

Pilotstudie: Auswirkungen des Trinkens von wasserstoffreichem Wasser auf Muskelermüdung, verursacht durch intensive sportliche Betätigung bei Spitzensportlern

Kosuke Aoki¹, Atsunori Nakao^{2*}, Takako Adachi¹, Yasushi Matsui¹ und Shumpei Miyakawa¹

Zusammenfassung

Hintergrund: Muskelkontraktionen während kurzer Intervalle intensiver sportlicher Belastung verursachen oxidativen Stress, der bei der Entwicklung von Symptomen übermäßigen Trainings, einschließlich erhöhter Ermüdung, eine Rolle spielen und Mikroverletzungen der Muskulatur sowie Entzündungen zur Folge haben kann. Kürzlich wurde darauf hingewiesen, dass Wasserstoff als Antioxidans wirken kann, was uns dazu veranlasste, die Auswirkungen wasserstoffreichen Wassers (WW) bei oxidativem Stress und Muskelermüdung durch intensive sportliche Betätigung zu untersuchen.

Methoden: An zehn männlichen Fußballspielern im Alter von $20,9 \pm 1,3$ Jahren wurden Belastungstests durchgeführt und Blutentnahmen vorgenommen. Jede Testperson wurde im Rahmen einer doppelblinden Crossover-Studie zweimal untersucht. In Intervallen von einer Woche wurde ihnen wasserstoffreiches Wasser (WW) bzw. Placebo-Wasser (PW) verabreicht. Den Testpersonen wurde die Aufgabe gestellt, sich für einen Zeitraum von 30 Minuten auf einem Fahrrad-Ergometer zu betätigen (75% maximale Sauerstoffaufnahme, $VO_2\max$), worauf eine Messung des Spitzendrehmoments und der Muskelaktivität im Verlauf von 100 Wiederholungen maximaler isokinetischer (mit gleicher Geschwindigkeit ablaufender) Knie-Extension (Kniestreckung) vorgenommen wurde. Marker für oxidativen Stress und Creatinkinase-Konzentration (ein Enzym, das für den Energiestoffwechsel der Muskelzellen wichtig ist) im peripheren Blut wurden sequenziell (fortlaufend) gemessen.

Ergebnisse: Während die intensive sportliche Belastung bei den Testpersonen, denen PW verabreicht wurde, zu einer Erhöhung der Laktatwerte (Laktat oder auch Milchsäure entsteht als Nebenprodukt der Energiegewinnung bei intensiven Belastungen) im Blut führte, verhinderte die orale Aufnahme von WW bei gleichzeitiger starker körperlicher Belastung eine Erhöhung dieser Werte. Das Spitzendrehmoment während der maximalen isokinetischen Knie-Extension sank bei der PW-Testgruppe in signifikantem Maße, was eine Muskelermüdung nahelegte, während das Spitzendrehmoment der WW-Testgruppe sich in der Anfangsphase nicht verringerte. Nach Beendigung des Belastungstests war bei den Blutwerten keine signifikante Veränderung der Marker für oxidativen Stress (d-ROMs und BAP) bzw. der Creatinkinase-Konzentration feststellbar.

Schlussfolgerung: Ausreichende Hydratation (Flüssigkeitszufuhr) mit wasserstoffreichem Wasser vor sportlicher Betätigung verringerte die Blutlaktatwerte und den durch sportliche Belastung herbeigeführten Leistungsrückgang der Muskelfunktion. Obgleich weitere Studien die genauen Wirkmechanismen sowie Nutzen und Vorteile wasserstoffreichen Wassers näher ausführen müssen, so weisen die vorläufigen Ergebnisse doch darauf hin, dass WW die für Sportler geeignete und angemessene Form der Hydratation ist.

Einführung

Da Energiebedarf und Sauerstoffverbrauch bei supramaximaler sportlicher Betätigung deutlich gesteigert sind, wie es etwa bei kurzen Sprints und Sprüngen der Fall ist, erhöht sich ebenfalls die Produktion reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) und reaktiver Stickstoffspezies (RNS), was zu einer Störung des Redox-Gleichgewichts und somit zu oxidativem Stress führen kann. Bei normaler körperlicher Bewegung fallen nur geringe Mengen an ROS und RNS an, die gewöhnlich durch die antioxidativen Sys-

teme des Körpers ausgeschieden werden. Eine stark erhöhte Produktion von ROS kann jedoch das zelluläre Schutz- und Abwehrsystem an die Grenzen seiner Belastbarkeit bringen. In der Folge kann der Angriff substanzialer freier Radikale auf Zellmembranen zu einem Verlust der Zellviabilität (Zelllebensfähigkeit) und sogar zum Zelltod führen, sowie zur Schädigung der Skelettmuskulatur und Entstehung von Entzündungen aufgrund übermäßiger sportlicher Belastung¹⁻³. Gut trainierte Sportler leiden zwar weniger unter oxidativem Stress, da ihre antioxidativen Systeme sich der Belastung anpassen. Vermehrte und übermäßige sportliche Belastung kann jedoch auch bei ihnen zu erhöhtem oxidativem Stress führen⁴. In letzter Zeit erschienen bereits

*Bitte richten Sie Ihren Schriftverkehr an:
atsunorinakao@aol.com

eine Reihe von Dokumentationen über die Supplementierung (Zugabe, Ergänzung) von Antioxidantien zur Minimierung von durch oxidativen Stress herbeigeführten nachteiligen Auswirkungen bei sportlicher Betätigung. Auch wenn diese Studien aufgrund der unterschiedlichen Arten und Mengen der verwendeten Antioxidantien oft widersprüchliche Ergebnisse hervorbrachten, wiesen doch einige von ihnen auf die vorteilhaften Wirkungen von Antioxidantien bei Muskelermüdung durch hohe sportliche Belastung hin^{5,6}.

