



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„ Der Einfluss von Kohlenhydratladen auf die Leistung
bei einem 600m und 4000m Lauf“

Verfasser

Andreas Maier

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, im Juni 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A-474

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Diplomstudium Ernährungswissenschaften

Betreuerin / Betreuer:

Ao. Univ.-Prof. Dr. Paul Haber

Inhaltsverzeichnis

Einleitung und Fragestellung	i
I Theoretischer Teil	1
1 Begriffsdefinitionen	3
1.1 Belastung	3
1.2 Beanspruchung	3
1.3 Leistung	4
1.4 Leistungsfähigkeit	5
2 Energiebereitstellung	9
2.1 ATP	9
2.2 Kreatinphosphat	11
2.3 Glykolyse	15
2.4 Aerobe Glykolyse	19
2.4.1 Oxidative Decarboxylierung	20
2.4.2 Citratzyklus	22
2.4.3 Atmungskette	24
3 Energievergleich zwischen anaerobe und aerobe Glykolyse	31
4 Kohlenhydrate	41
4.1 Aufbau	41
4.2 Vorkommen	42
4.3 Verdauung	43
5 Glykogen	45
5.1 Aufbau	45
5.2 Biosynthese	47

5.3	Glykogenolyse	48
5.4	Unterschied zwischen Leber und Muskel	48
5.5	Cori-Zyklus	49
6	Ausdauer	51
6.1	Begriffsdefinition	51
6.2	Laktazid anaeroben Ausdauer	52
6.3	Intensiv aerobe Ausdauer	52
7	Ermüdung und Erschöpfung	53
8	Superkompensation	55
9	Kohlenhydratladen	57
9.1	Ahlborg-Methode	58
9.2	No-Depletion-Methode	58
9.3	Western Australia Methode	58
9.4	Die verwendete Methode	58
II	Praktischer Teil	61
10	Leistungstest	63
10.1	Gültigkeit, Validität	63
10.2	Zuverlässigkeit, Reliabilität	64
10.3	Objektivität	64
10.4	Standardisierung	64
11	Material und Methoden	65
11.1	Probanden	65
11.2	Methodik	66
11.3	Vorbereitung und Ernährung	67
11.4	Messparameter	67
11.5	Messinstrumente	67
11.6	Durchführung	68
11.6.1	Termin 1 – Der ungeladene Übungslauf	69
11.6.2	Termin 2 – Der ungeladene Zeitlauf	69
11.6.3	Termin 3 – Der geladene Zeitlauf	69

12 Ergebnisse	71
12.1 600 Meter Lauf	71
12.2 4000 Meter Lauf	72
13 Diskussion	73
 III Anhang	 81
A Statistik	83
A.1 Deskriptive Statistik	83
A.2 Teststatistik	84
A.2.1 Vergleich Termin 1 mit Termin 2	84
A.2.2 Vergleich Termin 2 mit Termin 3	84
B Ernährungspläne	87
B.1 Kohlenhydratreduzierter Tag	87
B.2 Kohlenhydratladen	88
C Rezepte	95
C.1 Kohlenhydratreduzierte Rezepte	95
C.2 Kohlenhydratreiche Rezepte	97
C.3 Kohlenhydratreiche Ersatzrezepte	100

Abbildungsverzeichnis

1.1	Belastungs-Beanspruchungskonzept	4
1.2	Sportliche Leistungsfähigkeit	6
2.1	Strukturformel ATP	10
2.2	Strukturformel Kreatinphosphat	11
2.3	Bildung von Kreatinphosphat aus Kreatin und ATP	13
2.4	Verhalten von Kreatinphosphat (KP), ATP, Laktatbildungsrate, Laktatkonzentration im Muskel beim Sprint	14
2.5	Glykolyse	16
2.6	Oxidative Decarboxylierung	21
2.7	Citratzyklus	23
2.8	Komplexe der Atmungskette	25
2.9	Elektrochemischer Gradient der Atmungskette	26
2.10	oxidativer Phosphorylierung	27
2.11	Übersicht: Energiebereitstellung	29
3.1	Maximale Laufgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeitdauer	32
3.2	ATP-Resynthese	33
3.3	Blutlaktatspiegel nach Sprintbelastungen über unterschiedliche Streckenlängen	34
3.4	Sauerstoffdefizit	35
3.5	ATP-Turnover	36
3.6	anaerobe ATP-Produktion	39
4.1	α -D-Glukose	42
5.1	Glykogen	46
5.2	Glykogenverzweigung	46
5.3	Glykogenaufbau	48

8.1	Superkompensation	56
13.1	600m-Lauf	76
13.2	4000m-Lauf	76
13.3	Depletion	78

Tabellenverzeichnis

1.1	Das energetische Äquivalent	5
2.1	Enzymkomplexe der Atmungskette	25
2.2	ATP Ausbeute beim vollständigen Abbau der Glukose	30
3.1	Maximale ATP-Resyntheserate	36
3.2	Anteil der verschiedene Energiebereitstellungsformen am gesamten Energieumsatz bei verschieden langen Maximalbelastungen	37
11.1	Deskriptive Statistik	66
12.1	Ergebnisse 600m-Lauf	71
12.2	Ergebnisse 4000m-Lauf	72
13.1	Vergleich 600m 1.Lauf mit 2.Lauf	73
13.2	Vergleich 4000m 1.Lauf mit 2.Lauf	74
13.3	Vergleich 600m 2.Lauf mit 3.Lauf	75
13.4	Vergleich 4000m 2.Lauf mit 3.Lauf	75
A.1	Alter	83
A.2	Körpergewicht	83
A.3	Körpergröße	83
A.4	BMI	84
A.5	Geschlecht	84
B.1	Kohlenhydratreduzierter Tag zum Entladen	87
B.2	1.Tag für 55kg schweren Proband	88
B.3	2.Tag für 55kg schweren Proband	89
B.4	3.Tag für 55kg schweren Proband	89
B.5	4.Tag für 55kg schweren Proband	90

B.6	1.Tag für 63kg schweren Proband	90
B.7	2.Tag für 63kg schweren Proband	91
B.8	3.Tag für 63kg schweren Proband	91
B.9	4.Tag für 63kg schweren Proband	92
B.10	1.Tag für 82kg schweren Proband	92
B.11	2.Tag für 82kg schweren Proband	93
B.12	3.Tag für 82kg schweren Proband	93
B.13	4.Tag für 82kg schweren Proband	94
C.1	„Griechischer,, Thunfischsalat	95
C.2	Putenschnitzel mit Mischgemüse	96
C.3	Ham and Eggs	96
C.4	Pfirsich-Topfencreme	97

Danksagung

You'll never walk alone.

Oscar Hammerstein

Mein herzlicher Dank gilt meinem Betreuer Ao. Univ.-Prof. Dr. Paul Haber für die Möglichkeit diese Diplomarbeit unter seiner Leitung schreiben zu können und seine Unterstützung bei fachlichen Fragen.

Ganz besonders danken möchte ich allen Teilnehmern, die sich die Zeit für diese Studie nahmen, ihre Ernährung umstellen mussten und Durchhaltevermögen bei den Läufen bewiesen. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen! Ich bedanke mich bei Barbara Wohlgemuth, Felix Gram, Kerstin Binz, Manuela Gram, Marie-Claire Sowinetz, Martina Andres, Michaela Stock, Moritz Gram und Sebastian Eidenböck für eure Mühen!

Großer Dank gebührt auch Manfred Macek, der ein stetiger Befürworter meiner Person war und dessen Unterstützung mir eine enorme Hilfe waren.

Ein ebenso wichtiger Aspekt beim Schreiben einer Arbeit, ist diese auch manchmal vergessen zu können, wofür ich mich bei meinem Neffen, aber eigentlich viel mehr schon Bruder, Marco bedanken möchte, für viele Stunden zocken, aber auch Unterstützung bei allen nicht fachlichen Themen.

Und natürlich möchte ich auch meinen Eltern und meiner Schwester ganz besonders danken, auf die ich mich immer verlassen konnte und die immer für mich da waren. Ohne eure Unterstützung, Ermutigung und Liebe wäre ich nie so weit gekommen. Durch euch wurde ich zu dem Menschen, der ich jetzt bin.

Mein abschließender Dank gebührt meiner Freundin Sabine, die mein Leben in einer Form bereichert, die ich zuvor nicht kannte.

Zusammenfassung

Unabhängig davon, welchen Sport man ausübt und welcher Wettkampf bevorsteht, die Ernährung spielt eine tragende Rolle in jeder Vorbereitungsphase eines Athleten. Eine der etabliertesten Methoden ist hierbei das Kohlenhydratladen. Aufgrund der nicht zufrieden stellenden Datenlage über Kohlenhydratladen in Feldtests und unter sportartspezifischen Wettkampfbedingungen können jedoch bis heute keine leistungsrelevanten Aussagen über die Wirksamkeit getroffen werden. Das Ziel dieser Studie war es, die leistungssteigernde Wirkung von Kohlenhydratladen sportartspezifisch zu untersuchen. 9 ausdaueruntrainierte Probanden nahmen an 3 aufeinanderfolgenden Terminen, die jeweils durch 2 Wochen getrennt waren, an je einem 600m- und einem 4000m-Lauf teil. Der erste Termin galt als Testlauf, der zweite als Zeitlauf und der dritte wurde nach Kohlenhydratladen (eintägige Entleerungsphase gefolgt von vier Tagen Kohlenhydratladen mit 8g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht) durchgeführt. Gemessen wurde die Zeit jedes Probanden für die vorgegebene Distanz. Eine signifikante Verbesserung von Termin 1 auf Termin 2 wurde sowohl im 600m-Lauf (153 ± 20 Sekunden auf 145 ± 18 Sekunden) als auch im 4000m-Lauf (1341 ± 160 Sekunden auf 1276 ± 92 Sekunden) festgestellt, was auf den Lerneffekt und die damit verbundene bessere Einteilung der Ressourcen der Teilnehmer zurückzuführen ist. Eine signifikante Verbesserung nach Kohlenhydratladen konnte bei Termin 3 weder im 600m- noch im 4000m-Lauf festgestellt werden.

Summary

Whatever the sport or sports event, nutrition plays a major role in every athlete's preparation stage. A well-established method to increase muscle glycogen concentrations is carbohydrate loading. Due to insufficient data on carbohydrate loading in field tests and under sport specific competition conditions, we are not able to make a scientific predication on its ergogenic effectiveness. Therefore the main purpose of this study was to examine the performance enhancing effect of carbohydrate loading under sport-specific circumstances. 9 endurance-untrained subjects completed a 600m and a 4000m run on 3 consecutive days at intervals of two weeks. The first set of runs was the test trial, the second one was the time trial and the third one was the time trial after a period of carbohydrate loading (1 day depletion-phase followed by a 4 day carbohydrate loading regime with 8g carbohydrates/kg body weight). The running time of every subject was taken for each distance. A significant time improvement was observed on day 2 at both the 600m run (153 ± 20 seconds to 145 ± 18 seconds) and the 4000m run (1341 ± 160 seconds to 1276 ± 92 seconds), which is essentially attributable to the learning effect and the experience received on day 1 and, in association with this, the improved resource management and fuel rationing of the subjects. Neither in the 600m run nor in the 4000m run any significant performance enhancement could be observed on day 3 after carbohydrate loading.

Einleitung und Fragestellung

„All right Mister, let me tell you what winning means? You’re willing to go longer, work harder, give more than anyone else.“ Dieses Zitat von einem der erfolgreichsten Trainer und wahrscheinlich besten Motivator der NFL (National Football League)- Geschichte, nämlich Vince Lombardi, beschreibt sehr gut, um was es im Sport geht: Zu gewinnen, indem man seine absolut beste physische, wie auch psychische Leistung abrufen und immer gewillt ist, mehr als sein Gegner zu geben.

Doch um diese Leistung zu gewährleisten, bedarf es nicht nur eines perfekt periodisierten und auf den Athleten abgestimmten Trainingsplans, sondern auch einer bedarfsgerechten Ernährung, die alle benötigten Nährstoffe in ausreichender Menge bereitstellt. Des Weiteren gibt es ebenso die Möglichkeit, mit Tricks und physiologischem Verständnis, sich über die bedarfsgerechte Ernährung hinaus einen Vorteil zu verschaffen, um am Tag des Bewerbs in seiner persönlichen Bestform antreten zu können. Eine dieser Methoden ist das so genannte Kohlenhydrat-Laden. Die wissenschaftlich erwiesene Verbindung zwischen einer Hypoglycämie und der daraus resultierenden Erschöpfung und vorzeitigen Aufgabe im Wettkampf [1] zeigen die Wichtigkeit von komplett aufgeladenen Kohlenhydratspeichern, weshalb sich das Kohlenhydrat-Laden als fixer Bestandteil der Wettkampfvorbereitung in Ausdauersportarten etabliert hat. Ebenso haben sich auch die unterschiedlichsten Praktiken entwickelt, um den maximalen Füllungsgrad auszuschöpfen, mit mehr oder weniger intensiver Beanspruchung des Sportlers, sowie dessen psychischen Zustands. Denn wie anfangs erwähnt, ist dieser von ungemeiner Bedeutung für den Sportler und es besteht die Möglichkeit, dass ein Athlet mit gefüllteren Kohlenhydratspeichern, einem anderen mit weniger gefüllten unterliegt, weil dessen Methode weniger beanspruchend war. Aus diesem Grund verfolgt diese Diplomarbeit nicht das Ziel, die Vorgehensweise herauszufinden, mit der man die Glykogenspeicher am vollsten bekommt, sondern zu untersuchen, ob sich Kohlenhydrat-Laden positiv auf die sportartspezifische Leistung am Wettkampftag auswirkt.

Aufbau der Arbeit

Im theoretischen Teil dieser Arbeit werden zu allererst Grundbegriffe, wie Belastung, Beanspruchung, Arbeit, Leistung und Leistungsfähigkeit definiert und erklärt, um auf diesen im weiteren Verlauf aufzubauen.

Das Kapitel Energiebereitstellung befasst sich biochemisch und sportphysiologisch mit dem muskulären Energiestoffwechsel. Es zeigt, welche Möglichkeiten dem Organismus zur Verfügung stehen aus aufgenommenen Nährstoffen Energie zu lukrieren und wann er welche Methode anwendet. Der Fokus liegt hier vor allem auf *ATP*, Kreatinphosphat, sowie der aeroben und anaeroben Glykolyse.

Im Kapitel Kohlenhydrate wird deren Aufbau, Vorkommen und Verdauung behandelt, sowie deren Speicherung im Körper im Kapitel Glykogen. Desweiteren werden Begriffe wie Ausdauer, Superkompensation, Ermüdung und Erschöpfung erklärt und einige Methoden zum Kohlenhydratladen vorgestellt.

Der theoretische Teil basiert auf den Werken von [2–13]

Im praktischen Teil werden Gütekriterien von Belastungsuntersuchungen beschrieben und anschließend Methodik, Messparameter und Durchführung der Studie erklärt, alle nötigen Informationen zu den Probanden und deren Ernährung gegeben und anschließend die Ergebnisse präsentiert und diskutiert.

Im Anhang werden Sachverhalte genauer dargestellt und zusätzliches Material angeführt:

1. Anhang A: Statistik
2. Anhang B: Ernährungspläne der Probanden
3. Anhang C: Rezepte

Teil I

Theoretischer Teil

Kapitel 1

Begriffsdefinitionen

Bedeutende Leistungen werden
nur von bedeutenden Menschen
erzielt; und bedeutend ist jemand
nur dann, wenn er fest
entschlossen ist, es zu sein.

Charles de Gaulle

In diesem Kapitel werden einige Grundbegriffe und Definitionen eingeführt, die für das Verständnis der Arbeit relevant sind. Hierbei handelt es sich vor allem um Begriffe der Sport- und Arbeitsphysiologie. Das Kapitel basiert hauptsächlich auf folgenden Werken: [2, 4, 10, 13].

1.1 Belastung

Belastung ist eine vorgegebene Anforderung (Aufgabe), die fremd oder selbst bestimmt und als solche wertfrei ist. Stellt sich der Mensch dieser Belastung, hauptsächlich abhängig von seinem Willen und seiner Motivation, so erbringt er eine Leistung und wird in Abhängigkeit seiner Leistungsfähigkeit und dem Wirkungsgrad unterschiedlich stark beansprucht.

1.2 Beanspruchung

Als Beanspruchung bezeichnet man die Reaktion des Organismus beim Erbringen dieser Leistung, was eine Veränderung des homöostatischen Gleichgewichts mit

sich zieht und durch gesteigerte Herzfrequenz, erhöhtes Atemzeitvolumen etc. gekennzeichnet ist.

Das Zusammenspiel dieser Faktoren mit der Leistung und Leistungsfähigkeit wird in Abbildung 1.1 deutlich.



Abbildung 1.1: Belastungs-Beanspruchungskonzept
[aus [10] Abb. 40.1]

1.3 Leistung

Die Grunddefinition der Leistung stammt aus der Physik und beschreibt eine erbrachte Arbeit pro Zeiteinheit:

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}}$$

Da Arbeit, definiert als Kraft $\times$ Weg physikalisch gleichbedeutend ist mit Energie, ergibt sich daraus ein direkter Zusammenhang zur Physiologie:

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Energieumsatz}}{\text{Zeit}} \quad [\text{kcal/min oder kJ/min}].$$

Hier wird vor allem die im Organismus umgesetzte Energie betrachtet und weniger die geleistete mechanische Arbeit.

Grund dafür ist, dass im Körper komplexe leistungsphysiologische Vorgänge ablaufen, die von Außen nicht gesehen werden können, also nicht wenn Masse (wie zum Beispiel die eigene Körpermasse) durch Muskelkräfte entlang eines Weges gehoben oder bewegt und somit in Watt ($\text{N} \times \text{m/s}$) messbar wird, sondern beispielsweise energieumsetzende isometrische Muskelkontraktionen, wie stützmotorische Aktivitäten, die im Modell, der mechanisch verrichteten Arbeit keine Berücksichtigung findet.

Da im menschlichen Organismus die benötigte Energie aus der biologische Verbrennung der Nährstoffe stammt und dafür eine ganz bestimmte Menge Sauerstoff erforderlich ist, kann die Leistung auch so betrachtet werden:

$$\text{Leistung} = \frac{\text{O}_2\text{-Verbrauch}}{\text{Zeit}} \quad [\dot{V}\text{O}_2, \text{ l/min}].$$

Hierbei bedeutet „ $\dot{V}\text{O}_2$ “ die zeitliche Änderung ($\frac{d}{dt}$) des Sauerstoffgehalts O_2 in einem gegebenen Volumen V .

Das heißt „ $\dot{}$ “ = $\frac{d}{dt}$

V = die zeitliche Änderung des Volumens.

Aus den unterschiedlichen Nährstoffen wird hierbei pro Liter Sauerstoff eine ganz bestimmte Energiemenge gewonnen, energetische Äquivalent genannt (siehe Tabelle 1.1).

Eiweiß	4,5 kcal / Liter O_2
Fett	4,7 kcal / Liter O_2
Kohlenhydrate	5,0 kcal / Liter O_2

Tabelle 1.1: Das energetische Äquivalent

1.4 Leistungsfähigkeit

Man kann physische und psychische Belastungen unterscheiden, woraus sich physische und psychische Leistungen ergeben. Die meisten Belastungen beinhalten allerdings beide Komponenten, weshalb die Leistungsfähigkeit des Menschen nahezu immer psychophysisch angelegt ist.

„Unter Leistungsfähigkeit versteht man die Fähigkeit zur Erfüllung bestimmter Aufgaben.“ [10]

Handelt es sich hierbei um eine sportliche Leistung, so fasst man es als „sportliche Leistungsfähigkeit“ zusammen, die den Ausprägungsgrad einer bestimmten sportmotorischen Leistung darstellt und von vielen beeinflussenden Faktoren, wie Alter, Geschlecht, Gesundheits- und Trainingszustand, sowie Talent und Umwelteinflüssen abhängig ist.

Einen Überblick über die verschiedenen Komponenten der sportlichen Leistungsfähigkeit gibt das Modell in Abbildung 1.2.

In dieser Darstellung wird deutlich, dass eine so genannte körperliche Univer-

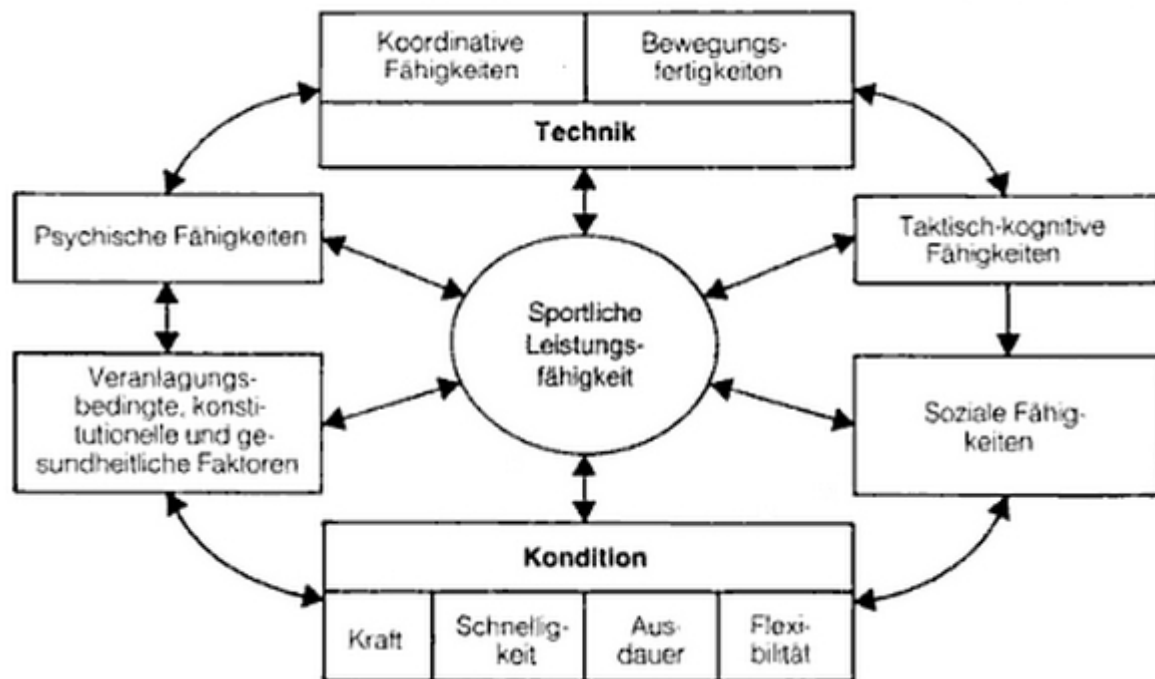


Abbildung 1.2: Sportliche Leistungsfähigkeit
[aus [13] Abb. 3]

salleistungsfähigkeit nicht definiert werden kann, da es sich um ein komplexes Zusammenspiel vieler Faktoren handelt und immer aufgabenspezifisch betrachtet werden muss. Die motorischen Grundeigenschaften: Kraft, Ausdauer, Schnelligkeit, Flexibilität und Koordination kann man dabei als qualitativen Aspekt ansehen, während Intensität, Dauer und Häufigkeit den quantitativen Aspekt abgeben.

Meist treten diese Grundeigenschaften in Mischformen auf und sind nur sehr selten im Wettkampf isoliert zu betrachten. Die vorwiegend konditionellen Hauptbeanspruchungsformen: Kraft, Ausdauer und Schnelligkeit, die auf energetischen Prozessen beruhen bilden die Basis für koordinativen Eigenschaften: Flexibilität und Koordination, die auf zentralnervösen Steuer- und Regelprozessen beruhen.

Wie wichtig jedoch ebenso die psychische Komponente ist, zeigt eine Studie von Bouchard an kanadischen Studenten. [4] Diese führten einen Maximalkrafttest durch, bei dem die willentlich maximale isometrische Kontraktion bestimmt wurde. Anschließend wurde den Probanden mitgeteilt, dass an einer ausländischen Universität bei den gleichen Tests wesentlich bessere Ergebnisse erzielt wurden, was dazu führte, dass die Kanadier einen signifikanten Kraftanstieg am folgenden Tag bei den gleichen Übungen erreichten.

Daraus wird ersichtlich, was für eine bedeutende Rolle die Psyche, Motivation und die Fähigkeit dem Widerstand nicht nachzugeben spielt und man erkennt, wie bedeutend es für einen Sportler ist, vor einem Wettkampf auch in mentaler Höchstform zu sein, wobei aggressive Kohlenhydratladetechniken fehl am Platz sind.

Somit wird auch die Bedeutung der Ernährung ersichtlich, die nicht nur Faktoren der sportlichen Leistungsfähigkeit beeinflusst, sondern deren Wichtigkeit auch deutlich wird, bei genauerer Betrachtung der Energiebereitstellung.

Kapitel 2

Energiebereitstellung

Meiner Idee nach ist Energie die
erste und einzige Tugend des
Menschen.

