus daily undulating periodization on strength and performance in adolescent football players. *Int J Sports Physiol Perform* 2019;14:814–21. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018.0609>.
- [21] Lukaski HC, Bolonchuk WW, Hall CB, et al. Validation of tetrapolar bioelectrical impedance method to assess human body composition. *J Appl Physiol* 1986;60: 1327–32. <https://doi.org/10.1152/jappl.1986.60.4.1327>.
- [22] Talluri A. BIA 101 ANNIVERSARY ASE operating instructions manual.
- [23] Hametner B, Wassertheurer S, Kropf J, et al. Oscillometric estimation of aortic pulse wave velocity: comparison with intra-aortic catheter measurements. *Blood Pres Monit* 2013;18:173–6. <https://doi.org/10.1097/MBP.0b013e3283614168>.
- [24] Weber T, Wassertheurer S, Hametner B, et al. Noninvasive methods to assess pulse wave velocity: comparison with the invasive gold standard and relationship with organ damage. *J Hypertens* 2015;33:1023–31. <https://doi.org/10.1097/HJH.0000000000000518>.
- [25] Matthews DR, Hosker JP, Rudenski AS, et al. Homeostasis model assessment: insulin resistance and beta-cell function from fasting plasma glucose and insulin concentrations in man. *Diabetologia* 1985;28:412–9. <https://doi.org/10.1007/BF00280883>.
- [26] Esfeld K, Kress S, Behrens M, et al. Diabetes, Sport und Bewegung. *Diabetol Stoffwechs* 2022;17:S301–10. <https://doi.org/10.1055/a-1901-0690>.
- [27] Barba-Ruiz M, Hermosilla-Perona F, Heredia-Elvar JR, et al. Muscular performance analysis in "cross" modalities: comparison between "AMRAP," "EMOM" and "RFT" configurations. *Front Physiol* 2024;15:1358191. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1358191>.
- [28] Drum SN, Bellovary BN, Jensen RL, et al. Perceived demands and postexercise physical dysfunction in CrossFit® compared to an ACSM based training session. *J Sports Med Phys Fit* 2017;57:604–9. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.16.06243-5>.
- [29] Le Sayec M, Xu Y, Laiola M, et al. The effects of Aronia berry (poly)phenol supplementation on arterial function and the gut microbiome in middle aged men and women: results from a randomized controlled trial. *Clin Nutr* 2022;41: 2549–61. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2022.08.024>.
- [30] Townsend RR, Wilkinson IB, Schiffrin EL, et al. Recommendations for improving and standardizing vascular research on arterial stiffness: a scientific statement from the American heart association. *Hypertension (Dallas, Tex. : 1979)* 2015;66: 698–722. <https://doi.org/10.1161/HYP.0000000000000033>.
- [31] Bruyne T de, Steenput B, Roth L, et al. Dietary polyphenols targeting arterial stiffness: interplay of contributing mechanisms and gut microbiome-related metabolism. *Nutrients* 2019;11. <https://doi.org/10.3390/nu11030578>.
- [32] García-Mantrana I, Selma-Royo M, Alcantara C, et al. Shifts on gut microbiota associated to mediterranean diet adherence and specific dietary intakes on general adult population. *Front Microbiol* 2018;9:890. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00890>.
- [33] Li J, Zhao F, Wang Y, et al. Gut microbiota dysbiosis contributes to the development of hypertension. *Microbiome* 2017;5:14. <https://doi.org/10.1186/s40168-016-0222-x>.
- [34] Lopez-Siles M, Duncan SH, Garcia-Gil LJ, et al. Faecalibacterium prausnitzii: from microbiology to diagnostics and prognostics. *ISME J* 2017;11:841–52. <https://doi.org/10.1038/ismej.2016.176>.
- [35] Ludovici V, Barthelmes J, Nägele MP, et al. Cocoa, blood pressure, and vascular function. *Front Nutr* 2017;4:36. <https://doi.org/10.3389/fnut.2017.00036>.
- [36] Vitale M, Giacco R, Laiola M, et al. Acute and chronic improvement in postprandial glucose metabolism by a diet resembling the traditional Mediterranean dietary pattern: can SCFAs play a role? *Clin Nutr* 2021;40:428–37. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2020.05.025>.
- [37] Wang H-Y, Wang H, Wang J-H, et al. Protocatechuic acid inhibits inflammatory responses in LPS-stimulated BV2 microglia via NF- κ B and MAPKs signaling pathways. *Neurochem Res* 2015;40:1655–60. <https://doi.org/10.1007/s11064-015-1646-6>.
- [38] García-Ortiz L, Recio-Rodríguez JI, Rodríguez-Sánchez E, et al. Sodium and potassium intake present a J-shaped relationship with arterial stiffness and carotid intima-media thickness. *Atherosclerosis* 2012;225:497–503. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2012.09.038>.
- [39] Lennon-Edwards S, Allman BR, Schellhardt TA, et al. Lower potassium intake is associated with increased wave reflection in young healthy adults. *Nutr J* 2014;13: 39. <https://doi.org/10.1186/1475-2891-13-39>.