Kürzlich wurden die vorteilhaften Effekte von wasserstoffreichem Wasser (WW) bei experimentellen und klinischen Krankheitszuständen näher beschrieben^{7,8}. Auch wenn die Forschung zu den gesundheitlichen Vorteilen von WW noch keine umfassenden Ergebnisse hervorgebracht hat und nur wenig statistische Daten zu den langfristigen Auswirkungen dieser Supplementierung vorliegen, weisen am Menschen durchgeführte Pilotstudien darauf hin, dass WW eine Präventivwirkung ausüben kann, etwa beim metabolischen Syndrom⁹, Diabetes mellitus¹⁰ und Nebenwirkungen der Strahlentherapie bei Krebspatienten¹¹. Da Wasserstoff dafür bekannt ist, toxische ROS abzufangen und zu neutralisieren¹² sowie die Produktion einer Reihe von antioxidativen Proteinen anzuregen^{13,14}, stellten wir die Hypothese auf, dass das Trinken von WW für Sportler von Vorteil bei der durch oxidativen Stress ausgelösten Muskelermüdung nach starker körperlicher Belastung sein könnte.

In dieser Studie überprüften wir die Wirksamkeit wasserstoffreichen Wassers bei gesunden Probanden durch Messung des Grades an Muskelermüdung und der Blutlaktat-Konzentration nach sportlicher Betätigung. Weitere Studien sind erforderlich, um die genauen Wirkmechanismen der vorteilhaften Auswirkungen wasserstoffreichen Wassers darzulegen, doch konnten wir mit dieser Studie bereits darauf hinweisen, dass wasserstoffreiches Wasser das richtige Mittel zur angemessenen Hydratation für Sportler sein könnte.

Methoden

Testpersonen

An zehn männlichen Fußballspielern im Alter von $20,9 \pm 1,3$ Jahren wurden Belastungstests durchgeführt und Blutentnahmen vorgenommen. Keiner der Probanden war Raucher oder nahm irgendwelche Arznei- bzw. sonstige Ergänzungsmittel. Jede Testperson gab vor der Teilnahme an der Studie ihre schriftliche Zustimmung zu den Regularien des *Human Research Ethics Committee* der University of Tsukuba. Die körperlichen Merkmale der Probanden werden in Tabelle 1 wiedergegeben. Alle Spieler nahmen an täglichen Trainingseinheiten teil, mit Ausnahme des Tages, an dem die Studie durchgeführt wurde.

Tabelle 1: Körperliche Merkmale der Testpersonen (n = 10)

Variable	Wert
Alter (Jahre)	$20,9 \pm 1,3$
Größe (cm)	$172,0 \pm 3,8$
Körpergewicht (kg)	$67,1 \pm 5,2$
BMI (kg/m ²)	$22,8 \pm 1,4$
VO ₂ max (ml/kg/min)	$53,2 \pm 4,9$

(BMI: Body-Mass-Index, VO₂max: maximale Sauerstoffaufnahme)

Herstellung von wasserstoffreichem Wasser

Zur Herstellung von Wasserstoff-Wasser wurde elementares metallisches Magnesium mit einem Reinheitsgrad von 99,9% mit natürlichen Mineralien und Keramik (Doctor SUIOSUI®, Friendear, Tokio, Japan) in Behältern aus Polypropylen vermischt. Bei Zugabe dieses Gemischs zu Trinkwasser entstand Wasserstoff nach der folgenden chemischen Gleichung: $Mg + 2 H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + H_2$. Der Magnesiumstab bzw. ein Placebo (ein Stab ohne Magnesium) wurde für einen Zeitraum von 24 Stunden in Mineralwasser (Volvic®, Kirin Inc., Tokio) eingetaucht, bevor das Wasser den Sportlern verabreicht wurde. Die Wasserstoff-Endkonzentrationen betragen 0 für das Placebo-Wasser (PW) bzw. 0,92 bis 1,02 mM^{9,11} für das Wasserstoff-Wasser (WW). Jede Testperson wurde im Rahmen einer doppelblinden Crossover-Studie zweimal untersucht, wobei ihr in Intervallen von einer Woche WW bzw. PW verabreicht wurde.

Dosierung und Art der Verabreichung von wasserstoffreichem Wasser

Jedem Probanden wurden drei Flaschen Trinkwasser mit einem Fassungsvermögen von je 500 ml zur Verfügung gestellt. Sie wurden angewiesen, 24 Stunden vor dem Trinken des Wassers zwei Magnesiumstäbe in die gefüllten Flaschen zu geben. Die Personen wurden dann gebeten, am Vortag des Tests um 22.00 Uhr eine Flasche und am Tag des Tests jeweils um 5.00 Uhr und 6.20 Uhr morgens zwei Flaschen zu trinken. Insgesamt nahmen die Probanden also 1.500 ml WW bzw. PW zu sich.