Wilhelm Freiherr

Alle zellspezifischen Funktionen, ablaufende Biosynthesen, sowie Transportvorgänge und Kontraktionen der Muskelzellen in einem lebenden Organismus benötigen Energie. Mit der Frage, woher diese Energie stammt, befasst sich dieses Kapitel mitsamt allen wichtigen physiologischen und biochemischen Aspekten der Energiebereitstellung. Die einzelnen Schritte und Reaktionen des Energiestoffwechsels werden diskutiert und anhand von Grafiken verdeutlicht. Dieses Kapitel basiert auf den Werken von [2–4, 6–10, 13].

2.1 ATP

Jeder lebende Organismus benötigt für jede Leistung wie Biosynthese, Transportvorgängen, sowie für Muskelkontraktionen Energie. Diese unmittelbare Energiequelle ist für den Menschen und fast alle anderen Lebewesen das *ATP* (Adenosintriphosphat)(siehe Abbildung 2.1).

ATP ist aufgebaut aus der Base Adenin, dem Monosaccharid D-Ribose (eine so genannte Pentose, da es sich um eine Aldose mit 5 C-Atomen handelt) und 3 Phosphatresten, wovon der erste mit der Ribose verestert ist und die weiteren über Säureanhydridbindungen verbunden sind.

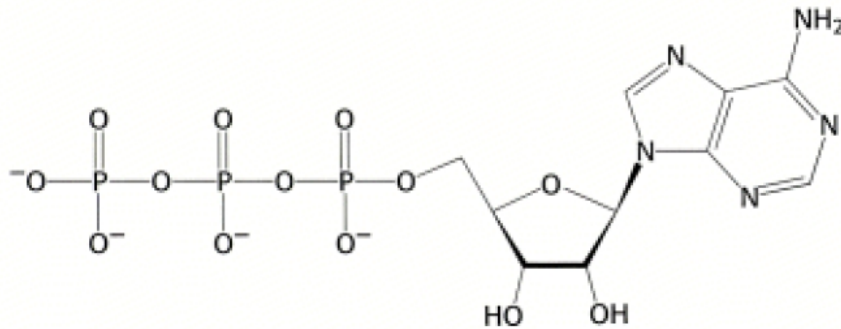
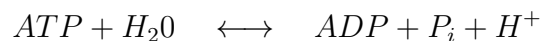


Abbildung 2.1: Strukturformel ATP
[aus [3] S1437]

Nur wenn *ATP* in den kontraktilelementen¹ des Muskels aufrechterhalten wird, kann dieser über längeren Zeitraum kontrahieren. Der intrazelluläre *ATP*-Vorrat von ca. 5 mmol/kg Muskel ist nur sehr gering. Dennoch sinkt auch bei hohen Muskelleistungen die *ATP*-Konzentration nur minimal, da sich die Muskeln verschiedenen Wegen der Resynthese bedienen.

Daraus ergibt sich, dass die Turnover² Rate des *ATP*'s enorm hoch ist. Die Gesamtmenge an *ATP* im menschlichen Körper beträgt lediglich ca 85g, entsprechend einer Energiemenge von maximal 2 kcal. Damit setzt beispielsweise ein ruhender Mensch etwa 40 kg *ATP* in 24 Stunden um, ein Mensch, der pro Tag 2500 kcal umsetzt, produziert und verbraucht annähernd 65 kg *ATP* und während hoher Belastung kann die Utilisationsrate von *ATP* auf bis zu 0,5 kg/min ansteigen.

Die Energie freisetzende Reaktion im Muskel ist die Hydrolyse, die den endständigen Phosphatrest des *ATP*'s durch Wasseranlagerung abtrennt:



Die Zerfallsprodukte *ADP* und anorganisches Phosphat stimulieren die Atmung bis zur 100-fachen Steigerung und aktivieren die für den Muskelstoffwechsel verantwortlichen Funktionssysteme. Diese Regulation bezeichnet man auch als „Atmungskontrolle durch den Energiebedarf“ [13].

¹Aktin und Myosin

²Der ATP-Umsatzgrad. ATP wird umgesetzt und ständig wieder resynthetisiert.

Die energiereichen Verbindungen des *ATP*'s sind vor allem die Säureanhydridbindungen zwischen den Phosphatresten, weil sie aufgrund der 4 benachbarten negativen Ladungen im Molekül leicht gespalten werden und die Phosphatreste auf andere Moleküle übertragen werden können. Korrekt spricht man in der Biochemie also nicht von einer „energiereichen Verbindungen“, sondern einer Verbindung mit hohem Gruppenübertragungspotential.

2.2 Kreatinphosphat

Es gibt aber weitere Moleküle, die ein noch höheres Gruppenübertragungspotential haben, was wiederum sehr wichtig für die Regeneration des *ATP*'s ist.

Eines davon ist das Kreatinphosphat, dessen Strukturformel in Abbildung 2.2 zu sehen ist.

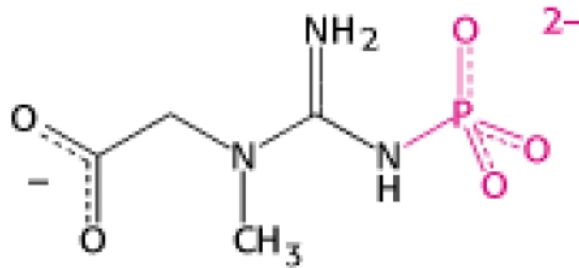


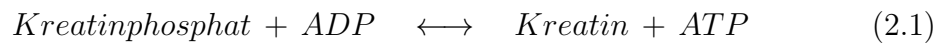
Abbildung 2.2: Strukturformel Kreatinphosphat
[aus [3] S577]

Gemeinsam mit *ATP* zählt Kreatinphosphat zur Gruppe der Phosphagene und ist im Muskel mit 15-20 mmol/kg Muskelfeuchtgewicht³ in etwa 3-4 Mal höherer Konzentration als *ATP* vorhanden [4].

³Die in vivo Masse eines menschlichen Muskels im Gegensatz zu für Untersuchungen getrocknete Muskelmasse.

Von der Gesamtmenge können jedoch nur ca. 85% genutzt werden, da es nach Absinken der muskulären *ATP*-Konzentration um 30% zu einer Kontraktionsinsuffizienz⁴ kommt [14].

Im Sarkoplasma, dem Zytoplasma der Muskelzelle, in unmittelbarer Umgebung der kontraktilen Elemente erfolgt die Transphosphorylierung, das heißt die Übertragung des Phosphatrests von Kreatinphosphat auf *ADP* um *ATP* zu regenerieren unter Gewinn der freien Energie. Katalysiert wird dieser Vorgang von der Kreatinkinase, die im leicht sauren Milieu des Sarkoplasmas das Gleichgewicht auf die Seite des *ATP*'s verschiebt (2.1).



Diese *ATP*-Resynthese erfolgt sehr schnell und schon während der Muskelkontraktion und kann auf diese Weise die *ATP*-Konzentration im Muskel bei dynamischer Arbeit über einen gewissen Zeitraum konstant halten.

Doch wie bereits erwähnt ist auch dessen Konzentration limitiert und reicht zusammen mit dem gespeicherten *ATP* für maximale Muskelkontraktionen über einen Zeitraum von 6-8 Sekunden. Dies entspricht nicht ganz einem 100m Sprint⁵. Das bedeutet, es gewinnt derjenige den 100m Sprint, der als letzter langsam wird.

Bei diesen Belastungen höchster Intensität kann der Energiebedarf nicht ausreichend oxidativ gedeckt werden. Der Grund dieser initialen Verzögerung in der respiratorischen Sauerstoffaufnahme wird wahrscheinlich durch eine relativ träge Antwort des zirkulatorischen Systems zum Arbeitsanfang verursacht [13].

Somit ist dieser Resyntheseweg des *ATP*'s über Kreatinphosphat ein anaerob alaktazider. Das bedeutet, es ist kein Sauerstoff vonnöten und es fällt kein Laktat während der Reaktion an.

In einer anschließenden Erholungsphase fungiert die mitochondriale Kreatinkinase als Katalysator um angehäuften Kreatin mit *ATP* wieder zu Kreatinphosphat zu resynthesisieren und wieder für folgende Belastungen zu speichern (siehe Abbildung 2.3).

⁴Eingeschränkte Fähigkeit zur Muskelkontraktion.

⁵Derzeitiger Weltrekord 9,52 Sekunden aufgestellt von Usain Bolt 2009 bei den Leichtathletik-Weltmeisterschaften in Berlin.

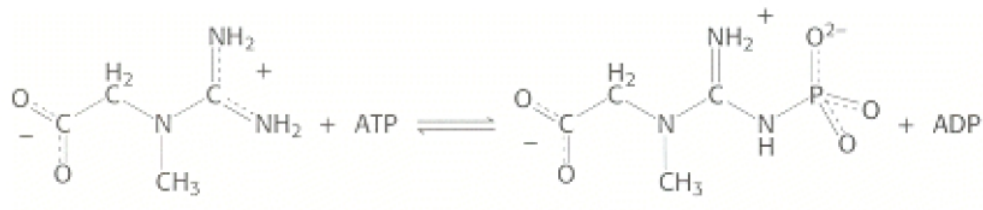


Abbildung 2.3: Bildung von Kreatinphosphat aus Kreatin und ATP
[aus [3] S325]

Das Verhalten von Kreatinphosphat, *ATP* sowie der Laktatbildungsrate und der Laktatkonzentration im Muskel beim 100m Sprint zeigt die Grafik nach Alois Mader (1983) (aus [4])(siehe Abbildung 2.4).

Bei maximaler dynamischer Arbeit sinkt zuerst die Kreatinphosphat- Konzentration um den *ATP*- Spiegel der Muskelzelle aufrechtzuerhalten. Nach ungefähr 6 Sekunden ist das Kreatinphosphat nahezu aufgebraucht und die Laktatbildungsrate steigt an, sowie die Laktatkonzentration etwas zeitversetzt und wesentlich flacher, da einiges an Laktat sofort abgepuffert wird. Unmittelbar nach Sprintende beginnt die Regeneration von Kreatinphosphat. Das anfallende Laktat stammt aus der anaeroben Glykolyse.

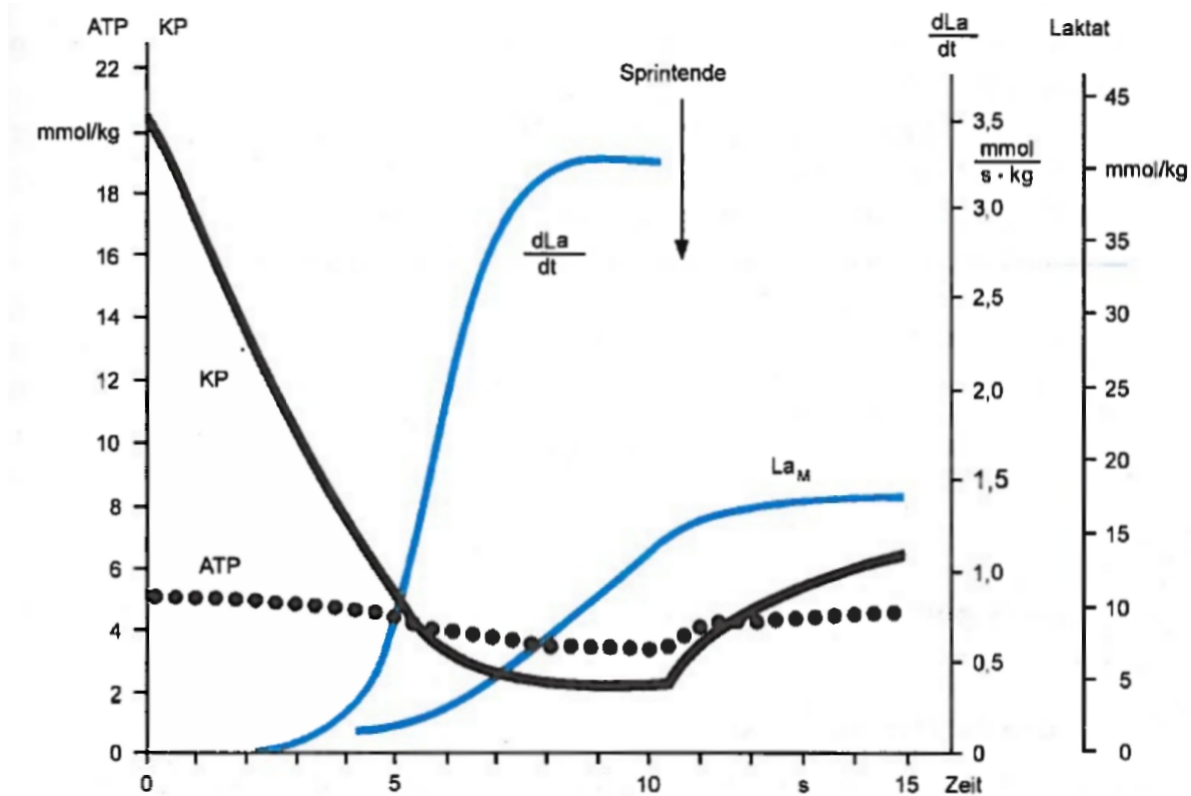
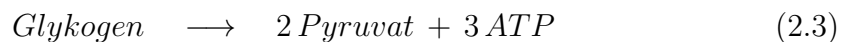
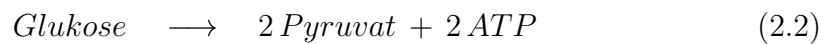


Abbildung 2.4: Verhalten von Kreatinphosphat (KP), ATP, Laktatbildungsrate ($\frac{dLa}{dt}$), Laktatkonzentration im Muskel (La_M) beim Sprint
 Zu beachten die nahezu konstant bleibende ATP-Konzentration während der Belastung.

[aus [4] S347]

2.3 Glykolyse

Die Glykolyse (griech. Glykos = süß, lysis = Auflösung) stellt den Abbauprozess der Glukose zu *ATP* und Pyruvat dar:



Insgesamt können 2 *ATP* aus Glukose gewonnen werden (2.2), aus Glykogen sogar 3 *ATP* (2.3) (im Detail siehe Kapitel 5 Glykogen).

Dieser katabole Prozess ist eine Serie von aufeinander folgenden Reaktionen, die allesamt von Enzymen katalysiert werden, die sich ausschließlich im Zytoplasma der Zelle befinden. Da dieser Stoffwechselweg einer bestimmten Reihenfolge unterliegt, bezeichnet man die Glykolyse auch als so genannte Substratkette. Sie verläuft bis zur Bildung des Pyruvats immer anaerob, das heißt ohne Anwesenheit von O_2 unabhängig davon, ob genug Sauerstoff vorhanden ist, oder nicht (siehe Abbildung 2.5). Da für das Pyruvat jedoch noch 3 weitere Verwertungsmöglichkeiten existieren, spricht man in Abhängigkeit von der Belastungsintensität und der daraus resultierenden Verfügbarkeit von O_2 vom aeroben oder anaeroben Stoffwechselweg.

Bei der anaerob laktaziden Phase, wenn die Sauerstoffversorgung unzureichend ist, fällt mehr Pyruvat an, als in den weiteren Stoffwechselschritten oxidativ verarbeitet werden kann. Weiters häuft sich auch das Coenzym $NADH + H^+$ an. Dies ist die reduzierte Form von NAD^+ , welches notwendig für das Ablaufen der Glykolyse ist. Nur in der oxidierten Form, also als NAD^+ fungiert das Coenzym als Wasserstoffakzeptor und muss deshalb unter anaeroben Bedingungen regeneriert werden, damit die Glykolyse nicht zum Stillstand gerät. Dies geschieht durch das Enzym Laktatdehydrogenase, welches das angehäuften Pyruvat zu Laktat reduziert und im Gegenzug $NADH + H^+$ zu NAD^+ oxidiert, was somit wieder in der Glykolyse genutzt werden kann. Dies gewährleistet, dass die Glykolyse auch unter vollständigem Sauerstoffmangel ablaufen kann.

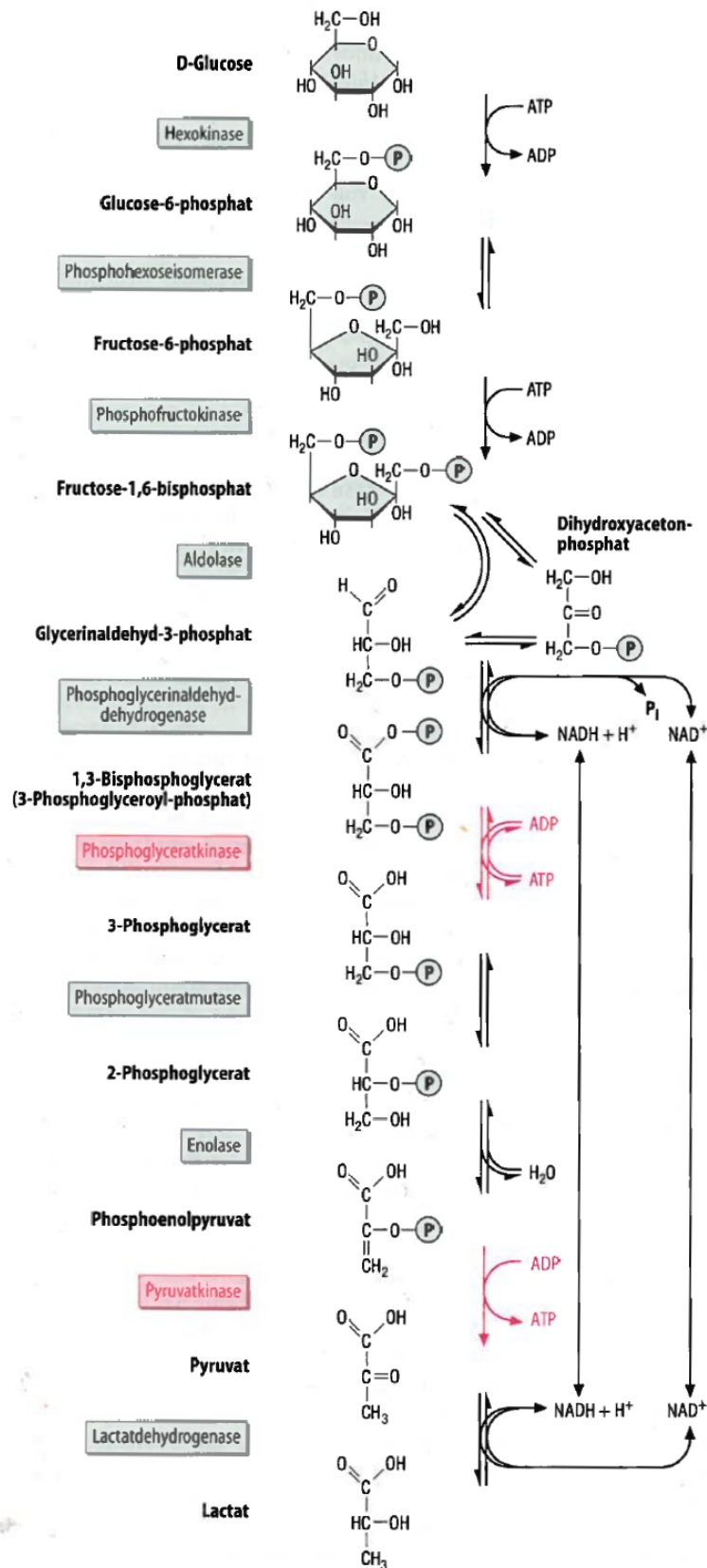
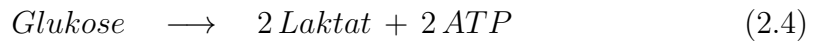


Abbildung 2.5: Glykolyse
[aus [7] S397]

Die Gesamtbilanz der anaerob laktaziden Phase kann also vereinfacht wie folgt beschrieben werden:



Doch auch dieser Stoffwechselweg hat eine Limitierung, die somit auch gleichbedeutend mit der Grenze der anaeroben Glykolyse ist. Denn laut Haber [2] hängt die Leistung der Glykolyse, d.h. die pro Minute bereitgestellte Energiemenge, ausschließlich von der Laktatanstiegsgeschwindigkeit ab. Die maximale Laktatanstiegsgeschwindigkeit beträgt bei Untrainierten 21 mmol/l/min und ist bei normal gefüllten Glykogenspeichern, welche durch entsprechende kohlenhydratreiche Kost gewährleistet sind, nicht durch den Vorrat an Glykogen begrenzt, sondern lediglich durch die Masse an glykolytischen Enzymen. Eines dieser die Glykolyse regulierenden Enzyme ist die Phosphofructokinase 1 (PFK-1).

Die PFK-1 knüpft in einer irreversiblen Reaktion einen Phosphatrest an das C1 von Fructose-6-phosphat. Der Phosphatrest wird von einem *ATP*-Molekül übertragen. Diese Reaktion braucht also Energie und ist somit exergon. Da die PFK-1 von vielen Faktoren allosterisch⁶ beeinflusst wird, ist sie das geschwindigkeitsbestimmende Enzym der Glykolyse und nimmt eine entscheidende Regulationsstelle ein. Die PFK-1 kann dementsprechend als eine Art Sensor für den energetischen Zustand der Zelle verstanden werden.

Ist die Konzentration von Citrat (einem nachgeschalteten Metaboliten im Citratzyklus) und *ATP* in der Zelle hoch, was gleichbedeutend für eine positive Energieladung der Zelle ist, so wird die PFK-1 allosterisch gehemmt und mit ihr die Glykolyse. Bei höheren Konzentrationen von *AMP* und *ADP*, die vermehrt bei niedriger Energieladung der Zelle auftreten, sowie bei angestauten Metaboliten der Glykolyse oberhalb der PFK-1 wird diese allosterisch aktiviert, wodurch der Energiegewinn durch die Glykolyse dem aktuellen *ATP*-Bedarf angepasst wird.

⁶(griech. *allos* = anders und *stereós* = Ort) Proteine/ Enzyme ändern durch Bindung von Effektoren ihre Raumstruktur und werden durch diese Konformationsänderung aktiviert oder inhibiert. Die Bindungsstelle ist nicht das aktive Bindungszentrum, daher der Name allosterisch (an einem anderen Ort).

Doch neben dem energetischen Zustand der Zelle beeinflusst ebenso der pH-Wert die PFK-1. Auch ein Anstieg der H^+ - Ionen Konzentration, der mit erhöhter Laktatproduktion einhergeht, hemmt, wie die oben erwähnten Inhibitoren *AMP*⁷ und *ADP* die PFK-1. Dies ist ein Phänomen, dass vor allem Kurzstreckenläufer über 400m und 800m schon des öfteren zum Verhängnis geworden ist. Sinkt der pH-Wert von 7,0 unter Ruhebedingungen auf 6,7 in der Muskulatur, so beträgt die Aktivität und damit verbunden die Flussrate der Glykolyse nur mehr 50% des Maximums, bei einem pH-Wert von 6,3 ist die PFK-1 komplett gehemmt und damit auch die Glykolyse, wodurch der *ATP*-Gewinn aus Kohlenhydrate gegen Null geht.

Wurde der Wettkampf also zu schnell angegangen, kommt es infolge der pH-bedingten Hemmung der Glykolyse zu einer Intensitäts- bzw. Leistungsabnahme. Der Sinn dieser Inhibierung ist es, eine durch den Laktatanstieg induzierte Azidose, also die weitere Senkung des pH-Werts zu verhindern. Dies ist eine Schutzreaktion, um die Aktivierung von Lysosomen und deren hydrolisierenden Enzyme, wie Proteasen, Nukleasen und Lipasen zu verhindern und somit einer „Selbstverdauung“ zu entgehen.

Bei einer kompletten Ausbelastung, also maximaler Intensität und somit auch maximaler Nutzung der glykolytischen Aktivität muss die Belastung nach ca. 40 Sekunden abgebrochen werden, aufgrund des hohen Laktatspiegels und der daraus resultierenden Azidose. Die erreichte Laktatkonzentration beträgt dann 14 mmol/l und bedeutet, dass ein O_2 -Defizit von 3,5l eingegangen wurde. Die Laktazid-anaerobe Kapazität, sprich die gesamte glykolytisch verfügbare Energie, die in diesen 40 Sekunden maximaler Intensität einmal erbracht werden kann, beträgt 17 kcal.

Die gleiche Energiemenge kann bei geringerer Leistung auf bis zu 3 Minuten gestreckt werden, führt aber ebenso zu einer die Belastung abbrechenden Azidose, oder zu stark gedrosselter Glykolyse durch den Pasteur-Effekt, wenn die Belastung bei geringer Intensität und submaximalem Laktatspiegel fortgesetzt wird. Der Pasteur-Effekt beschreibt die Inhibierung der Glykolyse durch die Atmung. Wird also einem anaeroben System Sauerstoff wieder zugeführt, hemmt dies die PFK-1 und somit die Glykolyse. Der Grund dafür ist, dass die aerobe Glykolyse eine effizientere Ausbeute an *ATP* aus Glukose aufweist und der Anstieg der

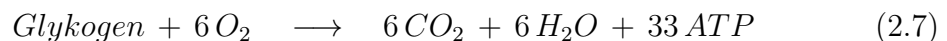
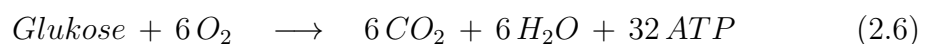
⁷Adenosinmonophosphat

Konzentration an Citrat und *ATP* die PFK-1 hemmt. Der Pasteur-Effekt besagt somit, dass unter anaeroben Bedingungen mehr und schneller Glukose verbraucht wird, als unter aeroben. Umgekehrt kann auch beim Übergang von Normoxie⁸ zu Hypoxie⁹ eine deutliche Zunahme der Glykolyse beobachtet werden.