- [40] Stanek A, Grygiel-Górniak B, Brożyna-Tkaczyk K, et al. The influence of dietary interventions on arterial stiffness in overweight and obese subjects. *Nutrients* 2023; 15. <https://doi.org/10.3390/nu15061440>.
- [41] Nikawa T, Ulla A, Sakakibara I. Polyphenols and their effects on muscle atrophy and muscle health. *Molecules (Basel, Switzerland)* 2021;26. <https://doi.org/10.3390/molecules26164887>.
- [42] Salucci S, Falcieri E. Polyphenols and their potential role in preventing skeletal muscle atrophy. *Nutrition research (New York, N.Y.)* 2020;74:10–22. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2019.11.004>.
- [43] Murphy C, Koehler K. Energy deficiency impairs resistance training gains in lean mass but not strength: a meta-analysis and meta-regression. *Scand J Med Sci Sports* 2022;32:125–37. <https://doi.org/10.1111/sms.14075>.
- [44] Cooper CE, Vollaard NBJ, Choueiri T, et al. Exercise, free radicals and oxidative stress. *Biochem Soc Trans* 2002;30:280–5. <https://doi.org/10.1042/bst0300280>.
- [45] Powers SK, Smuder AJ, Kavazis AN, et al. Experimental guidelines for studies designed to investigate the impact of antioxidant supplementation on exercise performance. *Int J Sport Nutr Exerc Metabol* 2010;20:2–14. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2010.20.1.2>.
- [46] Powers SK, Nelson WB, Hudson MB. Exercise-induced oxidative stress in humans: cause and consequences. *Free Radic Biol Med* 2011;51:942–50. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2010.12.009>.
- [47] Powers SK, Jackson MJ. Exercise-induced oxidative stress: cellular mechanisms and impact on muscle force production. *Physiol Rev* 2008;88:1243–76. <https://doi.org/10.1152/physrev.00031.2007>.
- [48] Slattery K, Bentley D, Coutts AJ. The role of oxidative, inflammatory and neuroendocrinological systems during exercise stress in athletes: implications of

- antioxidant supplementation on physiological adaptation during intensified physical training. *Sports Med* 2015;45:453–71. <https://doi/10.1007/s40279-014-0282-7>.
- [49] Souissi W, Bouzid MA, Farjallah MA, et al. Effect of different running exercise modalities on post-exercise oxidative stress markers in trained athletes. *Int J Environ Res Publ Health* 2020;17. <https://doi/10.3390/ijerph17103729>.
- [50] Michailidis Y, Jamurtas AZ, Nikolaidis MG, et al. Sampling time is crucial for measurement of aerobic exercise-induced oxidative stress. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39:1107–13. <https://doi/10.1249/01.mss.0b013e318053e7ba>.
- [51] Morton RW, Murphy KT, McKellar SR, et al. A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the effect of protein supplementation on resistance training-induced gains in muscle mass and strength in healthy adults. *Br J Sports Med* 2018; 52:376–84. <https://doi/10.1136/bjsports-2017-097608>.
- [52] Pasiakos SM, Howard EE. High-quality supplemental protein enhances acute muscle protein synthesis and long-term strength adaptations to resistance training in young and old adults. *J Nutr* 2021;151:1677–9. <https://doi/10.1093/jn/nxab099>.
- [53] Scientific opinion on dietary reference values for protein. *EFSA J* 2012;10:2557. <https://doi/10.2903/j.efsa.2012.2557>.
- [54] Moore DR, Churchward-Venne TA, Witard O, et al. Protein ingestion to stimulate myofibrillar protein synthesis requires greater relative protein intakes in healthy older versus younger men. *J Gerontol Series A Biol Sci Med Sci* 2015;70:57–62. <https://doi/10.1093/gerona/glu103>.
- [55] Olechno E, Puścion-Jakubik A, Socha K, et al. Consumption of chokeberry bio-products improves specific metabolic parameters and increases the plasma antioxidant status. *Antioxidants (Basel, Switzerland)* 2024;13. <https://doi/10.3390/antiox13060699>.
- [56] Yun C-E, So H-K, Vuong TA, et al. Aronia upregulates myogenic differentiation and augments muscle mass and function through muscle metabolism. *Front Nutr* 2021; 8:753643. <https://doi/10.3389/fnut.2021.753643>.
- [57] Stevanović V, Pantović A, Krga I, et al. Aronia juice consumption prior to half-marathon race can acutely affect platelet activation in recreational runners. *Appl Physiol Nutri Metabol Physiol* 2020;45: 393–400. <https://doi/10.1139/apnm-2019-0267>.
- [58] Rossi I, Mignogna C, Del Rio D, et al. Health effects of 100% fruit and vegetable juices: evidence from human subject intervention studies. *Nutr Res Rev* 2024;37: 194–238. <https://doi/10.1017/S095442242300015X>.