Protokoll

Die Erstellung des Forschungsprotokolls begann um 6.00 Uhr morgens. Am Tag vor der Durchführung der Studie erhielten die Testpersonen zwischen 21.00 und 22.00 Uhr eine letzte Mahlzeit und blieben dann bis zum Beginn der Studie nüchtern. Am Morgen des Tages, an dem die Studie durchgeführt wurde, erhielten die Probanden auch kein Frühstück. Zu Beginn wurden die Testpersonen aufgefordert, für einen Zeitraum von 30 Minuten in einer sitzenden Position zu ruhen. Der Belastungstest bestand dann aus folgendem: 1) progressiver Maximalbelastungstest zur Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO₂max); 2) Betätigung auf einem Fahrrad-Ergometer für 30 Minuten bei etwa 75% VO₂max („Übung 1“) und 3) 100 Wiederholungen maximaler isokinetischer Knie-Extensionen bei einem Winkel von 90° und einer Extension pro Sekunde („Übung 2“). Unmittelbar vor Übung 1 (6.30 Uhr), unmittelbar nach Übung 1 (7.15 Uhr), unmittelbar vor Übung 2 (7.30 Uhr), 30 Minuten nach Übung 2 (8.00 Uhr) und 60 Minuten nach Übung 2 (8.30 Uhr) wurde den Testpersonen Blut aus der Ellbogenvene abgenommen.

Progressiver Maximalbelastungstest

Um zunächst die maximale Sauerstoffaufnahme (VO₂max) zu bestimmen, wurden die Testpersonen einem progressiven Maximalbelastungstest auf einem Fahrrad-Ergometer (232CL, Conbiwellness, Tokio) unterzogen. Dieser bestand aus einem kontinuierlichen Stufentest beginnend mit einer Belastung von 30 W und einem Belastungsanstieg um 20 W pro Minute bis zur Erschöpfung. Die Probanden wurden angewiesen, eine Geschwindigkeit von 50 U/min einzuhalten. Die Werte für den Lungengasaustausch wurden mit einem speziellen Sensor (AE280S, Minato MedicalW, Osaka, Japan) über ein sog. „Breath-by-Breath-System“ (System, bei dem jeder einzelne Atemzug analysiert wird) ermittelt, und die Durchschnittswerte wurden alle 30 Sekunden für die Analyse berechnet. Wir legten fest, dass VO₂max erreicht war, wenn die Sauerstoffaufnahme ihr Plateau (Maximum) erreichte¹⁵.

Ergometer-Betätigung mit gleichbleibender Belastung bei 75 % (hohe Intensität) VO₂ max

Vor Beginn des Tests legten die Probanden eine Ruhepause von zwei Minuten ein. Nach einer Aufwärmphase mit 50 W für eine Minute wurden die Testpersonen angewiesen, sich auf dem Ergometer für eine Zeitdauer von 30 Minuten bei submaximaler Belastung zu betätigen. Die Werte für den Lungengasaustausch wurden überwacht, um eine VO₂max bei etwa 75 % aufrechtzuerhalten. Während der Tests wurden die Probanden immer wieder verbal angewiesen, die Belastungsintensität mit einer VO₂max bei etwa 75 % beizubehalten.

Maximale isokinetische Knie-Extensionen

Ein kalibriertes Biodex System 3 (Biodex Medical Systems, New York, USA) wurde eingesetzt, um Spitzendrehmoment und Kniegelenkposition im Verlauf von 100 Wiederholungen maximaler isokinetischer Knie-Extensionen zu messen. Während des Tests wurde jeder Proband auf dem Biodex System 3 mit einer 90°-Hüftbeugung platziert, Taille und Brust mit Spanngurten fixiert und ein fester Brustbein-Stabilisator angelegt. Das Dynamometer (Gerät zur Messung von Kräften zwischen zwei Körpern) mit Motorantrieb wurde bei einer konstanten Geschwindigkeit von 90°/ Sekunde betrieben. Jede Testperson vollführte eine Serie von 100 isokinetischen Kontraktionen unter Verwendung der Kniestreckmuskulatur des rechten Beins, ausgehend von einer 90°-Beugung bis 0° (vollständig gestreckte Position). Während sich der Arm des Dynamometers aus der 90°- in die 0°-Position hochbewegte, wurden die Probanden aufgefordert, bei jeder Kontraktion entlang des vollen Bewegungsumfanges maximale Leistung zu erbringen. Während der Arm des Dynamometers sich in die 90°-Position zurückbewegte, entspannten sich die Testpersonen wieder. Jede Kontraktions- und Entspannungsphase dauerte jeweils eine Sekunde, so dass die Gesamtlänge des Kontraktionszyklus zwei Sekunden betrug. Alle Testpersonen waren im Stande, die Gesamtzahl von 100 Kontraktionen auszuführen.

Messung der Muskelermüdung

Um die Muskelermüdung zu messen, wurde auf die weithin verwendete erste Fourier-Transform-Technik (FFT, Rechenverfahren zur Auswertung von spektroskopischen Daten) zurückgegriffen, um die Mittelfrequenz des Oberflächen-Elektromyogramms (EMG, Elektromyographie: elektrophysiologische Methode in der neurologischen Diagnostik, bei der die elektrische Muskelaktivität gemessen wird) zu analysieren¹⁶. Die EMG-Signale wurden vom Musculus rectus femoris (einer der vorderen Muskeln des Oberschenkels) bezogen, und zwar über Elektroden, die mit einem 4-Kanal-Frequenzmodulations-Sender (Nihon Kohden, Tokio, Japan) verbunden waren. Alle Messdaten wurden gespeichert und unter Verwendung der FFT-Funktionen der Acknowledge 3.7.5 Software (BIOPAC SYSTEM, Santa Barbara, USA)

analysiert. Mittlere Signalfrequenz (Mean Power Frequency, MPF) und Medianfrequenz (Median Power Frequency, MDF) wurden dann wie zuvor beschrieben berechnet¹⁷. Die MPF-Verschiebung des EMG-Signals hin zu niedrigeren Frequenzen wurde bei statischen Kontraktionen weithin benutzt, um die Entwicklung peripherer Muskelermüdung aufzuzeigen.