Nach dem Abbruch der Belastung wird das Laktat mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mmol/l/min wieder abgebaut und das zu Beginn jeder Belastung eingegangene O_2 -Defizit wieder durch die Mehraufnahme von Sauerstoff beglichen. Die Sauerstoffschuld muss anfänglich eingegangen werden, da zunächst unzureichend Sauerstoff vorhanden ist und der Organismus somit so lange anaerob arbeitet, bis es zu einem Abbruch der Belastung kommt, oder die Intensität so weit gemindert wird, dass eine ökonomische oxidative Substratverbrennung möglich ist. Hierbei handelt es sich um die Aerobe Glykolyse.

2.4 Aerobe Glykolyse

Sie kann nur ablaufen, wenn genügend Sauerstoff vorhanden ist, wodurch auch kein Laktat anfällt. Somit bezeichnet man diese Form der Energiebereitstellung auch als aerob alaktzide Phase. Aus der vereinfachten schematischen Darstellung kann entnommen werden, dass aus einem Molekül Glukose bei vollständigem Abbau zu Kohlendioxid und Wasser 32 *ATP*-Molekülen:



Anmerkung: In der Literatur schwanken oft die Angaben der *ATP* –Ausbeute zwischen 30 und 32 *ATP*. Dies hängt vom Gewebe und dessen unterschiedlichen Transportsystemen für $NADH + H^+$ ab. So bedienen sich die Mitochondrien des Herzens, der Leber und Nieren dem Malat-Aspartat-Shuttle, wodurch 2 *ATP*-Moleküle mehr aus einem Molekül Glukose gewonnen werden können, im Gegensatz zum von der Muskulatur und dem Gehirn verwendeten Glycerin-3-Phosphat-Shuttle. Dieser Transportweg ist zwar schneller, aber liefert der Atmungskette das energetisch schwächere Flavin-Adenin-Dinukleotid *FADH*₂. Genauer es zu den

⁸Normoxie bezeichnet den medizinischen Idealzustand der Sauerstoffversorgung im menschlichen Körper.

⁹Hypoxie bezeichnet Sauerstoffmangel

Transportsystemen beim Kapitel Atmungskette.

Bis zu den angeführten 32 *ATP* ist es jedoch ein weiter Weg. Unterteilt man die oxidative *ATP*-Resynthese in ihre einzelnen, jeweils wieder von einer Vielzahl an Enzymen gesteuerten Abschnitte, die jeweils wieder aus einigen Reaktionsschritten bestehen, erhält man 5 Abbaustufen.

1. Glykogenolyse (siehe Kapitel 5.3)
2. Glykolyse (siehe Kapitel 2.3)
3. Oxidative Decarboxylierung (siehe Kapitel 2.4.1)
4. Citratzyklus (siehe Kapitel 2.4.2)
5. Atmungskette (siehe Kapitel 2.4.3)

Stammt die Glukose nicht aus den Speichern der Leber und Muskeln, sondern direkt aus der Nahrung, zum Beispiel aus einer kohlenhydratreichen Mahlzeit vor, oder einem kohlenhydrathaltigem Getränk während der Belastung, wird der

1. Schritt ausgelassen und Reaktionen der aeroben Oxidation beginnen nach der Verdauung und Resorption direkt mit der Glykolyse. Diese läuft zunächst identisch, wie oben beschrieben bis zur Bildung von Pyruvat ab.

2.4.1 Oxidative Decarboxylierung

Anstelle nun das anfallende Pyruvat, wie unter anaeroben Bedingungen zu Laktat zu reduzieren, kann es unter aeroben Umständen weiter abgebaut und somit die gesamte in diesem Molekül gespeicherte Energie genutzt werden. Doch um in den Citratzyklus eingeschleust zu werden, muss Pyruvat erstmals aktiviert werden. Das heißt in eine Form gebracht werden, in der sie vom Citratzyklus akzeptiert wird.

In der so genannten oxidativen Decarboxylierung, der Verbindungsstelle zwischen Glykolyse und Citratzyklus findet eine Oxidation zu Acetyl-CoA (auch aktivierte Essigsäure genannt), einem zentralen Molekül im Energiestoffwechsel, statt. Denn nicht nur Kohlenhydrate, sondern auch Fett- und einige Aminosäuren werden in Acetyl-CoA umgewandelt, um im Citratzyklus unter Energiegewinn aerob weiterverarbeitet werden zu können. Denn die Grundvoraussetzung für eine hohe Energiebereitstellungsrate auf aerobem Weg, die beispielsweise bei einem in unter 30

Minuten absolvierten 10000m- Lauf erforderlich ist, ist eine Große Bildungsrate von Acetyl-CoA pro Zeiteinheit.

Da der mengenmäßig größte Anteil der Deckung des Energiebedarfs aus der Oxidation der Kohlenhydrate erfolgt, fokussieren wir uns jedoch hier auf die Bildung von Acetyl-CoA aus Pyruvat. Katalysiert wird dieser Vorgang durch einen Multi-enzymkomplex, dem Pyruvatdehydrogenasekomplex (PDH-Komplex). Namensgebend dafür ist das führende Enzym, die Pyruvatdehydrogenase. Da an all diesen Reaktionen, die zusammengefasst in der folgenden Formel dargestellt sind, jedoch gar kein Sauerstoff beteiligt ist, ist die Bezeichnung dehydrierende Decarboxylierung genauer (zu sehen in Abbildung 2.6).

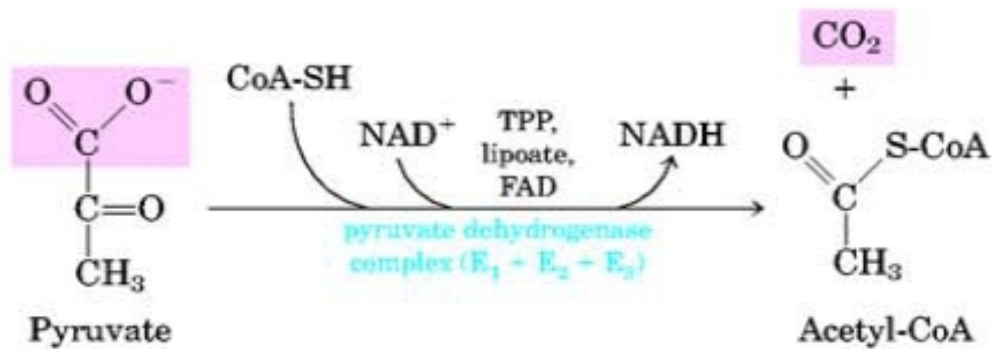


Abbildung 2.6: Oxidative Decarboxylierung katalysiert durch die Enzyme des Pyruvatdehydrogenasekomplex'

[aus [8] S602]

Bei dieser irreversiblen¹⁰ Schlüsselreaktion beim oxidativen Abbau der Nährstoffe, wird ebenfalls $NADH + H^+$ generiert, das später in der Atmungskette zur Energiegewinnung herangezogen werden kann und man erhält als Produkte CO_2 , das abgeatmet wird und Acetyl-CoA, welches nun in den Citratzyklus eingeschleust werden kann.

¹⁰Von Acetyl-CoA gibt es keinen direkten Stoffwechselweg mehr zurück zu Glukose oder Glykogen

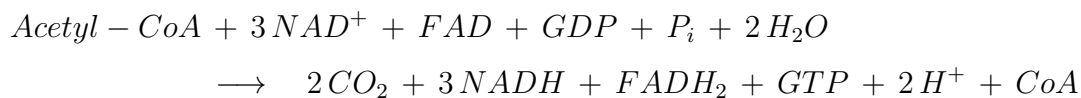
2.4.2 Citratzyklus

Der Citratzyklus beinhaltet eine Vielzahl an Oxidations- und Reduktions- Reaktionen, die ausgehend von Acetyl-CoA und dessen schrittweisen Abbau schließlich zu 8 Wasserstoffatomen und 2 CO_2 –Molekülen, als Endprodukte der Oxidation führen. Acetyl-CoA durchläuft die zyklisch angeordnete Reaktionsfolge vollständig, wodurch die gesamte frei gewordene Energie in Form von $NADH + H^+$ und $FADH_2$ fixiert wird. Diese nun reduzierten Coenzyme können leicht in die ebenfalls im Mitochondrium lokalisierte Atmungskette übergehen (siehe Abbildung 2.7).

Die Reaktionsschritte des Citratzyklus' haben noch eine Vielzahl an weiteren Aufgaben, die für den Kohlenhydratstoffwechsels allerdings nur mehr von geringer Bedeutung sind.

Betrachtet man die Energieausbeute auf dem ersten Blick, bleibt einem lediglich 1 GTP^{11} -Molekül (welches 1:1 in ATP umgewandelt werden kann) über. Dies ist aber eine Täuschung, da der Hauptteil der Energie in den reduzierten Coenzymen gespeichert ist.

Folgende Reaktionsgleichung lässt sich nun daraus formulieren:



In der anschließenden Atmungskette können, die im Citratzyklus gewonnen Coenzyme reoxidiert werden, wodurch die in ihnen gespeicherte Energie schlussendlich frei wird.

¹¹Guanosintriphosphat

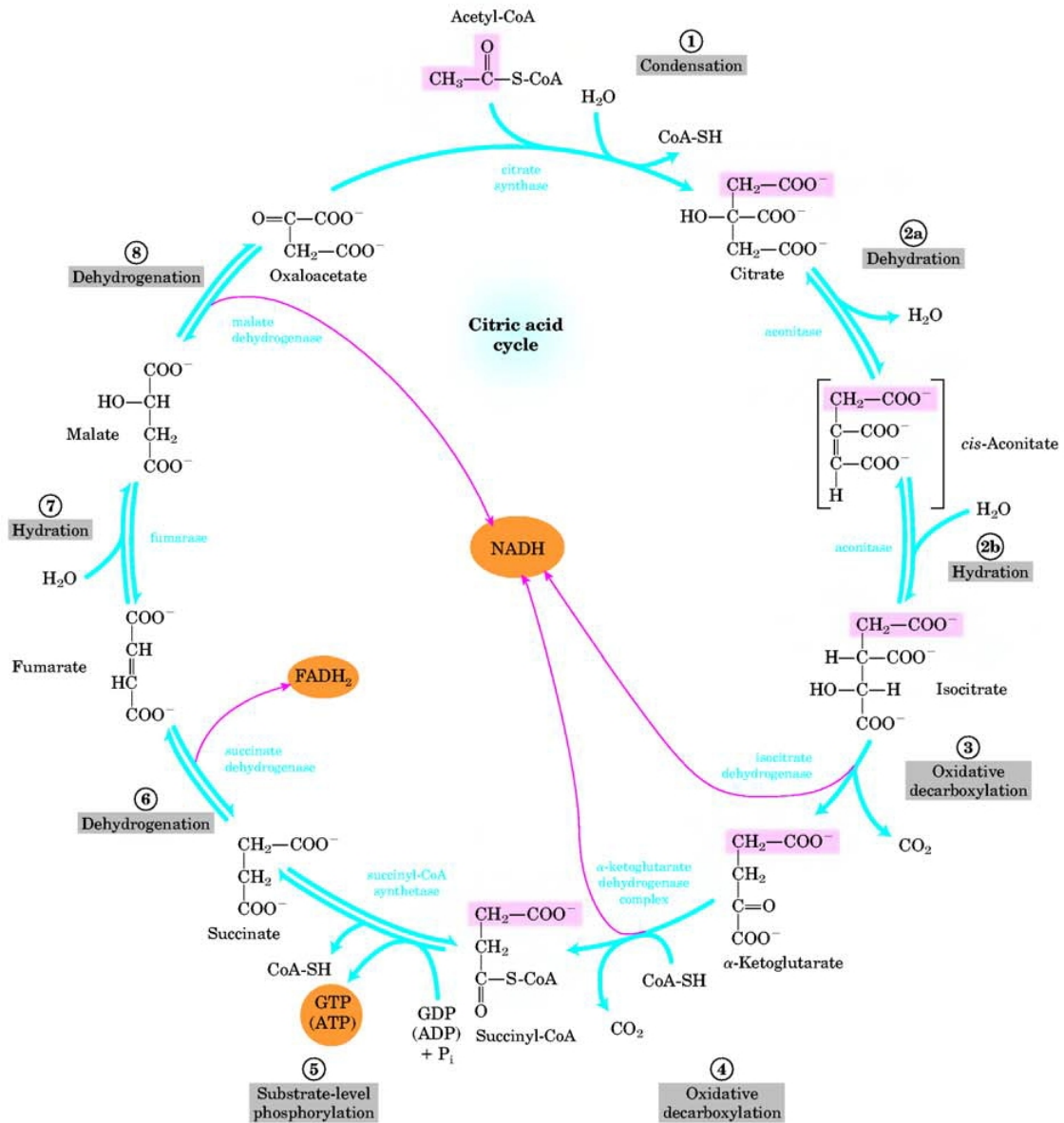


Abbildung 2.7: Citratzyklus

Bei dieser Grafik besonders gut zu sehen sind die reduzierten Coenzyme und GTP.

[aus [8] S607]

2.4.3 Atmungskette

Die hohe gespeicherte Energie der Coenzyme resultiert aus einem Elektronenpaar mit hohem Transferpotential, das jedes NAD gemeinsam mit H^+ aufnimmt, um zu $NADH + H^+$ reduziert zu werden.

In der Atmungskette, die aus einer Folge elektronenübertragenden Proteinen besteht, wird nun der Wasserstoff, welcher in der Glykolyse und dem Citratzyklus zuvor dem Substrat Glukose entzogen wurde, um die Coenzyme zu reduzieren, schließlich von diesen zusammen mit seinen Elektronen auf Sauerstoff übertragen. Bei dieser Reaktion werden die Elektronen genutzt, um durch die Atmung aufgenommenes O_2 zu H_2O zu reduzieren, was zu einer großen Menge freiwerdender Energie führt, die zur Bildung von ATP verwendet wird.

Folglich wird die Atmungskette auch oxidative Phosphorylierung genannt, stellt sie doch den Prozess dar, in dem ATP durch den Transfer von Elektronen von $NADH + H^+$ auf Sauerstoff gebildet wird. Hier wird auch klar, dass erst bei der Endoxidation Sauerstoff benötigt wird. Pro Molekül Sauerstoff, das auf diese Weise reduziert wird, werden 2,5 ATP -Moleküle bei der Oxidation von $NADH + H^+$ bzw. 1,5 ATP -Moleküle bei $FADH_2$ erzeugt. Aus diesen Zahlen wird ersichtlich, dass dieser Prozess die Hauptquelle für ATP in aeroben Organismen darstellt. 26 der 32 Moleküle ATP , die gebildet werden, wenn Glukose vollständig zu CO_2 und H_2O abgebaut wird, stammen aus der Atmungskette.

Es handelt sich somit um eine stark exergone Reaktion, das bedeutet es wird enorm viel Energie frei. Damit bei dem Freiwerden dieser extremen Energiemenge die Zelle nicht in einer Mikroexplosion zerstört würde, lässt die Atmungskette die Reaktion schrittweise ablaufen, wodurch die Energie nicht auf einmal, sondern in kleinen Paketen stetig abgegeben wird. Dies erreicht die Atmungskette durch ihren Aufbau. Eine Sequenz von 5 aufeinander folgenden Proteinkomplexe, die in der inneren Mitochondrienwand lokalisiert sind (siehe Abbildung 2.8 und Tabelle 2.1).

Bei Komplex 1 – 4 handelt es sich um Redoxsysteme mit unterschiedlichen Redoxpotentialen. Das heißt, dass die Elektronen von Komplex 1 zu Komplex 4 transportiert werden und dabei immer ein geringer Teil der Energie frei wird, bis sie schlussendlich gemeinsam mit Wasserstoff auf O_2 übertragen werden und

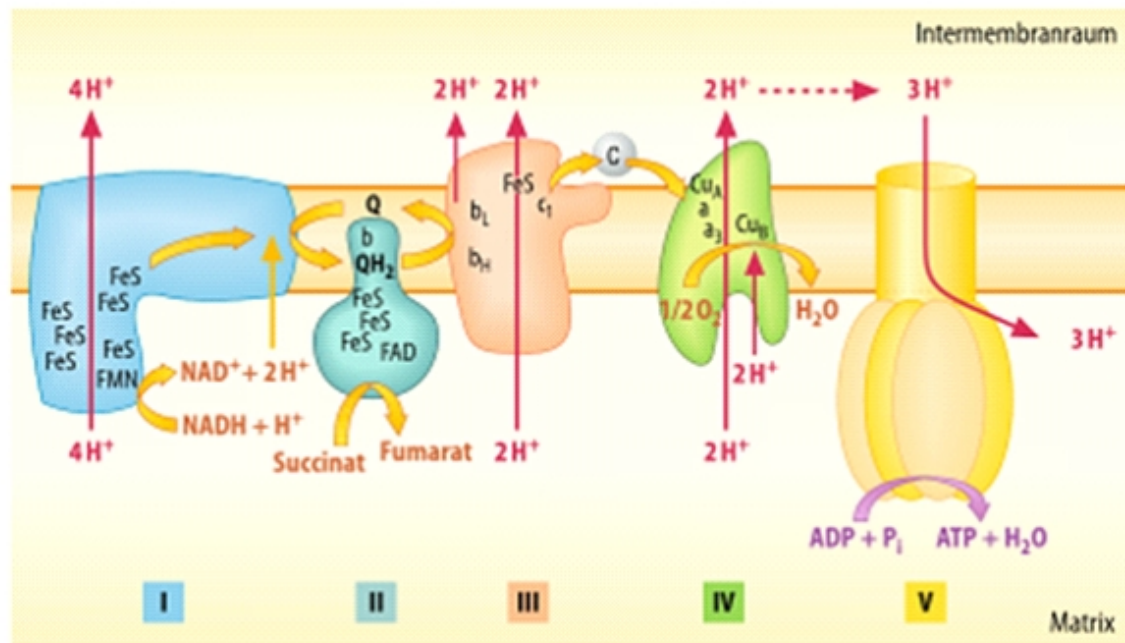


Abbildung 2.8: Komplexe der Atmungskette

[aus [7] S537]

Komplex	Bezeichnung
I	NADH: Ubichinon-Oxidoreduktase
II	Succinat: Ubichinon-Oxidoreduktase
III	Ubihydrochinon: Cytochrom c-Oxidoreduktase
IV	Cytochrom c-Oxidase
V	<i>ATP</i> -Synthase

Tabelle 2.1: Enzymkomplexe der Atmungskette

Wasser entsteht. Die bei jedem Schritt frei gewordene Energie wird ihrerseits dazu genutzt, um H^+ -Ionen mit Hilfe der Komplexe 1, 3 und 4 durch die Membran zu pumpen und somit einen elektrochemischen Gradienten zu schaffen (siehe Abbildung 2.9). Es handelt sich also um transmembrane Protonenpumpen, die multiple Oxidations-Reduktions-Zentren beinhalten.

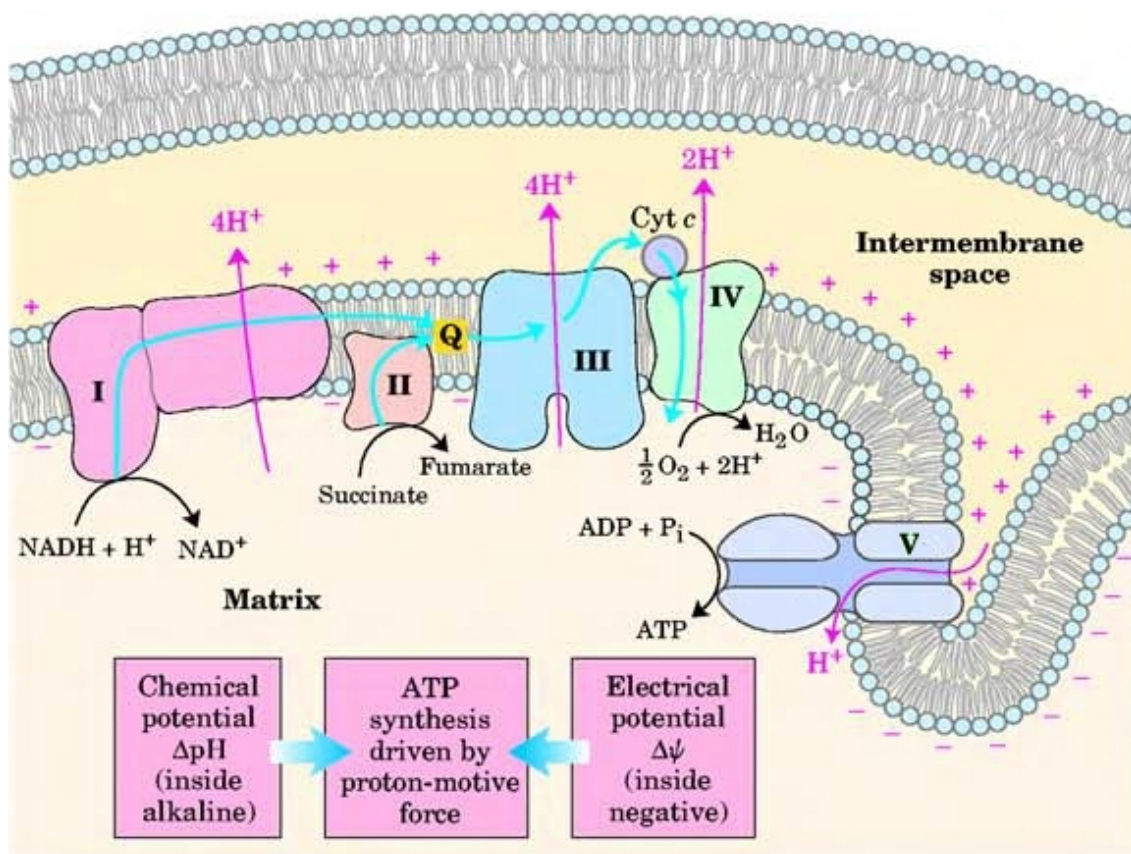


Abbildung 2.10: oxidativer Phosphorylierung
[aus [8] S705]

FAD anstelle von *NAD*, wodurch *FADH₂* als reduziertes Coenzym entsteht, das außerdem den ersten Komplex der Atmungskette überspringt und seine Elektronen gleich an den zweiten Komplex abgibt. Dadurch beträgt der Gewinn nur 1,5 *ATP*.

Wird also 1 Molekül Glukose vollständig zu *CO₂* und *H₂O* oxidiert, stellt sich das in der Gesamtübersicht wie in Tabelle 2.2 gezeigt, dar.

Die Energie, die frei wird, wenn 1 Mol *ATP* zu *ADP* und P gespalten wird, beträgt 30,5 kJ. Werden nun im Skelettmuskel 30 *ATP* aus einem Glukosemolekül bei vollständiger Oxidation in der Atmungskette gebildet, ergibt das 915 kJ/mol Glukose. Bei vollständiger Verbrennung ergibt 1 Mol Glukose 2830 kJ. Das bedeutet, die Effizienz der Atmungskette beträgt bei vollständiger Oxidation von Glukose

$$\frac{915 \text{ kJ/mol}}{2830 \text{ kJ/mol}} = 32 \%. \quad (2.8)$$

Dieser Anteil der freien Energie kann in Form von *ATP* gespeichert werden. Der Rest, ca. 2/3 geht als Wärmeenergie verloren. Teilweise kann diese Energie vom Körper noch sinnvoll genutzt werden als leistungssteigernde Erhöhung der Muskel- und Körperkerntemperatur, was man auch als Aufwärmen versteht.

Bedenkt man nun, dass etwa die Hälfte des gebildeten *ATP*'s bei Muskeltätigkeit für die Verwendung von Ionenpumpen, Herz- und Atemmuskeltätigkeit, sowie der Überwindung innerer Reibungen gebraucht werden, ergibt sich daraus ein relativ geringer mechanischer Wirkungsgrad, bei der Ausschöpfung von in der Nahrung enthaltenen Energie.

Grundsätzlich wird somit im oxidativen Stoffwechselweg der Wasserstoff der Nährstoffe, samt Elektronen in Glykolyse, oxidativer Decarboxylierung und Citratzyklus auf Coenzyme übertragen, um in dieser Form in die Atmungskette eingeschleust und dort letztendlich auf Sauerstoff übertragen zu werden. Dadurch entstehen die beiden energielosen Verbindungen *CO₂* und *H₂O*, sowie ein Protonengradient der die Bildung von *ATP* einleitet. Die im Glukosemolekül enthaltene Energie wird dabei fast zu 100% freigesetzt, wovon 32% in *ATP* gespeichert werden. Dieses wird im Anschluss durch den *ATP/ADP*-Translokator ins Zytosol transportiert und dient der Zelle nun als Energielieferant (zu sehen in Abbildung 2.11, die eine Zusammenfassung der aeroben Energiebereitstellung bietet).