Bluttest

Die Blutlaktatwerte wurden mit einem handelsüblichen Lactate Pro LT17170 Kit (Arkray, Inc., Kyoto, Japan) ermittelt. Die Konzentrationen an derivativen (durch Ableitung entstandenen) reaktiven Sauerstoff-Metaboliten (dROMs) und an biologischen Antioxidationskräften (BAP) im peripheren Blut wurden unter Verwendung eines Analysesystems für freie Radikale (FRAS4; Wismerll, Tokio, Japan) bestimmt. Labortests zur Bestimmung der Konzentration an Creatinkinase (CK) wurden mittels Standardverfahren von Kotobiken Medical Laboratory Services (Tokio, Japan) durchgeführt.

Statistische Analyse

Für die statistische Auswertung wurde eine ANOVA-Varianzanalyse mit Messwiederholungen vorgenommen, um die vor und nach körperlicher Belastung erhaltenen Werte zu vergleichen. Der F-Test (Test zur Prüfung, ob sich die Varianz eines Merkmals zwischen zwei unabhängigen Stichproben unterscheidet) unter Verwendung von Gruppenvergleichen mit dem Bonferroni-Post-Hoc-Test (ein Signifikanztest aus der mathematischen Statistik) kam zur Anwendung, wo es zweckdienlich war. Wahrscheinlichkeitswerte unterhalb von 0,05 wurden als statistisch signifikant angesehen. Die SPSS 18.0 (eine Statistik- und Analyse-Software) wurde zur Durchführung der statistischen Analyse eingesetzt. Da beim Experiment geplant war, eine 90%ige Teststärke (Teststärke oder „Power“: die Aussagekraft eines statistischen Tests) mit einer Signifikanz im Bereich von 5 % zu erreichen, wurde die Stichprobengröße in diesem Modell auf Werte zwischen 8,91 und 9,25 (90 % Teststärke und 5 % Signifikanzniveau / Irrtumswahrscheinlichkeit) bei den Blutlaktatwerten berechnet, was auf unseren früheren Erfahrungswerten beruht. Wir gingen deshalb davon aus, dass die Stichprobengröße für die Sammlung vorläufiger Daten angemessen wäre.

Ergebnisse

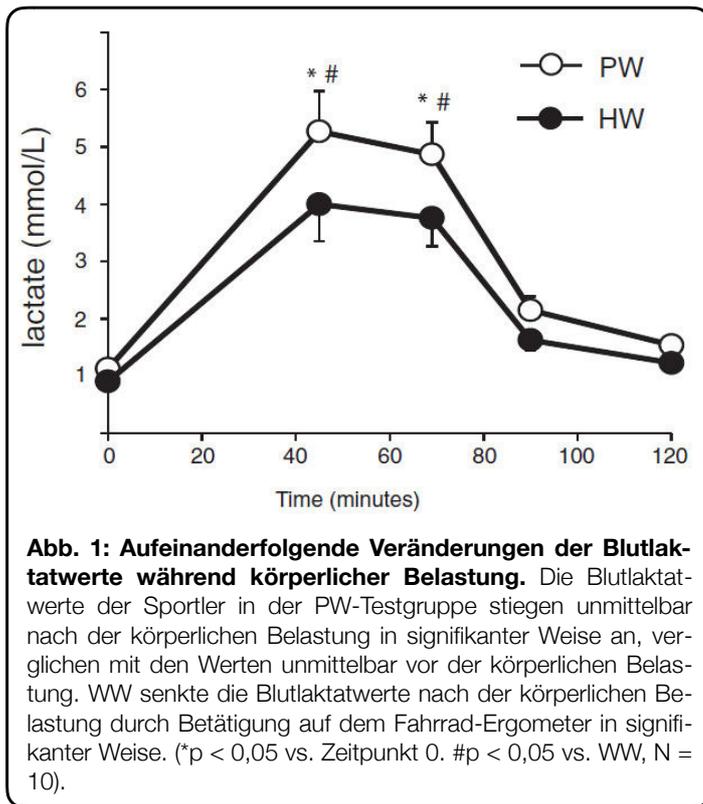
Blutanalyse hinsichtlich Milchsäure (Laktat), d-ROMs, BAP und CK

Wie in Tabelle 2 wiedergegeben, erhöhten sich die Blutwerte für d-ROMs, BAP und CK der Testpersonen beider Gruppen nach körperlicher Belastung und Verabreichung von PW bzw. WW. Es waren jedoch keine statistischen Unterschiede zwischen den Gruppen feststellbar. Obwohl die Blutlaktatwerte nach 45 und 60 Minuten körperlicher Belastung sowohl bei der WW- als auch bei

Tabelle 2: Veränderungen der Blutwerte

		0 min	45 min	60 min	90 min	120 min
d-ROMs (U.CARR)	PW	281.3 ± 61.8	285.7 ± 52.3*	287.0 ± 56.9*	274.2 ± 50.2	280.0 ± 47.6
	HW	2336.7 ± 123.1	303.5 ± 46.3*	308.6 ± 56.1*	296.1 ± 57.9	307.0 ± 45.8
BAP (µmol/L)	PW	407.4 ± 269.9	2648.9 ± 96.5*	2632.8 ± 146.4*	2349.6 ± 152.0	2321.8 ± 196.9
	HW	269.0 ± 50.8	2659.1 ± 102.1*	2664.6 ± 201.0*	2299.8 ± 104.6	2356.4 ± 143.7
CK (IU/L)	PW	2347.3 ± 155.8	296.5 ± 119.9*	300.9 ± 127.7*	264.7 ± 113.3*	256.3 ± 111.7
	HW	247.0 ± 105.1	483.2 ± 314.0*	478.1 ± 314.5*	428.2 ± 282.0	353.7 ± 264.6

Daten werden wiedergegeben als durchschnittliche Standardabweichungen („mean ± standard deviation, „SD“). *p < 0,05 vs. 0 min.



der PW-Testgruppe signifikant erhöht waren, waren diese Werte im direkten Vergleich bei der WW-Testgruppe insgesamt in signifikanter Weise niedriger als bei der PW-Testgruppe (Abb. 1).

Maximale Knie-Extensionsübungen

Bei der Analyse hinsichtlich der maximalen Knie-Extensionsübungen nahmen wir eine Unterteilung in fünf „Frames“ (Zwischenwerte bei den Veränderungen des Spitzendrehmoments nach jeweils 20 der insgesamt 100 Wiederholungen der isokinetischen Knie-Extensionsübungen) vor (siehe Abb. 2)¹⁸. Frame 1 ist somit der Wert nach den ersten 20 Wiederholungen, Frame 2 der Wert für die darauf folgenden Wiederholungen 21 bis 40, Frame 3 der für die Wiederholungen 41 bis 60, Frame 4 der für die Wiederholungen 61 bis 80 und Frame 5 der für die Wiederholungen 81 bis 100. Obgleich sich das Spitzendrehmoment bei der PW-Testgruppe während der ersten 40 Wiederholungen (Frame 1-2) signifikant verringerte, erreichte die Verringerung des Spitzendrehmoments bei der WW-Testgruppe keinen statistisch signifikanten Differenzwert, was nahelegt, dass WW die frühe Verringerung des Spitzendrehmoments bei den Testpersonen verhinderte (Abb. 2A).

Medianfrequenz (MDF) und Mittlere Signalfrequenz (MPF) bei der Elektromyographie- (EMG-) Analyse

Die MDF- und MPF-Werte sanken bei beiden Testgruppen während der körperlichen Belastung in signifikanter Weise ab. Während sich diese Werte bei Frame 1-2 in signifikanter Weise verringerten, war keine statistische Differenz zwischen den PW- und WW-Testgruppen feststellbar (Abb. 2 B und C).

Diskussion

In dieser Vorstudie konnten wir nachweisen, dass Hydration mit WW zu einem verringerten Anstieg der Blutlaktatwerte und zu einer Verhinderung der Abnahme des Spitzendrehmoments nach körperlicher Belastung – ein Indikator für Muskelermüdung – führte. Muskelermüdung wird durch viele verschiedene Mecha-

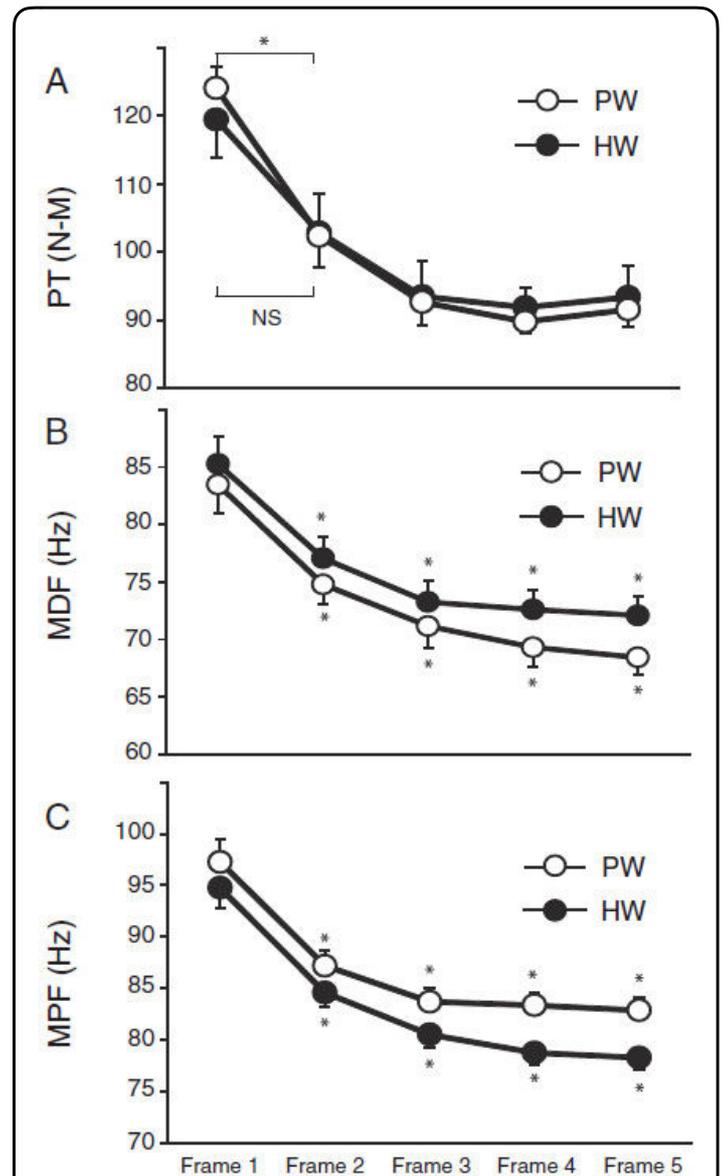


Abb. 2A: Veränderungen des Spitzendrehmoments („PT“, peak torque) nach jeweils 20 Wiederholungen (1 Frame) bei insgesamt 100 maximalen Knie-Extensionsübungen.