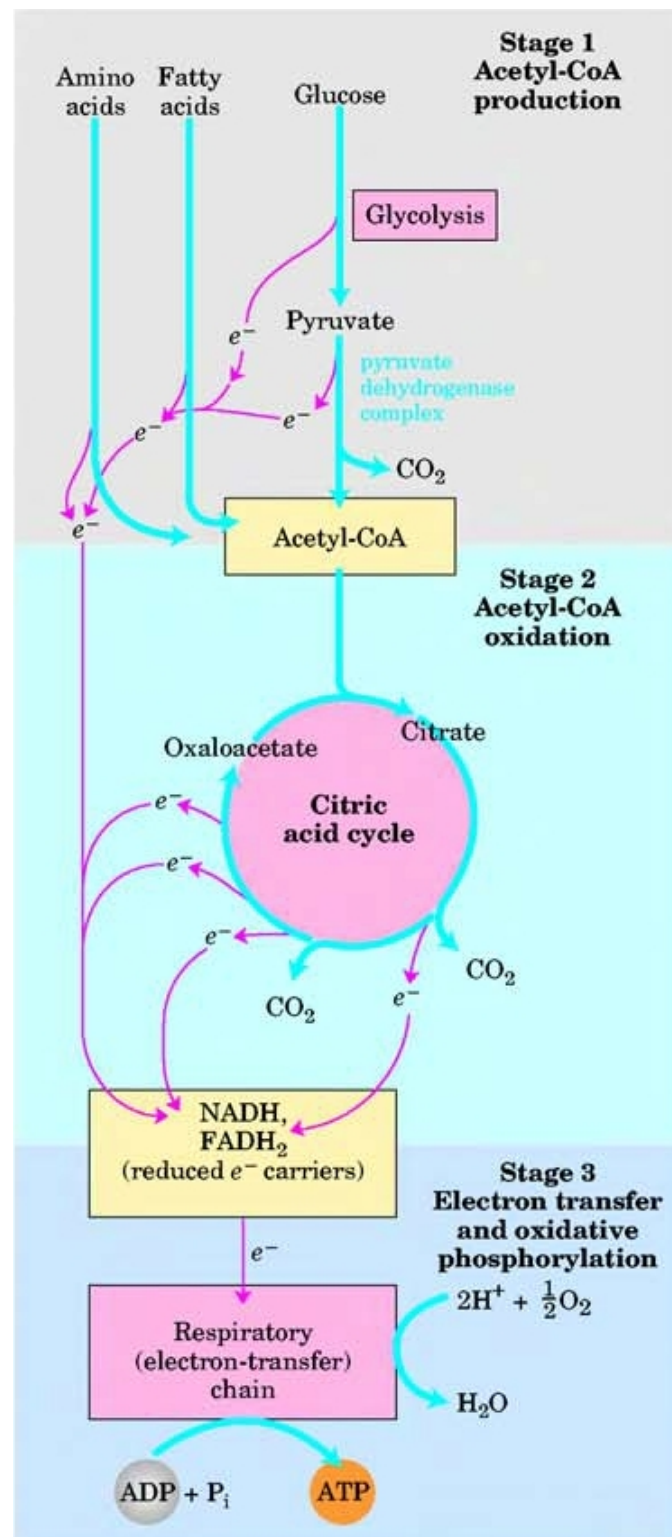


Abbildung 2.11: Übersicht: Energiebereitstellung
[aus [8] S705]

Abbaustufe	Reaktion	Coenzym-Bildung	ATP-Bilanz	ATP-Ausbeute
Glykolyse	Phosphorylierung der Glukose Phosphorylierung von Fruktose-6-Phosphat Dephosphorylierung von 2 Molekülen 1,3- Bisphosphoglycerat Dephosphorylierung von 2 Molekülen Phosphoenol- pyruvat Oxidation von 2 Molekülen Glycerinaldehyd-3-Phosphat	 2 NADH + H ⁺	-1 -1 2 2	 2
Oxidative Decarboxy- lierung	Dehydrierende Decarboxylierung von Pyruvat	2 NADH + H ⁺		
Citratzyklus	Energiereiche Abtrennung des CoA-Rests von 2 Molekülen Succinyl-CoA Oxidation von jeweils 2 Molekülen Isocitrate, α - Ketoglutarate, und Malat Oxidation von 2 Molekülen Succinat	 6 NADH + H ⁺ 2 FADH ₂	2 (GTP)	 2
Atmungskette	Oxidative Phosphorylierung: 2 NADH + H ⁺ aus der Glyko- lyse 2 NADH + H ⁺ aus der oxida- tiven Decarboxylierung 6 NADH + H ⁺ aus dem Citratzyklus 2 FADH ₂ aus dem Citrat- zyklus		5 5 15 3	 28
				32

Tabelle 2.2: ATP Ausbeute beim vollständigen Abbau der Glukose

Kapitel 3

Energievergleich zwischen anaerobe und aerobe Glykolyse

Information ist Energie. Bei jeder Weitergabe verliert sie etwas davon.

Wolfgang Herbst

Nachdem jetzt all die für diese Arbeit relevanten Energiebereitstellungssysteme bekannt sind, lässt sich auch ein Vergleich untereinander anstellen. Ausgangspunkt für die folgende Betrachtung sei die maximale Laufgeschwindigkeit eines Athleten, die vor allem von der Höhe und Art der Energievorräte in der Arbeitsmuskulatur (Beine), sowie ihrer möglichen Mobilisierungsgeschwindigkeit abhängig ist. Wie in Abbildung 3.1 klar ersichtlich ist, nimmt mit zunehmender Laufdauer die Maximalgeschwindigkeit ab.

Grund dafür ist die unterschiedliche energetische Flussrate, das ist die Energiefreisetzung pro Zeiteinheit, für die verschiedenen Brennstoffe (siehe Abbildung 3.2). Somit kommt es bei maximalen Läufen zu einer raschen Abnahme der Laufgeschwindigkeit, durch den Abbau der energiereichen Phosphate.

Sinkt durch die Belastung die Kreatinphosphatkonzentration auf unter 3 mmol/kg Muskel ab, kommt es zu einer maximalen Aktivierung der Glykolyse. Selbst bei maximalen Sprints über 30m zeigte sich eine beträchtliche Beteiligung glykolytischer Prozesse an der Energiebereitstellung (siehe Abbildung 3.3).

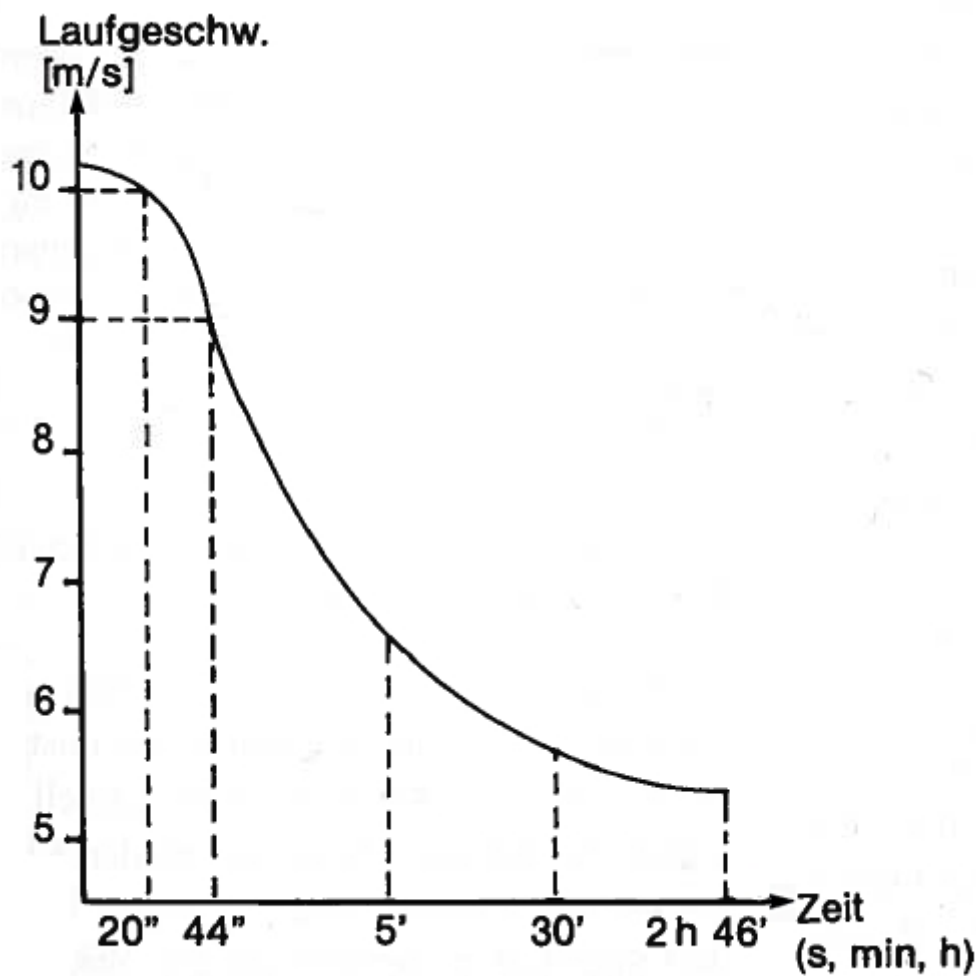


Abbildung 3.1: Maximale Laufgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeitdauer
[aus [13] Abb. 362]

Dies zeigt sehr gut die Wichtigkeit muskulärer Glykogenspeicher, selbst für Weltklassem sprinter, die bereits nach 10 Sekunden beträchtliche Laktatwerte erzielen. Wird der Lauf weiter durchgeführt, steigt das Laktat weiterhin an, bis durch den Pasteur Effekt die anaerobe Glykolyse gehemmt und auf aerobe Glykolyse umgestellt wird. Stellt man nun die *ATP*-Ausbeute von 31 mol *ATP* aus der aeroben Glykolyse (wenn der Muskel betrachtet, somit auf Glykogen zurückgegriffen und der Glycerin-3-Phosphat-Shuttle verwendet wird) den 3 mol *ATP* der anaeroben Glykolyse gegenüber, was in etwa 10% sind, so stellt sich die Frage, warum bei intensiveren Belastungen der Organismus die anaerobe Energiebereitstellung wählt.

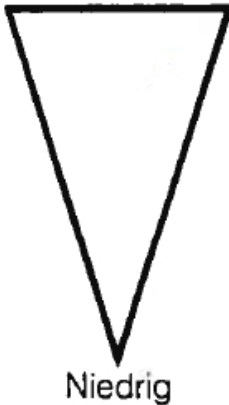
Brennstoff	Brenndauer	Schnelligkeit
ATP	Bis 3 s	
KP	Bis 6 - 10 s	
Zuckerverbrennung ohne Sauerstoff	Bis 30 - 40 s	
Zuckerverbrennung mit Sauerstoff	Bis 30 - 60 min	
Fettverbrennung mit Sauerstoff	Stunden	

Abbildung 3.2: ATP-Resynthese
[aus [13] Abb. 361]

Die Antwort ist die maximale Umsatzrate der Glukose, die ungefähr 25 mal höher ist, als die von Zitratzyklus und Atmungskette. Dies resultiert in einer mehr als doppelt so großen *ATP*-Resyntheserate pro Zeiteinheit. Das bedeutet mit der aeroben Glykolyse wählt der Organismus die ökonomische Variante, da die Endprodukte Wasser und Kohlendioxid beinahe energielos sind und somit der Abbau der Glukose praktisch vollständig abläuft. Der Körper gewinnt dadurch 10 mal so viel Energie aus einem Molekül Glukose, als in der anaeroben Glykolyse, die als weiteren Nachteil, die Anhäufung von Laktat mit sich bringt, was bei Erreichen einer gewissen maximalen Blutkonzentration von ca. 20 mmol/l zum Abbruch oder starken Herabsetzung der Belastung, aufgrund der maximal tolerierbaren Azidose führt. Der Grund warum pro Zeiteinheit mehr Energie in der anaeroben Glykolyse umgesetzt werden kann, als in der aeroben, hat mit der Ablaufgeschwindigkeit der Reaktionen zu tun. Die Energiebereitstellung ist deshalb schon langsamer, da die Aktivierung der Atem- und Herztätigkeit, welche einen vermehrten Sauerstofftransport zur arbeitenden Muskulatur gewährleistet, eine gewisse Zeit benötigt. Wie bereits kurz erwähnt, handelt es sich hierbei am Beginn jeder Belastung, um das O_2 -Defizit. Das heißt die aufgenommene Sauerstoffmenge ist im Vergleich zum Bedarf zu gering. Nach Beendigung der Arbeit, kommt es zur Mehraufnahme von Sauerstoff um das O_2 -Defizit zu begleichen. Streng genommen handelt es sich jedoch nicht um eine Sauerstoffschuld, da mehr Sauerstoff nachgeatmet wird, als

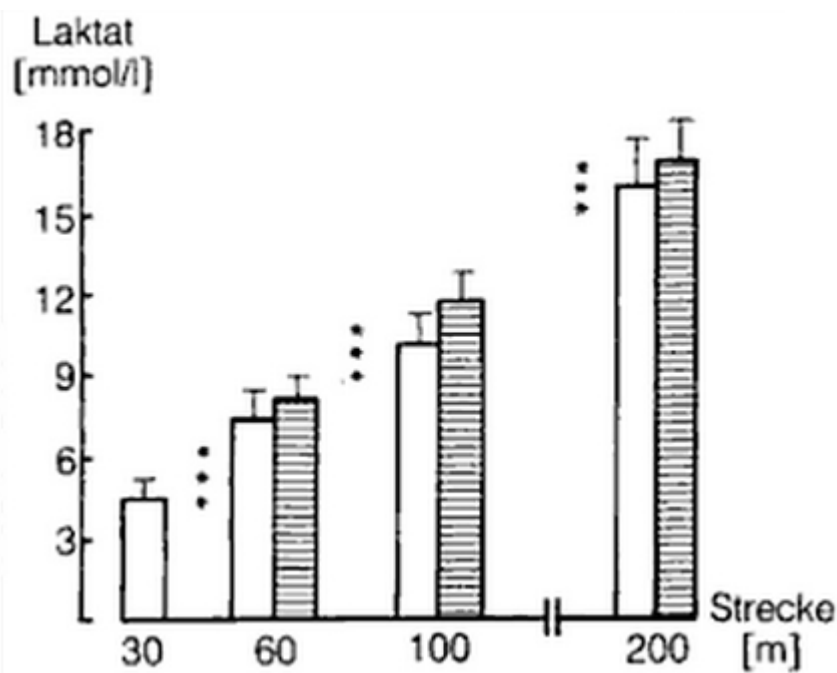


Abbildung 3.3: Blutlaktatspiegel nach Sprintbelastungen über unterschiedliche Streckenlängen

Das Diagramm vergleicht in dieser Studie auch den Blutlaktatspiegel zwischen Test (weißer Balken) und Wettkampf (strichlierter Balken). Für die Betrachtung der Laktatproduktion ist dies jedoch nicht relevant.

[aus [13] Abb. 364]

anfänglich eingegangen wurde. In der Studie von Brooks und Fahey (1984) wird deshalb die Bezeichnung: „excess postexercise oxygen consumption“ (EPOC) vorgeschlagen (in [4])(siehe Abbildung 3.4).

Die Energiebereitstellung erfolgt in dieser ersten Phase anaerob alaktazid sowie auch laktazid über die anaerobe Glykolyse. Dies zeigt auch deutlich, dass bei Bedarf, die Enzyme der anaeroben Oxidation sofort katalysieren und die Kapazität dieser Enzyme im Vergleich zur aeroben Glykolyse relativ groß ist. Als limitierendes Enzym fungiert hier die bereits erwähnte Phosphofructokinase 1. Sie erreicht eine maximale Umsatzrate von 1 mmol Glukose/kg Muskel/Sekunde [4].

Ausgehend von Glykogen liefert die anaerobe Glykolyse 3 mol *ATP*/mol Glukose. Das bedeutet, dass die maximal erreichbare laktazide *ATP*-Resyntheserate 3 mmol *ATP*/kg Muskel/Sekunde ist. Dies gilt allerdings nur für einen 100m Lauf. Bereits bei einem 400m Lauf wird die Glykolyse durch die steigende Laktatkon-

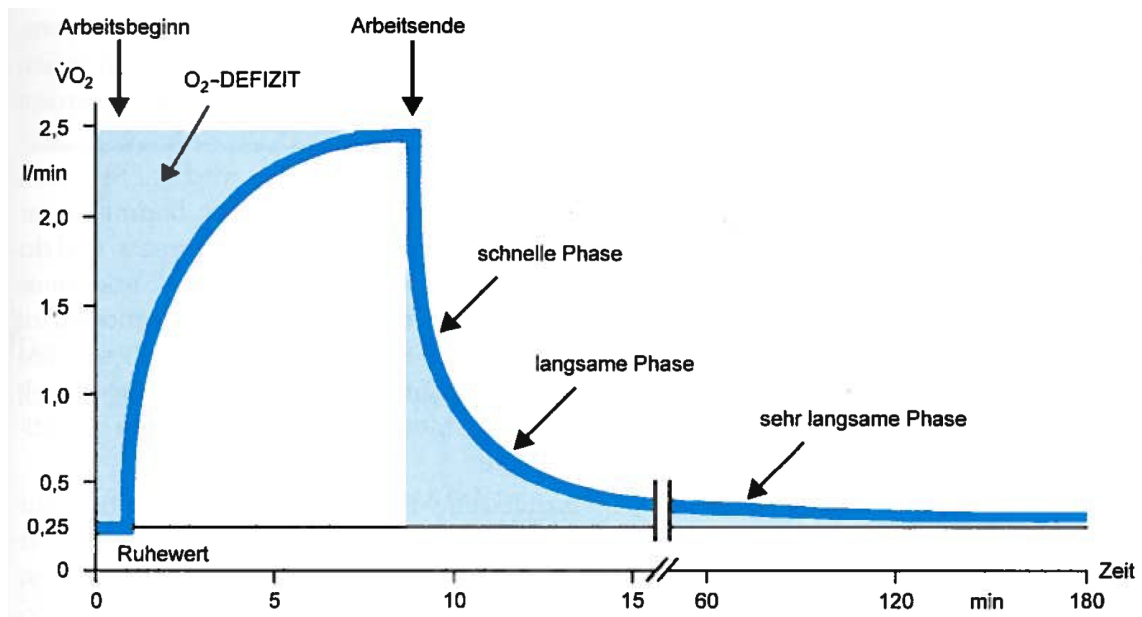


Abbildung 3.4: Sauerstoffdefizit
[aus [4] S377]

zentration so weit gehemmt, dass im Mittel von einem Wert von etwa 1-1,5 mmol *ATP*/kg Muskel/Sekunde auszugehen ist.

Der limitierende Faktor der aeroben Energiebereitstellung ist die maximale Oxidationsrate von Wasserstoff in der Atmungskette. Dieser enzymatische Prozess ist auch durch Training nicht steigerbar. Nur die Anzahl der Mitochondrien kann erhöht werden, was insgesamt zur Zunahme der maximalen Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2max}$) führt.

Die $\dot{V}O_{2max}$ stellt das Bruttokriterium der Ausdauerleistungsfähigkeit dar und beschreibt jene Menge Sauerstoff, die maximal vom Organismus aufgenommen, zur arbeitenden Muskulatur transportiert und verstoffwechselt werden kann. Sie dient als Leistungsparameter des aeroben Systems und damit verbunden jeder Form von Ausdauerleistung. Bei untrainierten Männern beträgt sie zwischen 3 und 4 Litern O_2 /min. Bezogen auf die Körpermasse bei 75 kg ergibt das 40 bis 53 ml/kg Körpergewicht. Ausgehend von 40% Muskulatur (30 kg), wovon wiederum maximal 80% (24 kg) gleichzeitig nutzbar sind, erhält man pro kg Muskel in etwa 150 ml/min. 1 mmol Sauerstoff resynthetisiert in der aeroben Glykolyse 5,2 mmol *ATP*. Da 150 ml Sauerstoff 6,7 mmol entsprechen, können somit insgesamt 34,8 mmol

$ATP/kg/min$ beziehungsweise $0,58 \text{ mmol } ATP/kg \text{ Muskel/Sekunde}$ resynthetisiert werden.

Verglichen mit den $1-1,5 \text{ mmol } ATP/kg \text{ Muskel/Sekunde}$, die aus der anaeroben Glykolyse umgesetzt werden können, liefert die aerobe Glykolyse nur etwa die Hälfte pro Sekunde. Tabelle 3.1 lässt sich nun daraus ableiten.

Substrat	Maximale ATP -Resyntheserate
$ATP, KP \rightarrow ADP, \text{Kreatin}$	$3 - 6 \text{ mmol/kg Muskel/Sekunde}$
$Glykogen \rightarrow \text{Laktat}$	$1-1,5 \text{ mmol/kg Muskel/Sekunde}$
$Glykogen \rightarrow CO_2, H_2O$	$0,58 \text{ mmol/kg Muskel/Sekunde}$

Tabelle 3.1: Maximale ATP -Resyntheserate

Vergleicht man nun unterschiedliche Wettkampfdistanzen untereinander, gelaufen von Weltklasseathleten unter maximaler Ausbelastung, ergibt sich daraus folgende Beteiligung der Energiebereitstellung an der ATP -Resynthese, die in Abbildung 3.5 dargestellt ist.

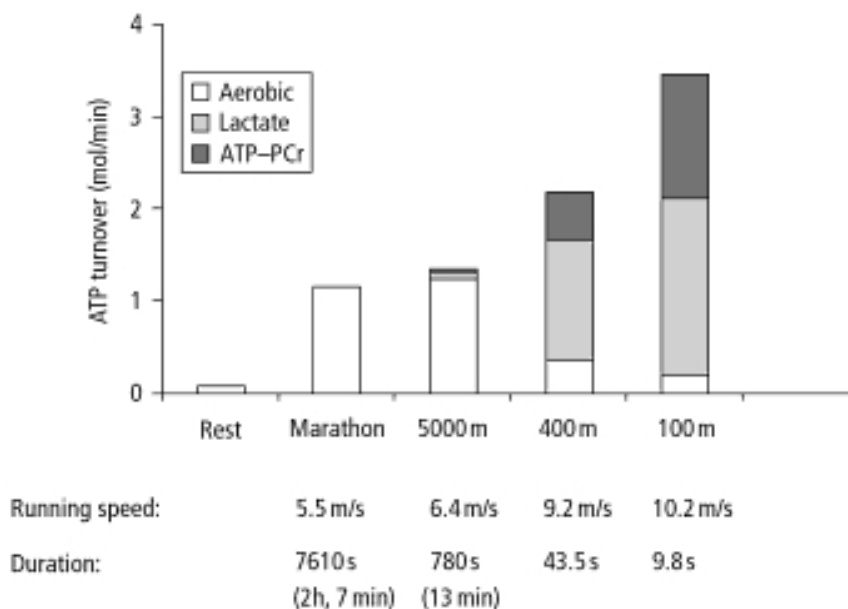


Abbildung 3.5: ATP -Turnover
 [aus [15] S34]

Wie die Abbildung 3.5 klar zeigt, ist die Energiebereitstellung aus den *ATP*-Speichern und Kreatinphosphat vor allem für den 100m Lauf relevant, verliert aber verglichen mit der Gesamtenergiebereitstellung stetig an Bedeutung und dient bereits ab einem 5000m Lauf nur mehr dem anfänglichen Ausgleich des O_2 -Defizits. Deutlich wird ebenso die Wichtigkeit der Kohlenhydrate, da der eindeutig größte Teil über die Glykolyse, je nach Intensität aerob oder anaerob gedeckt wird.

Die Beteiligung der verschiedenen Energiebereitstellungsformen am gesamten Energieumsatz bei verschieden langen Maximalbelastungen sieht laut Haber [2], wie in Tabelle 3.2 gezeigt, aus.

	10sek	1min	2min	3min	4min	8min	20min
O_2 gesamt Liter	2,1	7,2	8	10,5	13	22,6	45,5
Davon anaerob %	98	70	63	48	38	22	11
Davon aerob %	2	30	37	52	62	78	89

Tabelle 3.2: Anteil der verschiedene Energiebereitstellungsformen am gesamten Energieumsatz bei verschieden langen Maximalbelastungen

[aus [2] S41]

Die für diese Studie relevanten Zeiten sind zwischen 2 und 3 Minuten für den 600m-Lauf, sowie 20 Minuten und darüber für den 4000m-Lauf. Da es sich um maximale Belastungen handelt, wird der überwiegende Teil der Energie über Glykogen gedeckt. Dominiert bei Belastungen über 2 Minuten noch die anaerobe Energiebereitstellung, ist bereits bei einer Dauer von 3 Minuten der Anteil ausgeglichen und bei 20 Minuten zu 90% auf die aerobe Glykolyse umgestellt.

Doch nicht nur für Langstreckenläufe nimmt die Glykolyse eine wichtige Rolle ein. Wie schon zuvor in der Studie von Mader (aus [4]) beschrieben, ist die glykolytische Aktivität bereits bei einem 100m Sprint gegeben, durch die Abnahme von Kreatinphosphat und der daraus resultierenden maximalen Aktivierung der Glykolyse.