Das PT bei der PW-Testgruppe zeigte nach 40 bis 60 Kontraktionen eine signifikante Abnahme um etwa 20 bis 25% gegenüber den Ausgangswerten, gefolgt von einer Phase mit nur geringen Veränderungen. Andererseits war bei der WW-Testgruppe keine statistisch signifikante Differenz zwischen Frame 1 und Frame 2 feststellbar, was darauf hindeutet, dass WW während der ersten zwei Frames eine Abnahme des PT verhinderte. (*p < 0,05 vs. Frame 1, N = 10)

Abb. 2B: Veränderungen der Medianfrequenz (MDF) nach jeweils 20 Wiederholungen (1 Frame) von insgesamt 100 maximalen Knie-Extensionsübungen.

Obgleich die körperliche Belastung zu einer signifikanten Abnahme der MDF-Werte während der ersten beiden Frames führte, gab es keine statistisch signifikante Differenz zwischen der WW- und der PW-Testgruppe über alle Frames hinweg. (*p < 0,05 vs. Frame 1, N = 10)

Abb. 2C: Veränderungen der Mittlere Signalfrequenz (MPF) nach jeweils 20 Wiederholungen (1 Frame) von insgesamt 100 maximalen Knie-Extensionsübungen.

Über alle Frames hinweg waren keine statistisch signifikanten Differenzen zwischen der WW- und der PW-Testgruppe feststellbar. (*p < 0,05 vs. Frame 1, N = 10)

nismen herbeigeführt, einschließlich der Akkumulation (Anhäufung) von Metaboliten (Substanzen, die als Zwischenstufen oder Abbauprodukte von Stoffwechselforgängen des Organismus entstehen) innerhalb der Muskelfasern, und aufgrund von unzureichender motorischer Steuerungsfähigkeit im motorischen Cortex (Bereich der Großhirnrinde, von dem aus willkürliche Bewegungen gesteuert werden). Die Akkumulation von Kalium, Laktat und H⁺ (ein einzelnes, sehr reaktives Wasserstoffatom) wurde oft als Ursache für eine Abnahme der Muskel-Kontraktionskraft angesehen¹⁹. Darüber hinaus verursachen aerobe und anaerobe körperliche Belastungen sowie eine Kombination aus diesen beiden eine Erhöhung der ROS-Produktion, was zu Entzündungen und Zellschädigungen führen kann²⁰. Kurze Spitzen starker körperlicher Belastung können oxidativen Stress aufgrund verschiedener Umstände herbeiführen, wie etwa durch Austritt von Elektronen aus den Mitochondrien, Autooxidation von Katecholaminen (bestimmte Hormone wie Adrenalin, Noradrenalin und Dopamin, die als Botenstoffe fungieren), NADPH-Aktivität (NADPH: Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat, ein Koenzym, das an zahlreichen Redoxreaktionen des Stoffwechsels der Zelle beteiligt ist) oder Ischämie/Reperfusion (verminderte Blutversorgung bzw. Wiederdurchblutung)²¹. Obgleich die Wirkmechanismen hinsichtlich der Funktion von WW bisher noch unklar sind, zeigen unsere Ergebnisse doch, dass eine Hydratation mit WW bei starker körperlicher Belastung praktikabel sein könnte. Angemessene und ausreichende Hydratation kann zur Erzielung von sportlichen Spitzenleistungen ein hilfreiches Mittel sein. WW kann auf einfache Weise und auf routinemäßiger Basis reguläres Trinkwasser ersetzen und nachteilige Auswirkungen aufgrund starker körperlicher Belastung potenziell verhindern.

Faktoren wie etwa Alter, Ernährungszustand, Trainingsniveau und Art der körperlichen Aktivität können dabei einen Einfluss auf die Ergebnisse ausüben^{22,23}.

Obgleich es unserer Erwartung entsprach, dass Wasserstoff, ein bekanntes Antioxidans, oxidativen Stress nach starker körperlicher Belastung reduzieren würde, waren die Auswirkungen oraler Aufnahme von WW doch eher marginal (geringfügig), was daran zu erkennen war, dass nach der körperlichen Belastung keine signifikante Veränderung der Marker für oxidativen Stress nachzuweisen war. Die Erklärung hierfür könnte sein, dass die Sportler, die an unserer Studie teilnahmen, regelmäßig intensive Trainingseinheiten absolviert haben und ihre antioxidierenden Abwehrsysteme daher vergleichsweise aktiver sind. Aus vorangegangenen Studien ging hervor, dass wiederholtes aerobes Training zu einer Erhöhung antioxidativer Enzymaktivität und somit zu einer Minderung von oxidativem Stress führt^{2,24-26}. Auch angesichts der Tatsache, dass Wasserstoff nur kurze Zeit im Körpersystem zirkuliert²⁷, könnte das häufigere Trinken von WW bei sportlicher Betätigung zusätzliche Auswirkungen haben. Deshalb sollte eine zukünftige Studie die Wirksamkeit von WW auf untrainierte Probanden bzw. Freizeitsportler untersuchen, die schwächer entwickelte antioxidative Abwehrsysteme aufweisen und somit eine verminderte Fähigkeit besitzen, durch sportliche Betätigung herbeigeführten oxidativen Stress zu bekämpfen. Ebenso sollten unterschiedliche Protokolle bzw. Verfahrensweisen der Verabreichung von WW geprüft werden.