Hultman (aus [16]) zeigte sogar, dass bei maximaler Muskelkontraktion sogar nach 1,3 Sekunde eine glykolytische Aktivität zu verzeichnen ist, die mit zunehmender Belastungsdauer natürlich weiter zunimmt, während die Energiebereitstellung aus Kreatinphosphat durch die begrenzte Kapazität nach 20 Sekunden auf ein

Minimum gesunken ist (siehe Abbildung 3.6).

All diese Studien verdeutlichen, wie groß die Beteiligung der glykolytischen Prozesse an der Gesamtenergiebereitstellung ist und welche Wichtigkeit eine ausreichende Menge Glykogen selbst für Sprints hat. Denn je größer die Glykogenspeicher sind, um so leichter kann auch deren Abbau vonstatten gehen. Neigen sich die Vorräte allerdings dem Ende, so hält der Körper vermehrt an ihnen fest.

Ein Weiterer Vorteil von großen Muskelglykogenspeichern ist die Tatsache, dass mit jedem Gramm Glykogen 2,7g Wasser und 19 mg Kalium gebunden werden. Somit hat der Ladungszustand ebenso Auswirkung auf den Wasserhaushalt und dem Mineralstoffwechsel, da mit dem fortschreitenden Abbau des Glykogens, das gespeicherte Wasser und Kalium freigesetzt wird.

Die Frage, wie Glykogen synthetisiert wird, wird nach genauerer Betrachtung der Kohlenhydrate behandelt.

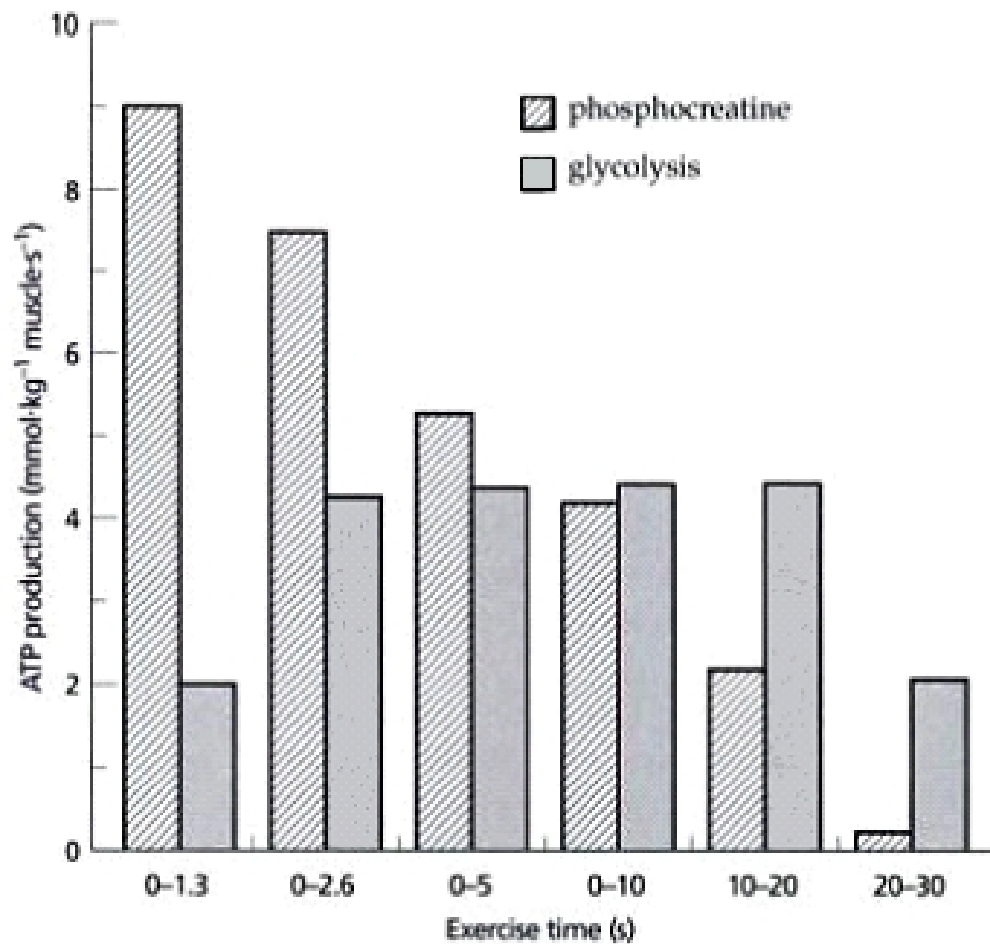


Abbildung 3.6: anaerobe ATP-Produktion

Es sei zu erwähnen, dass es sich bei dieser Studie um gefriergetrocknete Muskeln handelte, weshalb ein Umrechnungsfaktor von 4,3 notwendig ist, um die ca. 77% Wasser, die 1 kg Feuchtmuskel beinhaltet, auszugleichen, und die oben angegebenen $\text{mmol/kg Muskel/Sekunde}$ der maximalen *ATP*-Resyntheserate zu erhalten.

[aus [16] S89]

Kapitel 4

Kohlenhydrate

Verschwende nicht die Zeit mit
schlechten Menschen: Gemeines
Rohr wird nie dir Zucker geben.

Ludwig van Beethoven

Kohlenhydrate zählen neben Protein und Fett zu den 3 Hauptnährstoffen der menschlichen Ernährung und sind mengenmäßig, die am zahlreichsten synthetisierten Substanzen auf der Erde. Als rasch metabolisierbare Substrate dienen sie dem Körper als bevorzugte Energiequelle bei sportlichen und mentalen Leistungen, bilden Gerüstsubstanzen im Bindegewebe und sind in Form von Ribose Teil der DNA. In diesem Kapitel wird Aufbau, Vorkommen und Verdauung der Kohlenhydrate betrachtet, basierend auf den Werken von [3, 5, 7, 8].

4.1 Aufbau

Chemisch gesehen sind Kohlenhydrate aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) aufgebaut, zu so genannten Polyhydroxyaldehyden bzw. -ketonen und umfassen Mono-, Di- und Polysaccharide.

Monosaccharide sind die einfachsten Zucker. Zu ihnen zählt auch die Glukose (siehe Abbildung 4.1). Sie besteht aus 6 C-Atomen, 12 H-Atomen und 6 O-Atomen und ist der Hauptvertreter dieser Stoffgruppe und von zentraler Stoffwechselbedeutung. Nicht nur, dass fast alle über die Nahrung aufgenommenen Kohlenhydrate in Glukose umgewandelt werden, bevor diese in der Glykolyse unter Energiegewinn

verstoffwechselt wird, werden auch alle im Körper vorkommenden Monosaccharide aus Glukose synthetisiert.

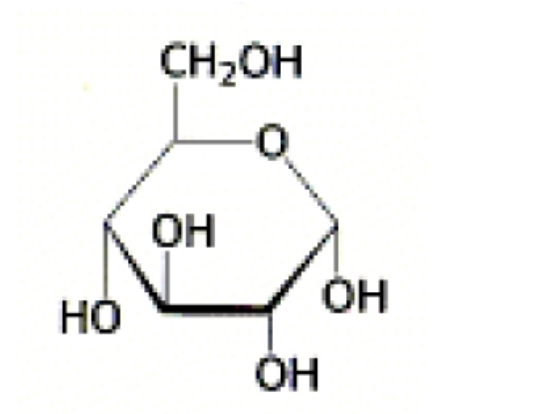


Abbildung 4.1: α -D-Glukose
[aus [3] S1442]

Werden Monosaccharide über glykosidische Bindungen miteinander verknüpft, bauen sich daraus zuerst Di- und in weiterer Folge Polysaccharide auf. Der Hauptvertreter der Disaccharide ist Saccharose, der „Haushaltszucker“ bestehend aus einer Verbindung zwischen einem Molekül Glukose und einem Molekül Fructose. Polysaccharide haben die gleiche Bauweise und verknüpfen in Form einer langen Kette etliche Monosaccharide miteinander.

So wird auch das für Menschen wichtigste Nahrungskohlenhydrat, die Stärke aufgebaut. Sie besteht nur aus Glukose verknüpft zu einer langen unverzweigten Kette, Amylose genannt, und Amylopektin, ein sehr stark verzweigtes Riesenmolekül, welches durch diese Verästelung eine sehr hohe Dichte und ein großes Molekulargewicht erhält.

4.2 Vorkommen

Hauptnahrungsquelle für Kohlenhydrate sind vor allem pflanzlicher Herkunft wie Getreide, Obst, Gemüse, kommen aber auch in geringerer Menge in tierischen Produkten wie Milch vor. Süßigkeiten haben ebenfalls einen beträchtlich hohen Zuckeranteil weisen aber eher eine geringe Nährstoffdichte auf, weshalb für eine vollwertige Ernährung Nahrungsmittel der zuvor erwähnten Lebensmittelgruppen zu bevorzugen sind, da diese auch Mineralstoffe, Spurenelemente und Vitamine

beinhalten.

Auf zu schwer verdauliche Kohlenhydrate unmittelbar vor dem Training, oder Wettkampf sollte allerdings verzichtet werden, da es erstens zu lange dauert bis die Energie dem Sportler zur Verfügung steht und zweitens der Organismus mit Verdauen beschäftigt ist, was die Leistungsfähigkeit mindert.

4.3 Verdauung

Die Verdauung der Kohlenhydrate beginnt bereits im Mund. Die Speichelamylase fängt an glykosidische Bindungen der Stärke zu lösen. Den größten Teil der Verdauung übernehmen aber die Pankreasamylase, Maltase und die Oligo-1,6- α -Glucosidase im Dünndarm und der Dünndarmmukosa, wo die Stärke zu Glukose aufgespalten wird.

Mit 80% ist Glukose das mengenmäßig am meisten aufgenommene Kohlenhydrat. Absorbiert wird sie durch einen für Glukose spezifischen Na^+ -abhängigen Transporter (GLUT), worüber sie in das Pfortadersystem gelangt, welches sie zur Leber transportiert. Auch die Muskulatur besitzt einen Glukosetransporter ($GLUT_4$), der unter Belastung, sprich Muskelkontraktionen und Energiemangel, oder Einwirken von Insulin dafür sorgt, dass Glukose in die Muskelzelle gelangen kann. Nach Energiebedarf wird nun entschieden, ob Glukose durch die Glykolyse abgebaut und unter Energielieferung direkt verwertet, oder für spätere energetische Engpässe in Form von Glykogen gespeichert wird.

Kapitel 5

Glykogen

When my horse is running good, I
don't stop to give him sugar.

Douglas Horton

Glykogen ist die Speicherform der Glukose im menschlichen Organismus. Vorwiegend in Leber und Muskel, aber fast in jeder Zelle in geringen Konzentrationen anzutreffen, stellt es einen leicht mobilisierbaren Energiespeicher dar, der in kurzer Zeit und wenigen Reaktionsschritten *ATP* liefern kann.

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Glykogenaufbau, der Glykogenbiosynthese, sowie der Glykogenolyse basierend auf den Werken von [3, 5–8].

5.1 Aufbau

In seinem Aufbau der Stärke ähnelnd, besteht Glykogen ebenfalls nur aus Glukose, die genauso über $\alpha 1-4$ glykosidische Bindungen miteinander verknüpft sind und sich über $\alpha 1-6$ glykosidische Bindungen verzweigen (siehe Abbildung 5.1).

Der Unterschied zur Stärke liegt jedoch vor allem an der höheren Anzahl der Verzweigungstellen, wodurch ein noch größeres Molekül mit einer noch höheren Dichte entsteht (zu sehen in Abbildung 5.2).

Dadurch erhält das Glykogenmolekül mehrerer Enden, an denen es abgebaut werden kann, um so bei Bedarf schnell viel Energie liefern zu können.

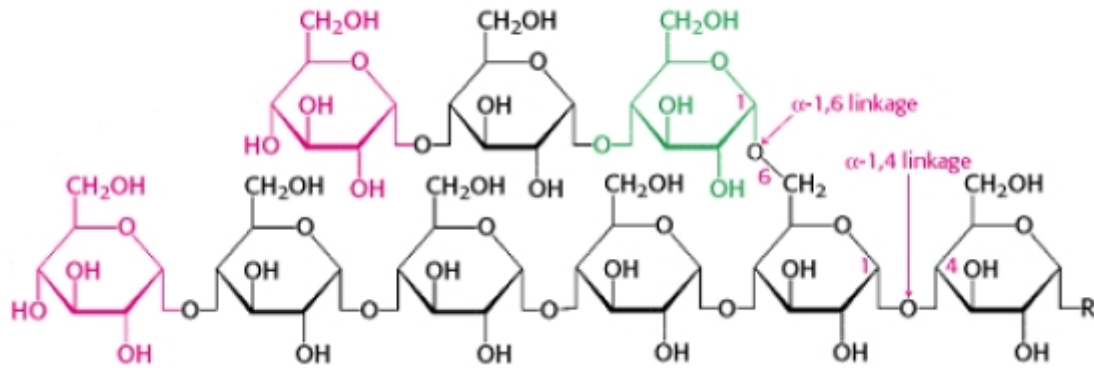


Abbildung 5.1: Glykogen

[aus [3] S866]

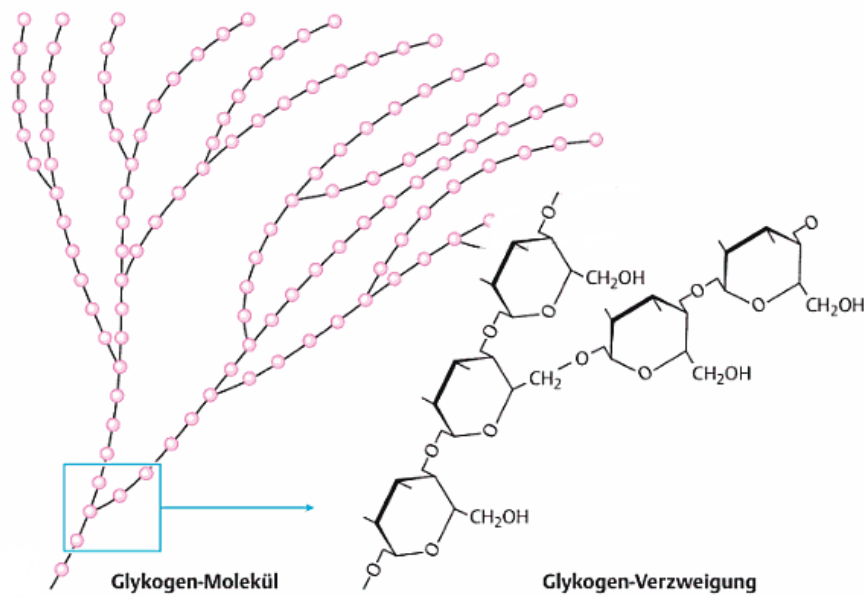


Abbildung 5.2: Glykogenverzweigung

[aus [17] S170]

Diese Energie macht sich vor allem die Skelettmuskulatur zu Nutze, die durch die anaerobe Glykolyse in kurzer Zeit, im Stande ist viel *ATP* zu gewinnen. Der neben der Muskulatur zweite Hauptspeicher für Glykogen, die Leber, hat die Aufgabe, den in strengen Grenzen gehaltenen Blutzuckerspiegel konstant zu halten. Sie kann freie Glukose aus Glykogen mobilisieren und an das Blut abgeben, die vor allem für das Gehirn und gesamte Nervensystem als Energieträger zur Verfügung steht.

5.2 Biosynthese

Die Glykogenbiosynthese in der Leber geschieht hauptsächlich nach kohlenhydratreicher Nahrungsaufnahme. Nach Verdauung und Absorption der Glukose wird diese über die Pfortader zur Leber transportiert und mit Hilfe des insulinunabhängigen Transporters *GLUT₂* aufgenommen und in Glykogen umgewandelt. Der Glykogenaufbau erfolgt in 3 Schritten.

Zuerst wird analog zur Glykolyse die Glukose zu Glukose-6-Phosphat phosphoryliert und anschließend zu Glukose-1-Phosphat isomerisiert.

Nun muss dieses Molekül aktiviert werden. Dazu reagiert es mit UTP zur UDP-Glukose. Diese kann nun durch das Enzym Glykogensynthase auf ein bereits bestehendes Glykogenmolekül übertragen werden.

Das Glukosemolekül wird mittels einer α 1-4 glykosidischen Bindungen verknüpft, wodurch ebenfalls UDP wieder abgespalten und rephosphoryliert wird, um weiteren Glukosemolekülen wieder zur Verfügung zu stehen.

Die Verzweigungen entstehen durch das branching enzyme, das nach einer Kettenlänge von 6-11 Glukoseresten eine aus mindestens 6 Glukoseeinheiten lange Kette glykosidisch verknüpft. Eine Zusammenfassung ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

Die Glykogensynthese im Muskel geschieht auf fast identem Weg, mit dem Unterschied, dass der insulinabhängige Transporter *GLUT₄* für den Glukosetransport in die Zelle verantwortlich ist. Die Funktion des im Muskel gespeicherten Glykogens ist jedoch eine andere. Dient das Leberglykogen der Aufrechterhaltung der Blutglukose, so ist das Muskelglykogen ein rein lokaler Energieträger. Der Grund dafür wird beim Glykogenabbau deutlich.

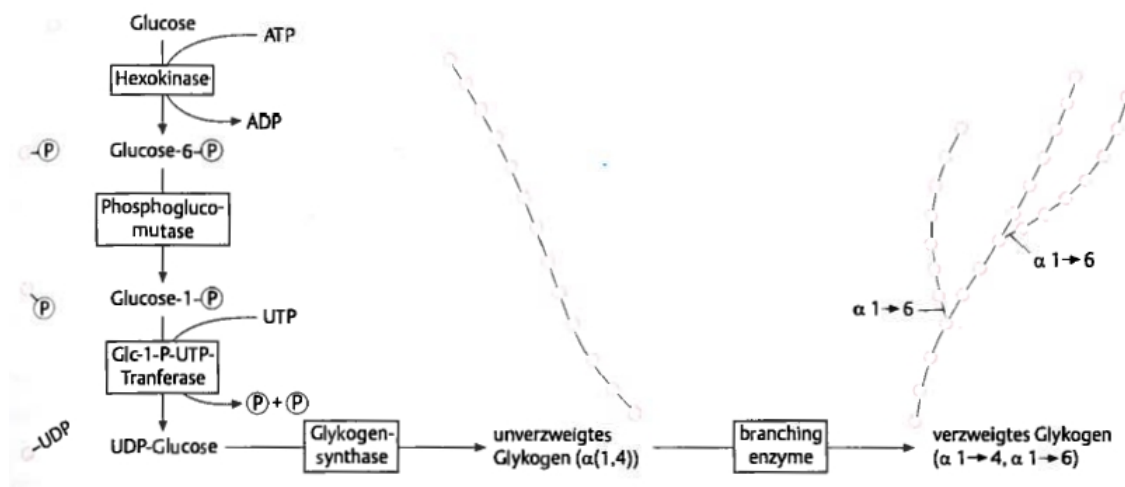


Abbildung 5.3: Glykogenaufbau
[aus [6] S39]

5.3 Glykogenolyse

Die Glykogenolyse ist im Prinzip die Umkehrung der Synthese.

Zuerst wird an freien Enden des Glykogens durch das Enzym Glykogenphosphorylase Glukose-1-Phosphat abgespalten. Dies ist auch das geschwindigkeitsbestimmende und damit regulierende Enzym des Glykogenstoffwechsels. Da die Glukose aus dem Glykogenaufbau bereits einen Phosphatrest besitzt, muss 1 *ATP* weniger anfänglich zur Aktivierung herangezogen werden, wodurch in der Nettobilanz am Ende 1 *ATP* mehr zu Buche steht. Ein debranching enzyme ist nötig, um die $\alpha 1\text{-}6$ -Verzweigungen zu lösen, welche hydrolytisch gespalten wird, wodurch freie Glukose entsteht.

5.4 Unterschied zwischen Leber und Muskel

Ein entscheidender Unterschied zwischen Leber und Muskel stellt die Anwesenheit der Glukose-6-phosphatase dar. Dieses Enzym fehlt nämlich der Muskulatur, weshalb Glukose-6-phosphat nicht zur freien Glukose dephosphoryliert werden kann. Allerdings kann nur freie Glukose die Zelle auch wieder verlassen, was zur Folge hat, dass einmal in der Muskelzelle gespeichertes Glykogen auch nur dort zur Energiegewinnung durch die Glykolyse herangezogen werden kann. Somit kann dieses Glykogen weder zur Erhöhung des Blutzuckers verwendet werden, noch ist

es möglich, dass beispielsweise in der Armmuskulatur gespeichertes Glykogen in der Beinmuskulatur eingesetzt werden kann, wenn deren Speicher leer sind und vica versa.

Dies ist besonders wichtig bei Berechnungen, ob die Glykogenreserven für eine bestimmte Belastung ausreichend sind. Denn auch wenn der Gesamtspeicher der Muskulatur, ausgehend von 10g bis 15g Glykogen/kg Muskel bei 30 kg Gesamtmuskulatur 300g bis 450g Glykogen beträgt und zusätzlich 80g Leberglykogen vorhanden sind, ergibt das zwar in etwa 500g Glykogen, doch bedeutet dies nicht, dass die gesamte Menge auch genutzt werden kann.

5.5 Cori-Zyklus

Es sollte dennoch erwähnt werden, dass für den Organismus ein Stoffwechselweg existiert, der indirekt dazu im Stande ist, Muskelglykogen zur Erhöhung der Blutglukose nutzbar zu machen. Es handelt sich hierbei um den so genannten Cori-Zyklus, der zwischen 20 und 50% der gesamten Glykogensynthese ausmachen kann [5].

Dies geschieht, wenn durch intensive Belastung ein Sauerstoffdefizit entsteht und die Muskulatur über anaerobe Glykolyse Energie bereitstellt. Das anfallende Laktat kann im Gegensatz zu Glukose-1-Phosphat die Zelle verlassen und wird über das Blut zur Leber transportiert. Dort wird Laktat im Zuge der Glukoneogenese, also der Biosynthese von Glukose aus Nicht-Kohlenhydratvorstufen wieder zu Glukose aufgebaut, um dem Körper erneut als Substrat zu dienen.

Kapitel 6

Ausdauer

Nicht die Genialen, die Zähen
erreichen ihr Ziel.

Elsa Rentrop

Da es sich sowohl beim 600m-als auch beim 4000m-Lauf um Beanspruchungsformen der Ausdauer handelt, ist es für das Verständnis wichtig, diesen Begriff ebenfalls zu erklären.

In diesem Kapitel wird deshalb der Begriff „Ausdauer“ zuerst definiert und anschließend zwei für diese Arbeit relevanten Formen der Ausdauer im Speziellen besprochen, basierend auf den Werken von [2, 4, 9, 13].

6.1 Begriffsdefinition

„Ausdauer ist die Fähigkeit, durch Muskeltätigkeit verbrauchtes *ATP* durch Steigerung der Produktion zu resynthetisieren, und damit eine neue Leistungshomöostase für *ATP* einzustellen“ [2].

Dies ist vor allem als physiologische Definition zu verstehen, da diese Fähigkeit auf physiologischen Parametern, wie der funktionellen Kapazität der Atmung, Kreislauf und Energiestoffwechsel der Skelettmuskulatur basiert.

Auf dieser Grundlage beruhen alle weiteren Definitionen, die vor allem aus dem Bereich der Sportwissenschaften stammen und meist unter Ausdauer einen psychophysischen Ermüdungswiderstand des Sportlers verstehen. Beispielsweise die Fähigkeit, ein bestimmtes Tempo möglichst lange aufrecht zu erhalten, oder eine bestimmte Strecke mit möglichst hoher Geschwindigkeit zurückzulegen.

Doch der Ausgangspunkt ist immer ein biochemischer, nämlich die Fähigkeit zur *ATP*-Resynthese. So lange der Organismus dazu im Stande ist, den *ATP*-Spiegel aufrecht zu erhalten, nur so lange kann eine Leistung auch erbracht werden.

Welches Energiebereitstellungssystem der Körper nutzt, hängt von der Intensität der Belastung ab, weshalb die allgemeine Ausdauer von einer “speziellen“ Ausdauer“, die von der Wettkampfdauer abhängig ist, unterschieden werden kann. So nutzt der Athlet bei einem 600m-Lauf vor allem die laktazid anaerobe Ausdauer, während bei einem 4000m-Lauf besonders die intensiv aerobe Ausdauer von Bedeutung ist.

6.2 Laktazid anaeroben Ausdauer

„Die *ATP*-Synthese erfolgt bei der laktazid anaeroben Ausdauer durch die Glykolyse.“ [2]. Durch die hohe Belastungsintensität wird die Möglichkeit der aeroben *ATP*-Resynthese überstiegen und es fällt durch die anaerobe Glykolyse rasch viel Laktat an. Relevant ist diese Form der Ausdauer für Wettkämpfe, deren Dauer 6-8 min nicht überschreiten.

6.3 Intensiv aerobe Ausdauer

„Bei der intensiv aeroben Ausdauer erfolgt die *ATP*-Synthese auf der Basis ausschließlicher Glukoseoxidation.“ [2]. Das heißt die Belastungsintensität beträgt 60-70% der $\dot{V}O_{2max}$. Physiologisch gekennzeichnet ist diese Phase mit einem Laktat-steady state ¹, das umso höher liegt, je kürzer die Belastungsdauer ist. Beispielsweise erreichen Sportler ein Laktat-steady state von 10-14 mmol/l bei einer Belastungsdauer von 4 min, bei 30 min mit niedrigerer Intensität ca. 4 mmol/l.

¹Aufrechterhaltung des inneren Milieus und Stabilisierung der Anpassungsvorgänge an die aufgetretene Belastung

Kapitel 7

Ermüdung und Erschöpfung

Es gibt mehr Leute, die
kapitulieren, als solche, die
scheitern.

Henry Ford

Dieses Kapitel erklärt die Begriffe Ermüdung und Erschöpfung auf Grundlage der Werke [2, 4, 9, 10, 13].

„Ermüdung ist ein Zustand verminderter Leistungsfähigkeit.“ [2].

“Erschöpfung ist ein Zustand aufgehobener Leistungsfähigkeit.” [2].

Bei der Ermüdung handelt es sich somit um eine reversible Abnahme der körperlichen Leistungsfähigkeit, die muskulär- metabolisch, oder zentral-koordinativ bedingt sein kann. Letzteres führt zur so genannten zentralen Ermüdung, die sich vor allem auf die koordinative Leistungsfähigkeit von Bewegungsabläufen auswirkt. Es kommt zur verringerten Aufmerksamkeit und Konzentration, sowie verlängerter Reaktionszeit, bis zu gestörter Koordination der Augenmuskeln, was Doppelbildsehen zur Folge hat. Ausgelöst wird diese Müdigkeit vom zentral geregelten Schlaf-Wachzyklus von 24 Stunden Dauer. Da die Belastung bei dieser Studie weder die kritische Dauer einer Belastung überschritten hat, noch hoch koordinative Aufgaben an die Probanden gestellt wurden, ist die zentrale Ermüdung zu vernachlässigen.

Bei sportlicher Belastung kommt es viel eher zur muskulär- metabolischen Ermüdung. Wird die kritische Belastung von 15% der alaktaziden- anaeroben Leistung bei Einsatz von mehr als 1/5 der gesamten Muskelmasse erreicht, kommt es

zur muskulären Ermüdung. Man liegt oberhalb der Dauerleistungsgrenze, über der der Muskel nicht mehr in der Lage ist, verbrauchtes *ATP* auf aerobem Wege zu ergänzen und Bildung und Elimination von Stoffwechselprodukten, wie Laktat nicht mehr im Gleichgewicht stehen. Diese Überschreitung der Anpassungsbreite bedeutet, dass aufgrund der anaeroben Glykolyse mehr Laktat gebildet wird, als eliminiert werden kann und führt durch die zunehmende metabolische Azidose zur Veränderung des inneren Milieus und letztendlich zum erschöpfungsbedingten Abbruch der Belastung. Die weitgehende Ausschöpfung der körpereigenen Energiereserven führt zum Gefühl der Müdigkeit, das den Athleten zur Verlangsamung, oder Abbruch der Belastung zwingt, bevor das Ausmaß des Verlustes lebensbedrohlich wird. Die Verlangsamung des Lauftempos wird durch eine verkürzte Schrittlänge, aufgrund verminderter Abstoßkraft erwirkt, durch die ermüdungsbedingte Abnahme der muskulären Vorinnervation¹.

Der Zeitraum bis zur Ermüdung hängt stark von der Intensität, sowie dem damit verbundenen Ausmaß des Wasserverlusts, und von der Ausgangsgröße der körpereigenen Depots zu Belastungsbeginn ab.

Die Ermüdung selbst ist ein multifaktorielles Ereignis:

- Muskulärer Kalium-Mangel, verursacht durch die hohe Innervationsfrequenz bei intensiver Belastung, wodurch Kalium aus dem Muskel verloren geht.
- Muskulärer Temperaturanstieg, über den optimalen Bereich für Enzymaktivitäten.
- pH- Abfall durch laktatinduzierter Azidose.
- Flüssigkeitsmangel, wodurch Herzminutenvolumen und Blutdruck abnehmen, was eine Reduktion des Blutflusses zur Muskulatur zur Folge hat.
- Mangel an Muskelglykogen als energielieferndes Substrat, sowie Leberglykogen mit Hypoglykämie als Folge, wodurch die Hauptenergiequelle der Nerven verloren geht.

Wird der Zustand maximaler Ermüdung, der zum unfreiwilligen Abbruch der Leistung führt, erreicht, spricht man von Erschöpfung.

¹Voraktivierung der Muskulatur ausgelöst durch einen Dehnungsreflex.

Kapitel 8

Superkompensation

Arbeite klug, nicht hart.

Dr. Gregory House

Wenn man über die Methodik des Kohlenhydratladens spricht, ist es ebenfalls wichtig den Begriff der Superkompensation zu klären. Einerseits, weil in dieser Studie versucht wurde, die körperliche Anpassung an sportliches Training weitestgehend auszuschließen, um rein den Effekt der Ernährung auf die Leistung zu ermitteln, andererseits, weil die Funktionsweise des Kohlenhydratladens selbst auf dem Prinzip der Superkompensation basiert. Dieses Kapitel erläutert den Begriff der Superkompensation auf Grundlage der Werke von [2, 13].

Während fortschreitender sportlicher Belastung nimmt aufgrund der Ermüdung (siehe Kapitel Ermüdung und Erschöpfung) allmählich die Leistungsfähigkeit ab. Nach Arbeitsende beginnt die Phase der Wiederherstellung, an dessen Ende ein Anstieg über das Ausgangsniveau hinaus stattfindet.

Diese „überschießende Wiederherstellung“, wird Superkompensation genannt. Sie ist die Grundlage für jede dauerhafte Steigerung der Leistungsfähigkeit durch Training. Jeder Sportler hat das Ziel durch genaue Trainingsperiodisierung jeweils am Zeitpunkt der Superkompensation seine nächste Trainingseinheit zu beginnen, um sich langfristig zu verbessern.

Dieses Prinzip hat Gültigkeit bei allen Anpassungsvorgängen während sportlicher Belastung. Dazu zählen Stoffwechselprozesse, strukturelle Proteine, Muskelfasern, Mitochondrien und grundsätzlich alle Substanzen, die während muskulärer, oder zerebraler Arbeit benutzt werden.

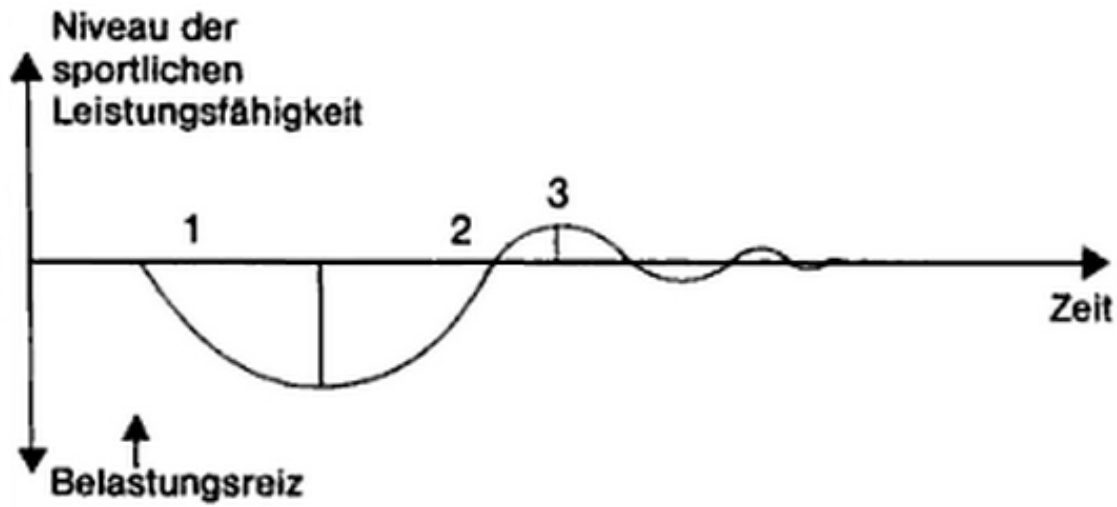


Abbildung 8.1: Superkompensation

[aus [13] Abb. 13]

Abbildung 8.1 zeigt die Unterteilung in die eben beschriebenen drei Phasen:

1. Phase der Abnahme der sportlichen Leistungsfähigkeit
2. Phase des Wiederanstiegs der sportlichen Leistungsfähigkeit
3. Phase der Superkompensation bzw. der erhöhten sportlichen Leistungsfähigkeit

Kapitel 9

Kohlenhydratladen

A lifetime of training for just ten seconds.

Jesse Owens

Im Fokus dieses Kapitels steht der Funktionsmechanismus des Kohlenhydratladens, sowie der Vorstellung einiger gängiger Methoden mit abschließender Begründung und Erläuterung der in dieser Arbeit verwendeten Methode. Dieses Kapitel basiert auf den Werken von [5, 11, 18].

Beim Kohlenhydratladen macht man sich die Superkompensation der Glykogenspeicher zu Nutze, indem man zuerst die Speicher weitestgehend entleert, um dann von dem Mehrausgleich zu profitieren, der die Speicherkapazität für Kohlenhydrate erhöht. Nach der vollständigen Entleerung der Speicher durch eine Belastung ist der Organismus am empfänglichsten um Kohlenhydrate zu laden, da die Wiederherstellung der energetischen Quellen für den Körper im Vordergrund steht. Zurückzuführen ist dieser Effekt auf die belastungsinduzierte erhöhte Aktivität der Glykogensynthese. Auch in der anschließenden langsamen Phase der Superkompensation weisen die Glykogenspeicher eine erhöhte Aufnahmefähigkeit für Kohlenhydrate auf.

Auf Basis dieses Wissens entwickelten sich einige Methoden, die nun im Detail vorgestellt werden.

9.1 Ahlborg-Methode

Diese Methode sieht vor, ein erschöpfendes Training zum Entleeren der Speicher eine Woche vor dem Wettkampf durchzuführen, gefolgt von 3-4 Tagen einer low-carb Diät (mit maximal 10% Kohlenhydraten) mit einer anschließenden high-carb Diät (90% Kohlenhydrate) von 3-4 Tagen Dauer. Obwohl der Glykogengehalt der Speicher in Experimente mit Läufern fast verdoppelt werden konnten [19], erwies sich die Methode für die meisten Sportler als ungeeignet, da ein erschöpfendes Training so knapp vor dem Wettkampf, meist in der Taperingphase¹ der Athleten, sowie die sehr strenge low carb Diät mit all ihren negativen Folgen wie Lethargie, Konzentrationslosigkeit und erhöhter Krankheitsanfälligkeit oft die Leistungsfähigkeit am Wettkampftag zunichte gemacht haben.

9.2 No-Depletion-Methode

Hier handelt es sich um eine wesentlich sanftere Methode [20]. Nach einem längeren nicht ganz erschöpfenden Training ca. eine Woche vor dem Wettkampf, startet eine Phase mit normaler Ernährung (55-60% Kohlenhydrate), gefolgt von einer high-carb Diät mit ca 70% Kohlenhydrate. Diese Strategie führt zwar nicht zum gleichen Ladungsgrad, wie es bei der Ahlborg-Method in 9.1 der Fall ist, doch wird sie aufgrund der nicht vorhandenen negativen Nebenwirkungen von Sportlern wesentlich besser vertragen.

9.3 Western Australia Methode

2002 von Wissenschaftern der University of Australia entwickelt, kombiniert dieses Verfahren Entleerung und Laden komprimiert an einem Tag [21]. Am Morgen vor dem Wettkampf absolvieren die Athleten ein kurzes, hoch intensives Training gefolgt von einer high-carb Diät mit 10g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht, was in einer Steigerung der Glykogenspeicherung von 90% des Ausgangsniveaus resultiert.

9.4 Die verwendete Methode

Nach abwägen der Vor- und Nachteile wurde eine Kombination der genannten Methoden gewählt. Die Probanden ernährten sich am 5. Tag vor dem Wettkampf mit

¹Reduzierter Trainingsumfang vor einem Wettkampf

einer low-carb Diät von ca. 1g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht und absolvierten am Tag darauf ein moderates Training von 60-90 Minuten um die Glykogenspeicher zu entleeren. Unmittelbar danach startete die viertägige Phase des Kohlenhydratladens mit 8g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht, der Rest ad libitum. Von einem kurzen hoch intensiven Training wurde abgesehen, da es sich um untrainierte Probanden handelt und von einer kompletten Ausbelastung nicht auszugehen war. Die Dauer der low-carb Phase wurde auf einen Tag reduziert, weil eine dreitägige Phase von 1g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht zu belastenden ist und zu viele negative Nebenwirkungen mit sich bringt.

Teil II

Praktischer Teil

Kapitel 10

Leistungstest

Beurteilt die Menschen nicht nach ihrer Herkunft, sondern nach ihrer Leistung.

Perikles

Bevor der praktische Teil dieser Arbeit besprochen werden kann, muss noch erklärt werden, was ein Leistungstest ist und welche Eigenschaften er als wissenschaftliche Untersuchung haben muss. Da das Ziel war, einen sportartspezifischen Leistungsnachweis zu erbringen, wurde keine Analyse im Labor, sondern ein Feldtest durchgeführt. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass mehrerer Probanden zeitgleich getestet werden können. Ein Nachteil ist sicherlich die wetterbedingte Inkonstanz.

Die Qualitätskriterien, die ein Test erfüllen muss, um als genau und zuverlässig zu gelten, haben das Ziel, möglichst genaue quantitative Daten zum relativen Grad der Merkmalsausbildung zu liefern und sind folgende:

10.1 Gültigkeit, Validität

Die Validität gibt an, ob ein Test jenes Merkmal erfasst, für deren Messung er herangezogen wurde. Dies setzt hohe Objektivität und Reliabilität voraus.

10.2 Zuverlässigkeit, Reliabilität

Die Reliabilität stellt den Grad der Genauigkeit dar, mit welchem der Test ein bestimmtes Merkmal erfasst.

10.3 Objektivität

Die Objektivität gibt den Grad an, in dem die Testergebnisse vom Untersucher unabhängig sind, bezogen auf die Durchführung, Auswertung und Interpretation des Tests.

10.4 Standardisierung

Die Standardisierung steht für die Normierung der Bedingungen eines Tests, sodass die einzige Variable die Messgröße selbst ist.

Kapitel 11

Material und Methoden

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die theoretische Basis für den folgenden praktischen Teil geschaffen. Viele Studien, auf die in weiterer Folge genauer eingegangen wird, haben sich schon mit Kohlenhydratladen auseinandergesetzt und somit handelt es sich um eine der best untersuchten ergogenen Methode zur Leistungssteigerung. Doch bei all diesen Analysen ging es vorrangig darum zu ermitteln, welche Vorrangeweise zur optimalen Glykogenladung führt, oder wie sehr die Leistung in einem spezifischen Test, nicht aber sportspezifisch gesteigert werden konnte.

Die Übertragbarkeit vieler Studien und Tests auf die jeweilige Sportart ist aber oft zu hinterfragen, da es selten die an den Athleten gestellte Anforderung ist, eine Tätigkeit so lange wie möglich auszuüben.

In Feldtests wurde Kohlenhydratladen somit jedoch relative wenig untersucht. Folglich war das Ziel dieser Studie zu untersuchen, ob durch Modifikation der Ernährung in Form von Kohlenhydratladen die Leistung in einem konkreten Wettkampf gesteigert werden kann.

11.1 Probanden

Getestet wurden 9 Normalpersonen, deren sportliche Aktivität als durchschnittlich bezeichnet werden kann, die aber kein gezieltes Ausdauertraining betreiben.

Davon waren 6 weiblich und 3 männlich. Der Alterdurchschnitt ($\pm$ Standardabweichung) lag bei 27,2 ($\pm$ 9,2) Jahren. Die Probanden waren im Schnitt 1,71 ($\pm$ 0,07) m groß und 61,1 ($\pm$ 8,7) kg schwer. Daraus ergab sich ein mittlerer Body-Mass-Index von 20,8 ($\pm$ 1,9).

Die Tabelle 11.1 fasst alle deskriptiven Charakteristika der Probanden zusammen.

Proband	Geschlecht	Alter (y)	Körpergröße (m)	Masse (kg)	BMI
Proband 1	M	29	1,81	82	25
Proband 2	M	14	1,72	61	20,6
Proband 3	M	16	1,75	60	19,6
Proband 4	W	22	1,67	54	19,4
Proband 5	W	40	1,76	62,5	20,2
Proband 6	W	25	1,57	55	22,3
Proband 7	W	40	1,73	64,5	21,6
Proband 8	W	30	1,68	55	19,5
Proband 9	W	29	1,72	56	18,9
Mittelwert		27,2	1,71	61,1	20,8
Standardabw.		9,2	0,07	8,7	1,9

Tabelle 11.1: Deskriptive Statistik

Einzelheiten zur deskriptiven Statistik der Teilnehmer kann den Tabellen A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 im Anhang A.1 entnommen werden.

Die Testpersonen wurde ausführlichst über die Durchführung informiert und nahmen freiwillig an dieser Studie teil.

11.2 Methodik

Die Tests wurden an 3 Terminen jeweils durch 2 Wochen getrennt, absolviert. Jeder Proband lief an einem Termin zuerst einen 600m-Lauf gefolgt von einer einstündigen Erholungspause, worauf im Anschluss ein 4000m-Lauf folgte. Vor jedem Lauf wurde zwecks Aufwärmen eine Runde mit niedriger Intensität gelaufen.

Der erste Termin war ein Testlauf zum Kennerlernen der Bedingungen und besonders der eigenen Fähigkeiten. Der zweite Termin war der Zeitlauf, an denen die Probanden unter Berücksichtigung der Erfahrungen von Termin 1, ihr gesamtes Potential abrufen sollten, um die maximale Leistung zu erzielen. Fünf Tage vor dem dritten Termin begann die eintägige Entlade-Phase mit ca. 1g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht [siehe Appendix Plan und Rezepte]. Am Tag darauf folgte ein

einstündiger Lauf mittlerer Intensität, um die Glykogenspeicher vollständig zu entleeren, um unmittelbar danach mit dem viertägigen Kohlenhydratladen zu beginnen. Der Plan schrieb vor 8g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht zu sich zu nehmen. Die Ernährungspläne und Rezepte sind im Detail im Anhang B und C zu finden. Der dritte Termin fand unter dem Einfluss von durch Kohlenhydratladen gefüllten Glykogenspeichern statt.

11.3 Vorbereitung und Ernährung

Bevor die Testphase begann, wurde für jeden Probanden in Anhängigkeit des Körpergewichts ein Ernährungsplan erstellt.

Zur Nährstoffanalyse wurde die Ernährungssoftware Kaloma 4.50 verwendet. Besonderes Augenmerk wurde auf die Zusammensetzung der Ernährung gelegt. Die Entlade-Phase lieferte 58g Kohlenhydrate. Für die meisten Probanden entspricht diese Menge 1g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht oder weniger. Die Lade-Phase lieferte 8g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht. In beiden Phasen wurde unter diesen Rahmenbedingungen auf eine vollwertige Ernährung (Definition laut DGE [22]) geachtet. Ziel war eine ausgewogene Ernährung durch abwechslungsreiche Auswahl der Lebensmittel, mit mindestens 5 Portionen Obst und Gemüse, sowie ein Milchprodukt pro Tag. Der Fleischverzehr wurde in Maßen gehalten und die Ersatzrezepte (siehe Anhang C.3) enthielten vegetarische Alternativen. Bei den Kohlenhydratquellen wurden vollwertige Lebensmittel bevorzugt und auf Haushaltszucker und Fertigprodukte weitestgehend verzichtet. Dennoch war das Ziel die Zubereitung der Mahlzeiten so einfach wie möglich zu halten, da für die berufstätigen Probanden nicht die Zeit für aufwendiges Kochen gegeben war.

11.4 Messparameter

Der einzige für diese Untersuchung relevante Messparameter ist die Zeit, in der die jeweilige Distanz absolviert wurde. Ein direkter Schluss auf die Leistung ist dadurch zulässig, weil die Distanz konstant war.

11.5 Messinstrumente

Alle Läufe wurden auf einer ebenen Laufbahn der Sportuniversität Wien (Auf der Schmelz 6, 1150 Wien) durchgeführt. Eine Runde beträgt 400m.

Die Zeit wurde mittels der Stoppuhr: Stopwatch der Firma „take off“ gemessen. Diese misst auf 1/100 Sekunde genau.

Die statistische Auswertung wurde mit IBM SPSS Statistics 19 durchgeführt. Das asymptotische Signifikanzniveau (2-seitig) wurde für alle Tests mit $p \leq 0,05$ festgelegt.

11.6 Durchführung

Ein 600m- und ein 4000m-Lauf wurden jeweils an 3 verschiedenen Terminen durchgeführt, deren Ablauf im Detail nun vorgestellt werden soll.

Die Probanden wurden für den 600m-Lauf in eine vierer und eine fünfer Gruppe aufgeteilt, um Behinderungen auszuschließen. Die Aufteilung wurde über alle 3 Termine beibehalten, wodurch gewährleistet war, dass jeder Teilnehmer den Lauf unter den gleichen Wettkampfbedingungen absolvierte.

Gestartet wurde aus dem Stand, im so genannten Hochstart und zum Ausgleich der Kurvenlänge in verschiedenen Bahnen versetzt. Die jeweilige Bahn durfte nach der ersten Kurve verlassen werden, gekennzeichnet durch eine gekrümmte Übergangslinie, ab der es gestattet war auf die Innenbahn zu wechseln.

Diese Regeln entsprechen den Wettkampfregeln des IAAF (International Association of Athletics Federations [23]), nach denen bei den olympischen Spielen ein 800m Lauf abgehalten wird.

Durch das Kommando „Auf die Plätze“ wurde jeder Läufer angewiesen seine Startposition auf der ihm zugewiesenen Laufbahn einzunehmen. Auf „Los“ wurde gestartet. Gemäß IAAF-Regeln [23].

Die Zeiten wurden gemäß der IAAF-Regeln [23] jeweils auf die nächst längere Sekunde aufgerundet.

11.6.1 Termin 1 – Der ungeladene Übungslauf

Dieser Lauf wurde als Testlauf ausgeführt. Er kann auch als Vortest bezeichnet werden, um die Gegebenheiten kennen zu lernen, und das individuelle optimale Lauftempo zu finden.

Der Lauf wurde abgehalten, da das Ziel war, die Distanz so schnell wie möglich zu laufen und die Probanden sich erst mit der Strecke vertraut machen mussten, um sich nicht zu über- oder unterfordern. Bei zu schnellem Tempo würde der Pasteur-Effekt die Geschwindigkeit drosseln, bei zu langsamen Tempo, welches nicht ausbelastend wäre, bekäme man kein vergleichbares Ergebnis. Somit wurden beide Distanzen gelaufen, damit jeder Proband individuell, die für sich optimale Einteilung der Ressourcen ermitteln konnte.

11.6.2 Termin 2 – Der ungeladene Zeitlauf

Dieser Termin galt als Leeraantritt, dessen Zeit als Referenz für den geladenen Lauf herangezogen wurde. Ziel war es, die persönliche Bestleistung abzurufen und mit der Erfahrung von Termin 1, die Distanzen so schnell wie möglich zu laufen.

11.6.3 Termin 3 – Der geladene Zeitlauf

Fünf Tage vor diesem Termin fand das Kohlenhydratladen statt, wodurch die Glykogenvorräte im Vergleich zu Termin 2 entsprechend höher sein sollten. Die Läufe wurden mit dem selben Ziel, wie beim zweiten Termin, Bestzeit zu erzielen, absolviert.

Kapitel 12

Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der beiden unterschiedlichen Distanzen tabellarisch dargestellt.

12.1 600 Meter Lauf

Die Tabelle 12.1 zeigt die gelaufenen Zeiten jedes Probanden in Sekunden für den 600m-Lauf an allen 3 Terminen.

Proband	1.Lauf	2.Lauf	3.Lauf
Proband 1	118	119	122
Proband 2	123	121	125
Proband 3	169	136	134
Proband 4	168	168	164
Proband 5	144	140	142
Proband 6	160	158	162
Proband 7	156	144	145
Proband 8	166	153	157
Proband 9	167	166	161
Mittelwert	152,4	145	145,8
Standardabw.	19,7	17,9	16,3

Tabelle 12.1: Ergebnisse 600m-Lauf

12.2 4000 Meter Lauf

Die Tabelle 12.2 zeigt die gelaufenen Zeiten jedes Probanden in Sekunden für den 4000m-Lauf an allen 3 Terminen.

Proband	1.Lauf	2.Lauf	3.Lauf
Proband 1	1096	1125	1066
Proband 2	1269	1199	1310
Proband 3	1202	1247	1256
Proband 4	1655	1425	1400
Proband 5	1370	1290	1395
Proband 6	1467	1393	1362
Proband 7	1337	1255	1270
Proband 8	1290	1256	1358
Proband 9	1381	1289	1323
Mittelwert	1340,8	1275,5	1304,5
Standardabw.	159,8	91,3	102,7

Tabelle 12.2: Ergebnisse 4000m-Lauf

Kapitel 13

Diskussion

Dieses Kapitel dient dem Vergleich der im vorangegangenen Kapitel gezeigten Ergebnisse. Im Fokus steht die Gegenüberstellung der Resultate mit anschließender Diskussion und Interpretation.