In dieser Studie quantifizierten wir Muskelermüdung als einen Rückgang der maximalen Muskelkraft bzw. Kontraktionsfähigkeit, was bedeutet, dass submaximale Muskelkontraktionen nach dem Einsetzen der Muskelermüdung aufrechterhalten werden können. In ähnlicher Weise ist der Blutlaktatwert bei klinischen Belastungstests einer der am häufigsten gemessenen Parameter, ebenso wie beim Leistungstest von Sportlern. Erhöhte Blutlaktatwerte wurden oft als eine der Hauptursachen sowohl der Muskelermüdung bei sportlicher Betätigung als auch bei Muskel-

schmerzen („Muskelkater“) nach starker körperlicher Belastung angesehen. Die durch anaeroben Abbau von Glycogen (ein Polysaccharid, Vielfachzucker) in den Muskeln herbeigeführte Anhäufung von Laktat erfolgt nur bei kurzen Spitzen relativ starker körperlicher Belastung und wird gewöhnlich mit Muskelermüdung und -schmerzen in Verbindung gebracht. Bisherige Befunde haben aufgezeigt, dass die Akkumulation von anorganischem Phosphat als Abbauprodukt von Creatinphosphat (Verbindung von Creatin und Phosphat, die in der Muskulatur der Energiegewinnung dient) die Hauptursache für Muskelermüdung war²⁸.

Dehydratation (Mangel an Flüssigkeitszufuhr) bei Sportlern kann ebenfalls zu Muskelermüdung, verminderter Leistungsfähigkeit, verringerter motorischer Koordination und Muskelkrämpfen führen. Auch wenn dahingehend weitere Studien vorgenommen werden sollten, kann doch jetzt schon davon ausgegangen werden, dass das Trinken von WW eine geeignete Hydrations-Strategie darstellen könnte²⁹. In dieser Studie haben wir den Probanden vor ihrer körperlichen Betätigung WW bzw. PW verabreicht. Weitergehende Untersuchungen sind erforderlich, um den besten Zeitpunkt, die optimale Dosierung und die effektivste Wasserstoff-Konzentration zur bestmöglichen Wirksamkeit von WW zu ermitteln.

Zusammengefasst können wir feststellen, dass unsere vorläufigen Studienergebnisse darauf hinweisen, dass das Trinken von WW zu einer signifikanten Senkung der Blutlaktatwerte und Verringerung der Muskelermüdung nach starker körperlicher Belastung führt. Auch wenn, wie bereits ausgeführt, weitere Studien in dieser Richtung angezeigt sind, ist hier und jetzt festzustellen, dass das Trinken von WW eine neuartige und effektive Hydrations-Strategie für Sportler darstellen könnte.

Erklärung hinsichtlich konkurrierender Interessen

Die Autoren erklären hiermit, keine miteinander konkurrierenden Interessen zu verfolgen.

Danksagungen

Diese Studie wurde mit Fördermitteln der Daimaru Research Foundation für S.M. unterstützt.

Autoren

¹Doctoral Program in Sports Medicine, Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan. ²Department of Emergency and Critical Care Medicine, Hyogo College of Medicine, 1-1, Mukogawa-cho, Nishinomiya, Hyogo 663-8501, Japan. ³Department of Emergency and Critical Care Medicine, Hyogo College of Medicine, 1-1, Mukogawa-cho, Nishinomiya, Hyogo 663-8501, Japan.

Autorenbeiträge

K.A., T.A. und Y.M. nahmen am Entwurf des Protokolls und der Datenerfassung teil. A.N. konzipierte die Studie und erstellte den Manuskriptentwurf. S.M. nahm an Entwurf und Koordination der Studie teil. Das endgültige Manuskript wurde von allen Autoren durchgelesen und genehmigt.

Erhalten am 21. März 2012; angenommen am 20. April 2012; veröffentlicht am 20. April 2012

Quellenangaben (englisch)

1. Djordjevic D, Cubrilo D, Macura M, Barudzic N, Djuric D, Jakovljevic V: The influence of training status on oxidative stress in young male handball players. *Mol Cell Biochem* 2011, 351(1-2): 251-259.