Vergleich Termin 1 mit Termin 2

Ein Vergleich von Termin 1 und 2 wird in Tabelle 13.1 für den 600m-Lauf und in Tabelle 13.2 für den 4000m-Lauf dargestellt.

Proband	1.Lauf	2.Lauf	Vergleich
Proband 1	118	119	1
Proband 2	123	121	-2
Proband 3	169	136	-33
Proband 4	168	168	0
Proband 5	144	140	-4
Proband 6	160	158	-2
Proband 7	156	144	-12
Proband 8	166	153	-13
Proband 9	167	166	-1

Tabelle 13.1: Vergleich 600m 1.Lauf mit 2.Lauf

Proband	1.Lauf	2.Lauf	Vergleich
Proband 1	1096	1125	29
Proband 2	1269	1199	-70
Proband 3	1202	1247	45
Proband 4	1655	1425	-230
Proband 5	1370	1290	-80
Proband 6	1467	1393	-74
Proband 7	1337	1255	-82
Proband 8	1290	1256	-34
Proband 9	1381	1289	-92

Tabelle 13.2: Vergleich 4000m 1.Lauf mit 2.Lauf

Jede Verbesserung, die ein Proband erzielen konnte, ist auf den Lerneffekt zurückzuführen. Dies zeigt auch die Wichtigkeit des ersten Termins auf, da es sich, um eine signifikante Verbesserung handelt (die statistische Auswertung ist im Anhang A.2 zu finden). Mit nur zwei Terminen, einem ungeladenen und einem geladenen, wäre man folglich zu dem Schluss gekommen, dass Kohlenhydratladen zu einer signifikanten Steigerung der Leistung geführt hat. Doch der Vergleich der beiden ungeladenen Termine zeigt, dass allein der Lerneffekt und die damit bessere Einteilung der Laufgeschwindigkeit zu diesem Ergebnis führte, da noch keine Modifikation der Ernährung stattgefunden hat.

Vergleich Termin 2 mit Termin 3

Hier wird die Bestzeit der ungeladenen Läufe, der Zeit der geladenen Läufe gegenübergestellt. Dieser Vergleich, der in Tabelle 13.3 und 13.4 dargestellt wird, präsentiert den Hauptteil dieser Arbeit und klärt die Fragestellung, ob Kohlenhydratladen zu einer Leistungssteigerung einer sportartspezifischen Belastung von 600m und 4000m führt.

Sowohl das Ergebnis des 600m-Laufs, als auch das des 4000m-Laufs, wiesen keinen signifikanten Unterschied auf (siehe Anhang A.2).

Die grafische Auswertung der Tests wird in Abbildung 13.1 für den 600m-Lauf und in Abbildung 13.2 für den 4000m-Lauf gezeigt.

Proband	2.Lauf	3.Lauf	Vergleich
Proband 1	119	122	3
Proband 2	121	125	4
Proband 3	136	134	-2
Proband 4	168	164	-4
Proband 5	140	142	2
Proband 6	158	162	4
Proband 7	144	145	1
Proband 8	153	157	4
Proband 9	166	161	-5

Tabelle 13.3: Vergleich 600m 2.Lauf mit 3.Lauf

Proband	2.Lauf	3.Lauf	Vergleich
Proband 1	1125	1066	-59
Proband 2	1199	1310	111
Proband 3	1247	1256	9
Proband 4	1425	1400	-25
Proband 5	1290	1395	105
Proband 6	1393	1362	-31
Proband 7	1255	1270	15
Proband 8	1256	1358	102
Proband 9	1289	1323	34

Tabelle 13.4: Vergleich 4000m 2.Lauf mit 3.Lauf

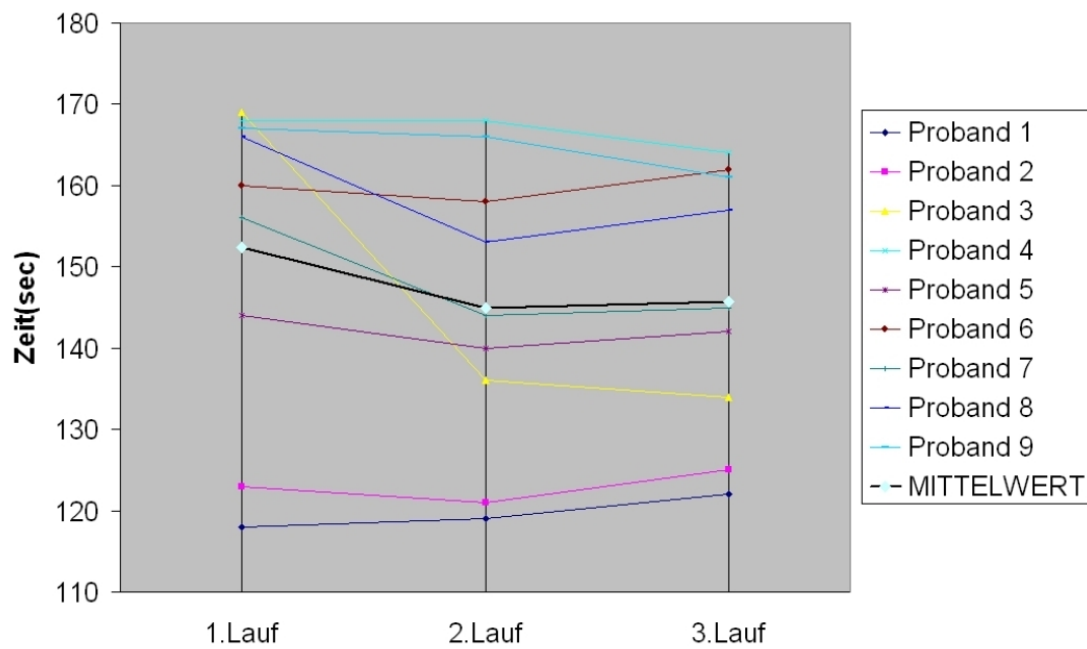


Abbildung 13.1: 600m-Lauf

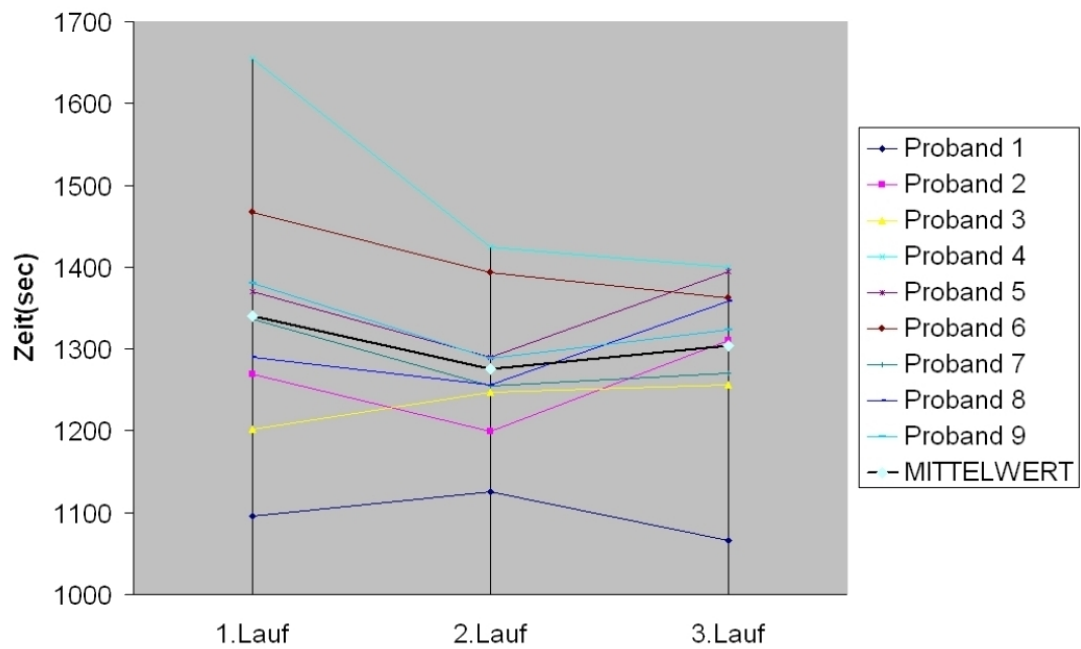


Abbildung 13.2: 4000m-Lauf

Es gilt als wissenschaftlich gesichert, dass die submaximale Ausdauerleistung mit der Glykogenkonzentration vor Beginn der Belastung korreliert [24,25]. Auch wenn in dieser Arbeit keine Muskelbiopsie durchgeführt wurde, um den Gehalt an Glykogen im Muskel zu überprüfen, kann davon ausgegangen werden, dass die Kohlenhydratlademethode, zu einem Anstieg der Glykogenkonzentration geführt hat [18].

Um allein die Auswirkungen der Ernährung, in diesem Fall die richtig angewandte Ernährungsmethode, um mehr Glykogen zu speichern, als es durch normale kohlenhydratreiche Kost möglich ist, zu untersuchen, war es das Ziel dieser Diplomarbeitsstudie, mit den jeweiligen Laufbelastungen so lange zu warten, dass die ausdauerbezogene Superkompensation verstrichen und damit jeder Proband zu seinem Ausgangsniveau zurückgekehrt ist.

Da doppelt so viele Frauen wie Männer an dieser Studie teilnahmen, sollte auch dieser Aspekt genauer betrachtet werden. So konnten einigen Studien zwar einen Anstieg des Glykogengehalts der Muskeln von ausdauertrainierten Frauen nachweisen, aber keine Leistungssteigerung dokumentieren [26,27].

In machen Fällen beobachteten die Forscher dagegen nicht einmal eine Erhöhung der Glykogenkonzentration nach Kohlenhydratladen [28]. Einen großen Unterschied zu dieser Arbeit stellt allerdings der Umstand dar, dass in der erwähnten Studie während der Entlade-Phase die Ernährung unbeeinflusst blieb und keine kohlenhydratreduzierte Diät durchgeführt wurde.

Die Bedeutung der Entleerung der Glykogenspeicher hebt den Unterschied deutlich zwischen Methoden mit Entladen im Gegensatz zu solchen ohne hervor [29] (siehe Abbildung 13.3).

Die Erhöhung der Glykogenkonzentration nach Entleerung der Speicher haben vielfache Ursachen und resultieren aus Faktoren, wie eine schnellere Glykogenresyntheserate [30], eine erhöhte Aktivität der Glykogensynthase [31,32], sowie ein verbesserter Glukosetransport [33].

Aus diesen Studien geht hervor, dass Kohlenhydratlademethoden mit einer Entladungsphase, zu einer signifikant höheren Speicherung von Glykogen, gegenüber solchen ohne Entladungsphase führen. Die ausschlaggebende Menge an Kohlenhydraten während der Ladephase scheint hierbei 8g /kg Körpergewicht zu sein [34].

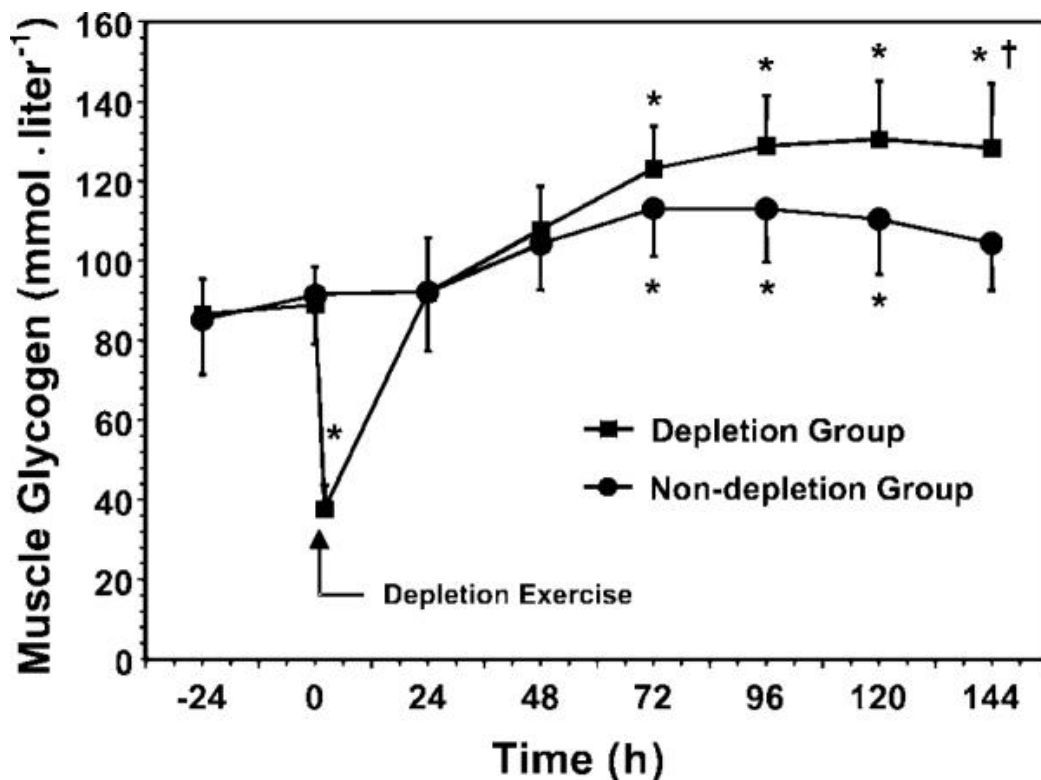


Abbildung 13.3: Depletion
[aus [29]]

Gerade bei Frauen wurden mit Methoden, die mindestens 8g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht vorschrieben, eine signifikante Erhöhung der Glykogenkonzentration erreicht [26,35]. Während gezeigt wurde, dass 6g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht bei Frauen zu keiner signifikanten Superkompensation von Muskelglykogen führte [28].

Aus all diesen Gründen wurde bei der durchgeführten Studie dieser Diplomarbeit die Entlade-Phase mit einer eintägigen kohlenhydratreduzierten Ernährung (maximal 1g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht) eingeleitet und mit einem einstündigen Lauf am folgenden Tag fortgesetzt. Die anschließende viertägige Ladephase mit 8g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht begann unmittelbar nach der Belastung und der daraus resultierenden Entleerung der Glykogenspeicher, um die belastungsinduzierte erhöhte Aktivität der Glykogensynthase zu nutzen [31].

Die Hauptforschungsergebnisse dieser Arbeit sind, dass bei einem von den Probanden selbstbestimmten Lauftempo, Kohlenhydratladen zu keiner Verbesserung der Leistung führt. Dies steht im Gegensatz zu einer Vielzahl an Studien, die eine Steigerung der Leistung bei Belastungen, die länger als 90 Minuten andauern, nachweisen konnten [36]. Aber auch bei kürzeren Distanzen konnten positive Auswirkungen von Kohlenhydratladen nachgewiesen werden [37].

Hierbei wurde eine positive Korrelation zwischen erhöhter Glykogenkonzentration und verbesserter psychischer Stimmung des Sportlers nachgewiesen. Dass diese ein entscheidender Faktor in der Leistungsfähigkeit des Athleten ist, wurde bereits besprochen.

Weiters sei zu erwähnen, dass die meisten Studien mit ausdauertrainierten Sportlern durchgeführt wurden. Bei dieser Arbeit handelt es sich jedoch um Normalpersonen, was ein wichtiger Faktor ist, da auch der Trainingszustand entscheidend ist, da untrainierte Personen ihre Glykogenspeicher rascher entleeren als gut trainierte. Wie einige Hypothesen zeigen, sind die Glykogenspeicher von Elite-Langläufern nicht die leistungslimitierende Einflussgröße [38]. Handelt es sich um nicht bis moderat ausdauertrainierte Personen, so kann der Glykogengehalt von ausschlaggebender Bedeutung sein.

Fazit und Outlook

Zusammenfassend sei zum Abschluss noch einmal erwähnt, dass Kohlenhydratladden weder bei einem 600m- noch bei einem 4000m-Lauf zu einer signifikanten Leistungssteigerung geführt hat.

Hervorzuheben ist aber die nachgewiesene signifikante Verbesserung aufgrund des Lerneffekts. Diese Tatsache lässt auch Ergebnisse mancher Studien, die keinen Testlauf in ihrer Methodik durchführten, hinterfragen. Denn hierbei handelt es sich um einen unbedingt zu berücksichtigenden Faktor, der nicht zu unterschätzen ist, wie die Erfahrungen und Resultate dieser Arbeit zeigen.

Aus vielen Daten geht die leistungssteigernden Wirkung von Kohlenhydratladden vor allem in Bewerben, die länger als 90 Minuten andauern hervor. Doch auch in Wettkämpfen, deren Dauer 5 Minuten nicht überschreitet, konnte in einige Studien ein positiver Effekt von erhöhtem Glykogengehalt im Muskel nachgewiesen werden. Die Mechanismen, die dafür verantwortlich sind, sind aber weitestgehend unklar und von rein spekulativer Natur. Auch in Feldtests und konkreten Wettkämpfen sind sich die Experten der Wirkung von Kohlenhydratladden nicht ganz einig, weshalb in diesen Gebieten weitere Studien durchgeführt werden müssen.

Teil III

Anhang

Anhang A

Statistik

A.1 Deskriptive Statistik

Die Tabellen der deskriptiven Statistik geben einen Überblick über die anthropometrische Daten der Testpersonen und wurden mittels IBM SPSS Statistics 19 erstellt.

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Alter	9	14	40	27,22	9,176

Tabelle A.1: Alter

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Körpergewicht	9	54	82	61,1	8,7

Tabelle A.2: Körpergewicht

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Körpergröße	9	1,57	1,81	1,71	0,07

Tabelle A.3: Körpergröße

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
BMI	9	18,9	25	20,8	1,9

Tabelle A.4: BMI

	Häufigkeit	Prozent
Männlich	3	33,3
Weiblich	6	66,7

Tabelle A.5: Geschlecht

A.2 Teststatistik

Zur Überprüfung der Signifikanz der Testergebnisse wurde der Wilcoxon-Test durchgeführt. Dieser Test dient der Kontrolle, ob die zentrale Tendenz von zwei verbundenen Stichproben signifikant unterschiedlich ist. Somit ist die Untersuchung einer Testvariablen einer Gruppe vor und nach einer Behandlung möglich. Wird der Wert des Signifikanzniveaus von 0,05 von der asymptotischen Signifikanz (p-Wert) unterschritten, handelt es sich um ein signifikantes Testergebnis.

A.2.1 Vergleich Termin 1 mit Termin 2

Sowohl beim 600m-Lauf als auch beim 4000m-Lauf wurde das Signifikanzniveau unterschritten. Daraus folgt, dass sich die Testergebnisse signifikant voneinander unterscheiden.

A.2.2 Vergleich Termin 2 mit Termin 3

Weder beim 600m-Lauf noch beim 4000m-Lauf wurde das Signifikanzniveau unterschritten. Somit unterscheiden sich die Testergebnisse nicht signifikant voneinander.

Wilcoxon-Test zum Vergleich von Termin 1 mit Termin 2**600m Lauf****Ränge**

	N	Mittlerer Rang	Rangsumme
Lauf2 - Lauf1 Negative Ränge	7 ^a	4,93	34,50
Positive Ränge	1 ^b	1,50	1,50
Bindungen	1 ^c		
Gesamt	9		

a. Lauf2 < Lauf1

b. Lauf2 > Lauf1

c. Lauf2 = Lauf1

Statistik für Test^b

	Lauf2 - Lauf1
Z	-2,316 ^a
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,021

a. Basiert auf positiven Rängen.

b. Wilcoxon-Test

4000m Lauf**Ränge**

	N	Mittlerer Rang	Rangsumme
Lauf2 - Lauf1 Negative Ränge	7 ^a	5,86	41,00
Positive Ränge	2 ^b	2,00	4,00
Bindungen	0 ^c		
Gesamt	9		

a. Lauf2 < Lauf1

b. Lauf2 > Lauf1

c. Lauf2 = Lauf1

Statistik für Test^b

	Lauf2 - Lauf1
Z	-2,192 ^a
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,028

a. Basiert auf positiven Rängen.

b. Wilcoxon-Test

Wilcoxon-Test zum Vergleich von Termin 2 mit Termin 3**600m Lauf****Ränge**

	N	Mittlerer Rang	Rangsumme
Lauf3 - Lauf2 Negative Ränge	3 ^a	6,00	18,00
Positive Ränge	6 ^b	4,50	27,00
Bindungen	0 ^c		
Gesamt	9		

a. Lauf3 < Lauf2

b. Lauf3 > Lauf2

c. Lauf3 = Lauf2

Statistik für Test^b

	Lauf3 - Lauf2
Z	-,538 ^a
Asymptotische	,590
Signifikanz (2-seitig)	

a. Basiert auf negativen Rängen.

b. Wilcoxon-Test

4000m Lauf**Ränge**

	N	Mittlerer Rang	Rangsumme
Lauf3 - Lauf2 Negative Ränge	3 ^a	4,33	13,00
Positive Ränge	6 ^b	5,33	32,00
Bindungen	0 ^c		
Gesamt	9		

a. Lauf3 < Lauf2

b. Lauf3 > Lauf2

c. Lauf3 = Lauf2

Statistik für Test^b

	Lauf3 - Lauf2
Z	-1,125 ^a
Asymptotische	,260
Signifikanz (2-seitig)	

a. Basiert auf negativen Rängen.

b. Wilcoxon-Test

Anhang B

Ernährungspläne

Zeichenerklärung

TL.....Teelöffel.....5g
ELEsslöffel.....15g
EWEiweiß
F.....Fett
KH.....Kohlenhydrate
Kcal.....Kilokalorien

B.1 Kohlenhydratreduzierter Tag

Mahlzeit	Lebensmittel	Kcal	EW	F	KH
Frühstück	Ham and Eggs	674	80g	37g	2g
Vormittagsjause	250g Jogurt (4 % Fett)	168	8g	10g	13g
	1 Banane	85	1g		22g
Mittagessen	Putenschnitzel mit Mischgemüse	464	51g	22g	15g
Abendessen	„Griechischer“ Thunfischsalat	1075	68g	80g	21g
SUMME		2466	208g	149g	58g

Tabelle B.1: Kohlenhydratreduzierter Tag zum Entladen

B.2 Kohlenhydratladen

Mahlzeit	Lebensmittel	KH
Frühstück	250g Jogurt (4 % Fett) mit Früchten	40g
	3 EL Müsli (50g)	33g
	1 Banane	22g
Vormittagsjause	1 Apfel	15g
Mittagessen	100g Spaghetti	68g
	200g Tomaten aus der Dose	8g
	$\frac{1}{2}$ Zwiebel	7g
	100g Weintrauben	17g
Nachmittagsjause	$\frac{1}{2}$ Liter Buttermilch	20g
	3 EL Haferflocken	33g
	1 Pfirsich	12g
Abendessen	2 Kornspitz (120g)	50g
	50g Frischkäse 60%	1g
	1 Paprika	5g
	$\frac{1}{2}$ Liter Orangensaft	55g
SUMME		386g
gKH/kgKG		7,0

Tabelle B.2: 1.Tag für 55kg schweren Proband

Mahlzeit	Lebensmittel	KH
Frühstück	3 Scheiben Schwarzbrot	64g
	Marmelade (40g)	28g
	1 Banane	22g
Vormittagsjause	1 Croissant	25g
	1 Apfel	15g
	$\frac{1}{2}$ Liter Buttermilch Heidelbeere	57g
Mittagessen	2 Semmelknödel (90g)	36g
	150g Linsen gekocht	20g
Nachmittagsjause	5 Stk. Vollkornbutterkekse (25g)	20g
	1 Smoothie (250ml)	33g
Abendessen	Milchreis mit Pfirsich und Honig (siehe Rezepte)	67g
	$\frac{1}{2}$ Liter Bioapfelsaft naturtrüb	58g
SUMME		445g
gKH/kgKG		8,1

Tabelle B.3: 2.Tag für 55kg schweren Proband

Mahlzeit	Lebensmittel	KH
Frühstück	Apfelmüsli (siehe Rezepte)	82g
Vormittagsjause	1 Grahamweckerl (60g)	29g
	1 Scheibe Gouda (30g)	
	1 Paprika	5g
Mittagessen	Asiatische Hühnerbrust (siehe Rezepte)	58g
	$\frac{1}{2}$ Mango (100g)	17g
Nachmittagsjause	Vanillepudding (150g)	26g
	$\frac{1}{2}$ Liter Fruchtsaft	55g
	1 Banane	22g
Abendessen	Pizza Magherita (300g)	93g
SUMME		387g
gKH/kgKG		7,0

Tabelle B.4: 3.Tag für 55kg schweren Proband

Mahlzeit	Lebensmittel	KH
Frühstück	4 Scheiben Toast	45g
	Marmelade (40g)	21g
Vormittagsjause	1 Banane	22g
	250g Jogurt (4 % Fett) mit Früchten	40g
Mittagessen	Makkaroni mit Ricottasauce (siehe Rezepte)	147g
Nachmittagsjause	Nach Wahl	
Abendessen	Kaiserschmarrn (siehe Rezepte)	165g
SUMME		440g
gKH/kgKG		8,0

Tabelle B.5: 4.Tag für 55kg schweren Proband

Mahlzeit	Lebensmittel	KH
Frühstück	250g Jogurt (4 % Fett) mit Früchten	40g
	4 EL Müsli (60g)	40g
	2 Banane	44g
Vormittagsjause	1 Apfel	15g
Mittagessen	120g Spaghetti	82g
	200g Tomaten aus der Dose	8g
	$\frac{1}{2}$ Zwiebel	7g
	120g Weintrauben	20g
Nachmittagsjause	$\frac{1}{2}$ Liter Buttermilch	20g
	4 EL Haferflocken	40g
	1 Pfirsich	12g
Abendessen	2 Kornspitz (120g)	50g
	50g Frischkäse 60%	1g
	1 Paprika	5g
	$\frac{1}{2}$ Liter Orangensaft	55g
SUMME		439g
gKH/kgKG		7,0

Tabelle B.6: 1.Tag für 63kg schweren Proband

Mahlzeit	Lebensmittel	KH
Frühstück	3 Scheiben Schwarzbrot	64g
	Marmelade (40g)	28g
	1 Banane	22g
Vormittagsjause	1 Croissant	25g
	1 Apfel	15g
	$\frac{1}{2}$ Liter Buttermilch Heidelbeere	57g
Mittagessen	2 Semmelknödel (90g)	36g
	150g Linsen gekocht	20g
Nachmittagsjause	5 Stk. Vollkornbutterkekse (25g)	20g
	1 Smoothie (250ml)	33g
Abendessen	Milchreis mit Pfirsich und Honig (siehe Rezepte)	67g
	$\frac{1}{2}$ Liter Bioapfelsaft naturtrüb	58g
SUMME		445g
gKH/kgKG		7,0

Tabelle B.7: 2.Tag für 63kg schweren Proband

Mahlzeit	Lebensmittel	KH
Frühstück	Apfelmüsli (siehe Rezepte)	82g
Vormittagsjause	2 Grahamweckerl (120g)	59g
	2 Scheibe Gouda (60g)	
	1 Paprika	5g
Mittagessen	Asiatische Hühnerbrust (siehe Rezepte)	58g
	$\frac{1}{2}$ Mango (100g)	17g
Nachmittagsjause	Vanillepudding (150g)	26g
	$\frac{1}{2}$ Liter Fruchtsaft	55g
	2 Banane	44g
Abendessen	Pizza Magherita (300g)	93g
SUMME		438g
gKH/kgKG		7,0

Tabelle B.8: 3.Tag für 63kg schweren Proband

Mahlzeit	Lebensmittel	KH
Frühstück	4 Scheiben Toast	45g
	Marmelade (40g)	21g
Vormittagsjause	1 Banane	22g
	250g Jogurt (4 % Fett) mit Früchten	40g
Mittagessen	Makkaroni mit Ricottasauce (siehe Rezepte)	147g
Nachmittagsjause	Nach Wahl	
Abendessen	Kaiserschmarrn (siehe Rezepte)	165g
SUMME		440g
gKH/kgKG		7,0

Tabelle B.9: 4.Tag für 63kg schweren Proband

Mahlzeit	Lebensmittel	KH
Frühstück	250g Jogurt (4 % Fett) mit Früchten	40g
	6 EL Müsli (90g)	59g
	2 Banane	44g
Vormittagsjause	1 Apfel	15g
Mittagessen	150g Spaghetti	103g
	250g Tomaten aus der Dose	10g
	$\frac{1}{2}$ Zwiebel	7g
	150g Weintrauben	26g
Nachmittagsjause	$\frac{1}{2}$ Liter Buttermilch	20g
	6 EL Haferflocken	59g
	1 Pfirsich	12g
Abendessen	2 Kornspitz (120g)	50g
	50g Frischkäse 60%	1g
	1 Paprika	5g
	$\frac{3}{4}$ Liter Orangensaft	83g
SUMME		534g
gKH/kgKG		6,5

Tabelle B.10: 1.Tag für 82kg schweren Proband

Mahlzeit	Lebensmittel	KH
Frühstück	3 Scheiben Schwarzbrot	64g
	Marmelade (40g)	28g
	2 Banane	44g
Vormittagsjause	1 Croissant	25g
	1 Apfel	15g
	$\frac{1}{2}$ Liter Buttermilch Heidelbeere	57g
Mittagessen	3 Semmelknödel (135g)	54g
	150g Linsen gekocht	20g
Nachmittagsjause	7 Stk. Vollkornbutterkekse (35g)	33g
	1 Smoothie (250ml)	33g
Abendessen	Milchreis mit Pfirsich und Honig (siehe Rezepte)	67g
	$\frac{3}{4}$ Liter Bioapfelsaft naturtrüb	88g
SUMME		523g
gKH/kgKG		6,4

Tabelle B.11: 2.Tag für 82kg schweren Proband

Mahlzeit	Lebensmittel	KH
Frühstück	Apfelmüsli (siehe Rezepte)	82g
Vormittagsjause	2 Grahamweckerl (120g)	59g
	2 Scheibe Gouda (60g)	
	1 Paprika	5g
Mittagessen	Asiatische Hühnerbrust (siehe Rezepte)	58g
	$\frac{1}{2}$ Mango (100g)	17g
Nachmittagsjause	2 Vanillepudding (300g)	51g
	$\frac{3}{4}$ Liter Fruchtsaft	88g
	2 Banane	44g
Abendessen	Pizza Magherita (300g)	93g
SUMME		491g
gKH/kgKG		6,0

Tabelle B.12: 3.Tag für 82kg schweren Proband

Mahlzeit	Lebensmittel	KH
Frühstück	4 Scheiben Toast	45g
	Marmelade (40g)	21g
Vormittagsjause	2 Banane	44g
	250g Jogurt (4 % Fett) mit Früchten	40g
Mittagessen	Makkaroni mit Ricottasauce (siehe Rezepte)	147g
Nachmittagsjause	Schoko Shake (siehe Rezepte)	99g
Abendessen	Kaiserschmarrn (siehe Rezepte)	165g
SUMME		561g
gKH/kgKG		6,8

Tabelle B.13: 4.Tag für 82kg schweren Proband

Anhang C

Rezepte

C.1 Kohlenhydratreduzierte Rezepte

„Griechischer,, Thunfischsalat

Zutaten:

150g Thunfisch aus der Dose
 $\frac{1}{2}$ Packung Feta (100g)
50g Salat nach Wahl
1 Stk. roter Paprika
1 Stk. grüner Paprika
 $\frac{1}{2}$ Zwiebel
2 hart gekochte Eier
1 EL Pflanzenöl
Essig, Senf, Knoblauch, Pfeffer, Salz
4 schwarze Oliven
1 Tomate

Zubereitung:

Gemüse waschen. Paprika und Zwiebeln in Streifen, Feta würfelig schneiden. Alle Zutaten vermengen. Aus Essig, Öl, Senf und den Gewürzen eine Marinade bereiten und über den Salat gießen. Salat mit Oliven und Tomatenviertel garnieren.

Kcal	EW	F	KH
1075	68g	80g	21g

Tabelle C.1: „Griechischer,, Thunfischsalat

Putenschnitzel mit Mischgemüse**Zutaten:**

1 Putenschnitzel (à 150g)
 1 TL hochwertiges Öl
 150g Mischgemüse

Zubereitung:

Putenschnitzel würzen, in das heiße Öl legen und beidseitig anbraten. Dazu Mischgemüse nach Packungsangaben zubereiten.

Kcal	EW	F	KH
464	51g	22g	15g

Tabelle C.2: Putenschnitzel mit Mischgemüse

Ham and Eggs**Zutaten:**

3 Eier
 150g Schinken
 Salz, Pfeffer

Kcal	EW	F	KH
674	80g	37g	2g

Tabelle C.3: Ham and Eggs

Pfirsich-Topfencreme**Zutaten:**

250ml Magertopfen
 100ml Orangensaft
 2 Pfirsichhälften aus der Dose

Zubereitung:

Magertopfen mit Orangensaft cremig rühren und anschließend die Pfirsichhälften, oder Obst nach Wahl hinzugeben.

Kcal	EW	F	KH
321	36g	0g	41g

Tabelle C.4: Pfirsich-Topfencreme

C.2 Kohlenhydratreiche Rezepte**Milchreis mit Pfirsich und Honig****Zutaten:**

225ml Milch
 Prise Salz
 30g Rundkornreis
 125g Pfirsichkompottobst
 1 TL Honig

Zubereitung:

Milch mit Salz aufkochen, Rundkornreis einstreuen. Bei schwacher Hitze köcheln lassen bis der Reis weich ist, Honig hinzufügen. Öfters umrühren damit nichts anbrennt! Kompottobst in Stücke schneiden und nach Belieben unterheben und mit Zimt oder Kakao bestreuen.

Kohlenhydrate: 67g

Apfelmüsli

Zutaten:

1 Apfel
1 EL Haselnüsse (15g)
1 EL Sonnenblumenkerne
1 EL Rosinen (15g)
4 EL Müsli
1/4 l Joghurt
1 TL Honig (5g)

Kohlenhydrate: 82g

Zubereitung:

Ungeschälten Apfel in kleine Stücke schneiden, mit Haselnüssen, Sonnenblumenkernen, Rosinen und Müsli verrühren. Joghurt darunter rühren und mit Honig süßen.

Makkaroni mit Ricottasoße

Zutaten:

200g Makkaroni
100g Ricotta/ Gorgonzola
50ml Milch
1 EL Pesto
1 EL geriebenem Pecorino
1 EL geriebenem Parmesan
Frischer Thymian und Petersilie

Kohlenhydrate: 147g

Zubereitung:

Milch bei niedriger Hitze leicht erwärmen. Ricotta in eine Schüssel geben und mit der lauwarmen Milch zu einer glatten Masse verrühren. Makkaroni bissfest kochen, abgießen und sofort zügig unter die Ricotta-Milch-Creme geben. Pesto dazugeben. Thymian und Petersilie fein hacken und unter die Pasta mischen. Mit Pecorino und Parmesan bestreut servieren.

Asiatische Hühnerbrust

Zutaten:

120 g Hühnerbrust
50 g Paprika
50 g Bambussprossen
50 g Erbsen
50 g Sojasprossen
2 EL Sojasoße
2 TL Öl
50 g Basmatireis
Curry, Kurkuma, Paprika

Zubereitung:

Die Hühnerbrust mit Salz, Chinasoße und Sojasoße marinieren. Anschließend in etwas Öl anbraten und mit ganz wenig Wasser angießen. Zugedeckt langsam durchziehen lassen. Das Gemüse in Streifen schneiden und mit etwas Öl erhitzen und mit Curry, Kurkuma und Paprika abschmecken. Den Reis laut Packungsanleitung zubereiten.

Kohlenhydrate: 58g

Kaiserschmarrn

Zutaten:

2 Eier
10g Zucker
250ml Milch
75g Vollkornmehl
75g Weißmehl
1 Prise Salz
eventuell 1 EL Rosinen
1 Schuss Mineralwasser
15g Butter
100g Zwetschkenröster

Zubereitung:

Dotter vom Eiklar trennen. Dotter, Zucker Milch, Mehl, Salz in einer Schüssel kräftig mit dem Schneebesen schlagen. Das Mehl unter ständigem Rühren einstreuen. Rosinen und ein Schuss Mineralwasser hinzugeben. Das Eiklar zu einem steifen Schnee schlagen und vorsichtig unter die Masse heben. Butter in der Pfanne schmelzen und anschließend die Masse dazugeben. Bei mittlerer Hitze auf der unteren Seite braun rösten, umwenden und wenn er auch auf der zweiten Seite braun ist, mit einer Gabel in kleine Stücke zerreißen. Mit Staubzucker bestreuen. Mit Zwetschkenröster servieren.

Kohlenhydrate: 165g

C.3 Kohlenhydratreiche Ersatzrezepte

Hirsebrei

Zutaten:

100g Hirse
300ml Wasser
4 Stück Trockenfrüchte
1 TL gehackte Nüsse
1 EL Honig

Zubereitung:

Hirse heiß abschwemmen und mit Wasser bei kleiner Flamme zugedeckt ca. 5 – 10 Minuten, bis die meiste Flüssigkeit verkocht ist, köcheln lassen. Danach den Hirsebrei zugedeckt ca. 20 Minuten ausquellen lassen. Brei mit Zimt, etwas Zitronensaft, Honig (ev. frisch geriebenem Ingwer) verfeinern. Trockenfrüchte klein schneiden und dazugeben.

Kohlenhydrate: 103g

Apfelnockerl mit Nüssen

Zutaten:

125g Weizenvollkornmehl
75ml Wasser
1 Ei
Salz
1 EL Öl
2 Äpfel
Zimt
2 TL Rosinen
1 TL Honig
2 EL gehackte Nüsse

Zubereitung:

Mehl, Wasser und Ei zu einem geschmeidigen Teig verarbeiten, ca. 30 Minuten rasten lassen und anschließend in Salzwasser einkochen, kurz ziehen lassen, abseihen und in Öl schwenken. Die Äpfel waschen und reiben, mit Zimt, Rosinen und Honig in wenig Wasser dünsten. Anschließend die Nockerl vorsichtig unterheben und mit gehackten Nüssen bestreuen.

Kohlenhydrate: 138g

Bananen – Himbeer Shake**Zutaten:**

250g Vanillejogurt (1% Fett)
1 Banane
100g Himbeeren
180ml Buttermilch
3 Esslöffel Haferflocken (45g)

Zubereitung:

Alle Zutaten mixen.

Kohlenhydrate: 85g

Schoko Shake**Zutaten:**

250ml Magermilch (1% Fett)
2 EL Instant-Kakaopulver
6 Esslöffel Haferflocken
1 Päckchen Vanillezucker

Zubereitung:

Alle Zutaten mixen.

Kohlenhydrate: 99g

Reis mit Pilzen**Zutaten:**

100g Reis
100g Pilze
 $\frac{1}{2}$ Bd. Petersilie (20g)
 $\frac{1}{2}$ Zwiebel
1 EL Sonnenblumenöl
Salz

Zubereitung:

Reis garen. Zwiebel feinwürfelig, Pilze blättrig schneiden und in Öl anschwitzen. Zwiebel und Pilze unter den Reis geben. Petersilie dazugeben und salzen. 10 min zugedeckt im Rohr backen.

Kohlenhydrate: 91g

Erdäpfelpfanne

Zutaten:

200g Erdäpfel
40g Lauch
20g Schafkäse
20g Mozzarella
1 Paprika
1 EL Sonnenblumenöl
Salz, Pfeffer, Thymian

Kohlenhydrate: 45g

Zubereitung:

Erdäpfel kochen, schälen und in Scheiben schneiden. Lauch und Paprika in feine Streifen schneiden, in Öl anschwitzen und weich dünsten. Kartoffeln in Öl anbraten und das Gemüse, den Schafkäse und den Mozzarella unterheben. Mit Salz, Pfeffer und Thymian würzen und kurz anbraten.

Nudelsalat mit Räuchertofu

Zutaten:

200g Nudeln
50g Erbsen
1 Tomate, entkernt und gewürfelt
 $\frac{1}{2}$ Zwiebel, gewürfelt
1 Essiggurke, gewürfelt
100g Räuchertofu
 $\frac{1}{2}$ Dose Mais
3 EL Sauerrahm
2 EL Jogurt
1 EL Tomaten-Ketchup
1 Knoblauchzehe
Petersilie
Schnittlauch
Salz und Pfeffer

Kohlenhydrate: 177g

Zubereitung:

Die Nudeln in Salzwasser bissfest garen. Mit Erbsen, Tomaten, Zwiebel, Essiggurke, Räuchertofu und Mais verrühren. Den Sauerrahm in einer kleinen Schüssel mit Jogurt und Ketchup verrühren und mit Knoblauch, Petersilie, Schnittlauch, Salz und Pfeffer abschmecken und anschließend über den Salat gießen.

Literaturverzeichnis

- [1] Coyle, E. F. and Coggan, A. R. and Hemmert, M. K. and Ivy, J. L., “Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate,” *Journal of Applied Physiology* **61** (1986), no. 1, 165–172.
- [2] P. Haber, *Leitfaden Zur Medizinischen Trainingsberatung: Rehabilitation Bis Leistungssport*. Springer, 2009.
- [3] J. Berg, J. Tymoczko, and L. Stryer, *Biochemistry*. No. Teile 1-34 in Biochemistry. W.H. Freeman, 2002.
- [4] H. de Marées and H. Heck, *Sportphysiologie*. Sport und Buch Strauß, 2002.
- [5] I. Elmadfa and C. Leitzmann, *Ernährung des Menschen*. Ulmer, 2004.
- [6] M. Königshoff and T. Brandenburger, *Kurzlehrbuch Biochemie*. Thieme, 2004.
- [7] G. Löffler and P. Petrides, *Biochemie und Pathobiochemie*:. Springer Lehrbuch. Springer, 2002.
- [8] D. Nelson, M. Cox, M. Cox, A. Lehninger, and K. Beginnen, *Lehninger Biochemie*. Springer-Lehrbuch. Springer, 2005.
- [9] R. Pokan, H. Förster, P. Hofmann, H. Hörtnagl, E. Ledl-Kurkowski, and M. Wonisch, *Kompendium der Sportmedizin: Physiologie, Innere Medizin und Pädiatrie*. Springer, 2004.
- [10] R. Schmidt, F. Lang, and G. Thews, *Physiologie Des Menschen: Mit Pathophysiologie*. Springer-Lehrbuch. Springer, 2005.
- [11] D. Sedlock, “The latest on carbohydrate loading: a practical approach,” *Current Sports Medicine Reports* **7** no. 4, 209–13.

- [12] C. Weiß, *Basiswissen Medizinische Statistik*. Springer-Lehrbuch. Springer, 2010.
- [13] J. Weineck, *Optimales Training: Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder- und Jugendtrainings*. Spitta, 2007.
- [14] P. Prampero, “Energetics of muscular exercise,” in *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology*, vol. 89, pp. 143–222. Springer Berlin Heidelberg, 1981.
- [15] Kjaer, M. and Krogsgaard, M. and Magnusson, P. and Engebretsen, L. and Roos, H. and Takala, T. and Woo, S., *Textbook of Sports Medicine: Basic Science and Clinical Aspects of Sports Injury and Physical Activity*. John Wiley & Sons, 2008.
- [16] Maughan, R.J. and IOC Medical Commission and International Federation of Sports Medicine, *Nutrition in Sport*. Encyclopaedia of Sports Medicine. Blackwell Science, 2000.
- [17] G. Püschel, H. Kühn, T. Kietzmann, and W. Höhne, *Taschenlehrbuch Biochemie*. Thieme, 2011.
- [18] Goforth, Harold W. and Arnall, Jr., David A. and Bennett, Brad L. and Law, Patricia G., “Persistence of supercompensated muscle glycogen in trained subjects after carbohydrate loading,” *Journal of Applied Physiology* **82** (1997), no. 1, 342–347.
- [19] Ahlborg, B., Bergström, J., Ekelund, L.G., Hultman, E., Maschio, G., “Human muscle glycogen content and capacity for prolonged exercise after different diets,” *Forvarsmedicin* **3** (1967) 85–99.
- [20] Sherman, W., D. Costill, W. Fink, and J. Miller, “Effect of exercisediet manipulation on muscle glycogen and its subsequent utilization during performance,” *Int. J. Sports Med.* **2** (1981) 114–118.
- [21] Vanessa A. Bussau, Timothy J. Fairchild, Arjun Rao Peter Steele, Paul A. Fournier, “Carbohydrate loading in human muscle: an improved 1 day protocol,” *Eur. J. Appl. Physiol.* **87** (2002) 290–295.
- [22] <http://www.dge.de/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=15>.

- [23] International Association of Athletics Federations, *IAAF Competition Rules 2009*. 2009.
- [24] Ahlborg, Björn and Bergström, Jonas and Ekelund, Lars-Göran and Hultman, Eric, "Muscle glycogen and muscle electrolytes during prolonged physical exercise1," *Acta Physiologica Scandinavica* **70** (1967), no. 2, 129–142.
- [25] Bergström, Jonas and Hermansen, Lars and Hultman, Eric and Saltin, Bengt, "Diet, muscle glycogen and physical performance," *Acta Physiologica Scandinavica* **71** (1967), no. 2-3, 140–150.
- [26] McLay, R.T., C.D. Thomson, S.M. Williams, and N.J. Rehrer, "Carbohydrate loading and female endurance athletes: effect of menstrual-cycle phase," *Int. J. Sport Nutr. Exerc.* **17** (2007) 189–205.
- [27] Paul, D.R., S.M. Mulroy, J.A. Horner, et al., "Carbohydrate-loading during the follicular phase of the menstrual cycle: effects on muscle glycogen and exercise performance," *Int. J. Sport Nutr. Exerc.* **11** (2001) 430–441.
- [28] Tarnopolsky, Mark A. and Zawada, Carol and Richmond, Lindsay B. and Carter, Sherry and Shearer, Jane and Graham, Terry and Phillips, Stuart M., "Gender differences in carbohydrate loading are related to energy intake," *Journal of Applied Physiology* **91** (2001), no. 1, 225–230.
- [29] Goforth, Harold W. and Laurent, Didier and Prusaczyk, William K. and Schneider, Kevin E. and Petersen, Kitt Falk and Shulman, Gerald I., "Effects of depletion exercise and light training on muscle glycogen supercompensation in men," *American Journal of Physiology - Endocrinology And Metabolism* **285** (2003), no. 6, E1304–E1311.
- [30] Zachwieja, J.J., D.L. Costill, D.D. Pascoe, et al., "Influence of muscle glycogen depletion on the rate of resynthesis," *Med. Sci. Sports Exerc.* **23** (1991) 44–48.
- [31] Bogardus, C., P. Thuillez, E. Ravussin, et al., "Effect of muscle glycogen depletion on in vivo insulin action in man," *J. Clin. Invest.* **72** (1983) 1605–1610.
- [32] Hultman, E., J. Bergström, and A.E. Roch-Norlund, "Glycogen storage in human skeletal muscle," *Adv. Exp. Med. Biol.* **11** (1971) 273–278.

- [33] Price, T. B. and Rothman, D. L. and Taylor, R. and Avison, M. J. and Shulman, G. I. and Shulman, R. G., “Human muscle glycogen resynthesis after exercise: insulin-dependent and -independent phases,” *Journal of Applied Physiology* **76** (1994), no. 1, 104–111.
- [34] J. L. Ivy, “Muscle glycogen synthesis before and after exercise,” *Sports Med.* **11** (1991) 6–19.
- [35] Walker, J. Lynne and Heigenhauser, George J. F. and Hultman, Eric and Spriet, Lawrence L., “Dietary carbohydrate, muscle glycogen content, and endurance performance in well-trained women,” *Journal of Applied Physiology* **88** (2000), no. 6, 2151–2158.
- [36] Hawley JA, Schabert EJ, Noakes TD, Dennis SC, “Carbohydrate-loading and exercise performance. an update,” *Sports Med.* **24** (1997), no. 2, 73–81.
- [37] Achten, J. and Halson, S. L. and Moseley, L. and Rayson, M. P. and Casey, A. and Jeukendrup, A. E., “Higher dietary carbohydrate content during intensified running training results in better maintenance of performance and mood state,” *Journal of Applied Physiology* **96** (2004), no. 4, 1331–1340.
- [38] B. I. Rapoport, “Metabolic factors limiting performance in marathon runners,” *PLoS Comput Biol* **6** (10, 2010) e1000960.

Curriculum Vitae

Angaben zur Person

Name:	Andreas Maier
Geburtsdatum:	12.05.1985
Geburtsort:	Wien, Österreich
Adresse:	A-1040 Wien, Mayerhofgasse8/9
Email:	a0304683@unet.univie.ac.at

Schulbildung:

Öffentliche Volksschule, Graf Starhemberg-Gasse 8, 1040 Wien	1991 - 1995
Bundesrealgymnasium, Waltergasse 7, 1040 Wien	1995 - 2003
Maturiert mit gutem Erfolg am	23.06.2003

Studium:

Diplomstudium Ernährungswissenschaften	2003 - 2012
Universität Wien, Dr.-Karl-Lueger-Ring 1, A-1010 Wien	

Berufsbildende Praktika:

“IMSB Austria – Institut für medizinische und sportwissenschaftliche Beratung”	02.11.2010 - 30.12.2010
2344 Maria Enzersdorf, Johann-Steinböck-Str. 5	
“Zentrum für Physiologie und Pharmakologie“	21.02.2011 -
Medizinische Universität Wien, Währingerstraße 13A, 1090 Wien	18.03.2011

Seminare

“Teilnahme am Seminar: Training à la carte (Agrarmarkt Austria)”	26. 02. 2009
--	--------------

Weitere Ausbildungen:

“Österreichische Lehrwartausbildung Allgemeine Körperausbildung”	2009
Bundessportakademie Linz, Auf der Gugl 30, A-4020 Linz	
mit ausgezeichnetem Erfolg bestanden	