2. Tanskanen M, Atalay M, Uusitalo A: Altered oxidative stress in overtrained athletes. *J Sports Sci* 2010, 28(3):309–317.
3. Jackson MJ: Muscle damage during exercise: possible role of free radicals and protective effect of vitamin E. *Proc Nutr Soc* 1987, 46(1):77–80.
4. Tiidus PM: Radical species in inflammation and overtraining. *Can J Physiol Pharmacol* 1998, 76(5):533–538.
5. Palazzetti S, Rousseau AS, Richard MJ, Favier A, Margaritis I: Antioxidant supplementation preserves antioxidant response in physical training and low antioxidant intake. *Br J Nutr* 2004, 91(1):91–100.
6. Margaritis I, Palazzetti S, Rousseau AS, Richard MJ, Favier A: Antioxidant supplementation and tapering exercise improve exercise-induced antioxidant response. *J Am Coll Nutr* 2003, 22(2):147–156.
7. Huang CS, Kawamura T, Toyoda Y, Nakao A: Recent advances in hydrogen research as a therapeutic medical gas. *Free Radic Res* 2010, 44(9):971–982.
8. Ohta S, Nakao A, Ohno K: The 2011 Medical Molecular Hydrogen Symposium: An inaugural symposium of the journal Medical Gas Research. *Med Gas Res* 2011, 1(1):10.
9. Nakao A, Toyoda Y, Sharma P, Evans M, Guthrie N: Effectiveness of hydrogen rich water on antioxidant status of subjects with potential metabolic syndrome—an open label pilot study. *J Clin Biochem Nutr* 2010, 46(2):140–149.
10. Kajiyama S, Hasegawa G, Asano M, Hosoda H, Fukui M, Nakamura N, Kitawaki J, Imai S, Nakano K, Ohta M, et al: Supplementation of hydrogen-rich water improves lipid and glucose metabolism in patients with type 2 diabetes or impaired glucose tolerance. *Nutr Res* 2008, 28(3):137–143.
11. Kang KM, Kang YN, Choi IB, Gu Y, Kawamura T, Toyoda Y, Nakao A: Effects of drinking hydrogen-rich water on the quality of life of patients treated with radiotherapy for liver tumors. *Med Gas Res* 2011, 1(1):11.
12. Ohsawa I, Ishikawa M, Takahashi K, Watanabe M, Nishimaki K, Yamagata K, Katsura K, Katayama Y, Asoh S, Ohta S: Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals. *Nat Med* 2007, 13(6):688–694.
13. Kawamura T, Huang CS, Peng X, Masutani K, Shigemura N, Billiar TR, Okumura M, Toyoda Y, Nakao A: The effect of donor treatment with hydrogen on lung allograft function in rats. *Surgery* 2011, 150(2):240–249.
14. Buchholz BM, Masutani K, Kawamura T, Peng X, Toyoda Y, Billiar TR, Bauer AJ, Nakao A: Hydrogen-enriched preservation protects the isogeneic intestinal graft and amends recipient gastric function during transplantation. *Transplantation* 2011, 92(9):985–992.
15. Howley ET, Bassett DR Jr, Welch HG: Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc* 1995, 27(9):1292–1301.
16. Larsson B, Karlsson S, Eriksson M, Gerdle B: Test-retest reliability of EMG and peak torque during repetitive maximum concentric knee extensions. *J Electromyogr Kinesiol* 2003, 13(3):281–287.
17. Gerdle B, Elert J: The temporal occurrence of the mean power frequency shift of the electromyogram during maximum prolonged dynamic and static working cycles. *Int J Sports Med* 1994, 15(Suppl 1):S32–S37.
18. Sun G, Miyakawa S, Kinoshita H, Shiraki H, Mukai N, Takemura M, Kato H: Changes in Muscle Hardness and Electromyographic Response for Quadriceps Muscle during Repetitive Maximal Isokinetic Knee Extension Exercise. *Football Science* 2009, 6:17–23. Aoki et al. Medical Gas Research 2012, 2:12 Page 5 of 6 <http://www.medicalgasresearch.com/content/2/1/12>
19. Horita T, Ishiko T: Relationships between muscle lactate accumulation and surface EMG activities during isokinetic contractions in man. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1987, 56(1):18–23.
20. Finaud J, Lac G, Filaire E: Oxidative stress: relationship with exercise and training. *Sports Med* 2006, 36(4):327–358.
21. Bloomer RJ: Effect of exercise on oxidative stress biomarkers. *Adv Clin Chem* 2008, 46:1–50.
22. Goldfarb AH: Nutritional antioxidants as therapeutic and preventive modalities in exercise-induced muscle damage. *Can J Appl Physiol* 1999, 24(3):249–266.
23. Clarkson PM, Thompson HS: Antioxidants: what role do they play in physical activity and health? *Am J Clin Nutr* 2000, 72(2 Suppl):637S–646S.
24. Brites FD, Evelson PA, Christiansen MG, Nicol MF, Basilio MJ, Wikinski RW, Llesuy SF: Soccer players under regular training show oxidative stress but an improved plasma antioxidant status. *Clin Sci (Lond)* 1999, 96(4):381–385. Ortenblad N, Madsen K, Djurhuus MS: Antioxidant status and lipid peroxidation after short-term maximal exercise in trained and untrained humans. *Am J Physiol* 1997, 272(4 Pt 2):R1258–R1263.
25. Selamoglu S, Turgay F, Kayatekin BM, Gonenc S, Yslegen C: Aerobic and anaerobic training effects on the antioxidant enzymes of the blood. *Acta Physiol Hung* 2000, 87(3):267–273.
26. Shimouchi A, Nose K, Yamaguchi M, Ishiguro H, Kondo T: Breath hydrogen produced by ingestion of commercial hydrogen water and milk. *Biomark Insights* 2009, 4:27–32.
27. Westerblad H, Allen DG, Lannergren J: Muscle fatigue: lactic acid or inorganic phosphate the major cause? *News Physiol Sci* 2002, 17:17–21.
28. Maughan RJ, Shirreffs SM: Development of hydration strategies to optimize performance for athletes in high-intensity sports and in sports with repeated intense efforts. *Scand J Med Sci Sports* 2010, 20(Suppl 2):59–69.

doi:10.1186/2045-9912-2-12

Zitierweise für diesen Artikel: Aoki et al.: Pilot study: Effects of drinking hydrogen-rich water on muscle fatigue caused by acute exercise in elite athletes.

Medical Gas Research 2012 2:12.

Copyright© 2017 der deutschen Übersetzung by Andreas Zantop, Berlin im Auftrag der Echo Germany GmbH, www.echo-h2.de

Urheberrecht:

"Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte vorbehalten." Der Autor ist bestrebt, in allen Publikationen die Urheberrechte der verwendeten Texte zu beachten, von ihm selbst erstellte Texte zu nutzen oder auf lizenzfreie Texte zurückzugreifen. Sollte sich auf den jeweiligen Seiten dennoch eine ungekennzeichnete, aber durch fremdes Copyright geschützte Grafik, oder Text befinden, so konnte das Copyright vom Autor nicht festgestellt werden. Im Falle einer solchen unbeabsichtigten Copyrightverletzung wird der Autor das entsprechende Objekt nach Benachrichtigung aus seiner Publikation entfernen bzw. mit dem entsprechenden Copyright kenntlich machen.