

Studie zur Überprüfung der Modellsimulation zur Bestimmung des Crossing Points

von Joachim Magera, Geschäftsführer der Firma mesics GmbH im Oktober 2020

Mitwirkende: Firma Strongerlab/Flensburg und Firma Focus:Diagnostik / Jülich

V1.1 vom 11.12.20



Zielsetzung

Die Zielsetzung dieses ersten Studienteils ist die praktische Überprüfung der hauseigenen Softwaresimulation des Energiestoffwechsels basierend auf den Arbeiten von MADER (1984 und 2003).

Es wurde der Vergleich des simulierten Crossing Points mit der aus dem Training bekannten FTP (functional threshold power) bei $n = 14$ gut trainierten Triathleten auf dem Radergometer angestrebt. Zudem sollte die simulierte Zone der maximalen Fettverbrennung (in Watt) mit der spirometrischen Messung verglichen werden.

Weitere Ziele waren die Abschätzung der $\dot{V}O_2\max$ aus einem 4 min All-Out-Test im Feld.

Ergebnisse

Die funktionelle Schwelle FTP konnte im Mittel mit sehr hoher Relevanz ($r = 0,89$) mittels Simulation vorhergesagt werden. Die Standardabweichung betrug dennoch etwa 10 %. Die Simulation zur Bestimmung des Punktes der max. Fettverbrennung korreliert gut mit den spirometrischen Messungen, aber auch hier sind hohe individuelle Abweichungen möglich.

Die $\dot{V}O_2\max$ kann mit sehr hoher Relevanz ($r=0,95$) aus der mittleren Leistung im 4 min All-Out abgeschätzt werden.

Hintergrund

Die zu überprüfende Simulation basiert auf den Veröffentlichungen von MADER aus dem Jahr 1984 [1] und 2003 [2]. Hier werden als Eingangsparameter die maximale Sauerstoffaufnahme $\dot{V}O_2\max$ und die maximale glykolytische Leistungsfähigkeit v_{Lamax} sowie das Körpergewicht verlangt. Die Stoffwechselsimulation ermittelt auf Basis des zugrundeliegenden Modells den Crossing Point CP (Laktateliminationsrate = Laktatproduktionsrate) und weitere Parameter des Energiestoffwechsels.

Studiensetup

In der Studie wurden 14 ProbandenInnen mit folgenden Daten zu einem zweistufigen Testverfahren eingeladen:

Geschlecht: 10 Männer, 4 Frauen

Alter: $38,5 \pm 10$ Jahre

Gewicht: $73 \pm 8,8$ kg

Muskelmasse: $33\% \pm 0,85\%$

Körperfett: $14\% \pm 5,5\%$

Statistik

Bei angegebenem r handelt es sich um den Pearson Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient. Die Signifikanz p wird ebenfalls angegeben. Die statistischen Berechnungen wurden mit einer Online App „StatisticGuru“ (<https://statistikguru.de/rechner/korrelation-online-berechnen.html>) durchgeführt.

Testverfahren

Es erfolgt zunächst die Bestimmung der v_{Lamax} mittels 15 s Ausbelastungstest auf dem Radergometer und anschließend eine minütliche Laktatentnahme in der Erholungsphase bis zur 10. Minute.

Jeweils 2 h später wurde zur Bestimmung der $\dot{V}O_2max$ eine Spiroergometrie mit rampenförmiger Belastung (2 Watt/kg + 30 Watt/min bei Männern bzw. 100 Watt + 20 Watt/min bei Frauen) durchgeführt. Die Belastungsdauer betrug im Mittel 10 Minuten.

Verwendete Laborsysteme

v_{Lamax} :

- Cyclus2 von RBM / Leipzig im Isokinetikmodus mit jeweils eigenem Triathlonbike des Probanden
- Laborlaktatgerät EKG Biosen C-Line

$\dot{V}O_2max$:

- Cyclus2 von RBM / Leipzig mit jeweils eigenem Triathlonbike des Probanden
- Spiroergometriesystem MetaLyzer 3B-R2 von CORTEX Biophysik GmbH /Leipzig

Verwendete Auswertungssoftware

- $\dot{V}O_2max$: „Metasoft“ von Firma CORTEX , aktuelle SW Version
- v_{Lamax} : „ v_{Lamax} Modul“ von Firma mesics GmbH / Münster
- Simulation: „Metabolic modeller“ von Firma mesics GmbH / Münster

Bestimmung der vLaMax

Die vLamax wurde mit der Software „vLaMax Modul“ bestimmt. Dazu wurde die jeweilige Lastinformation als Datei vom Cyclus2 importiert (Auflösung je nach Cadenz, 1 Messpunkt pro Umdrehung) und die Laktatwerte in der Nachbelastung manuell eingegeben. Die Berechnung der alaktaziden Zeit basierte auf dem üblichen Schema TPmax - 3,5 % (s.u.).

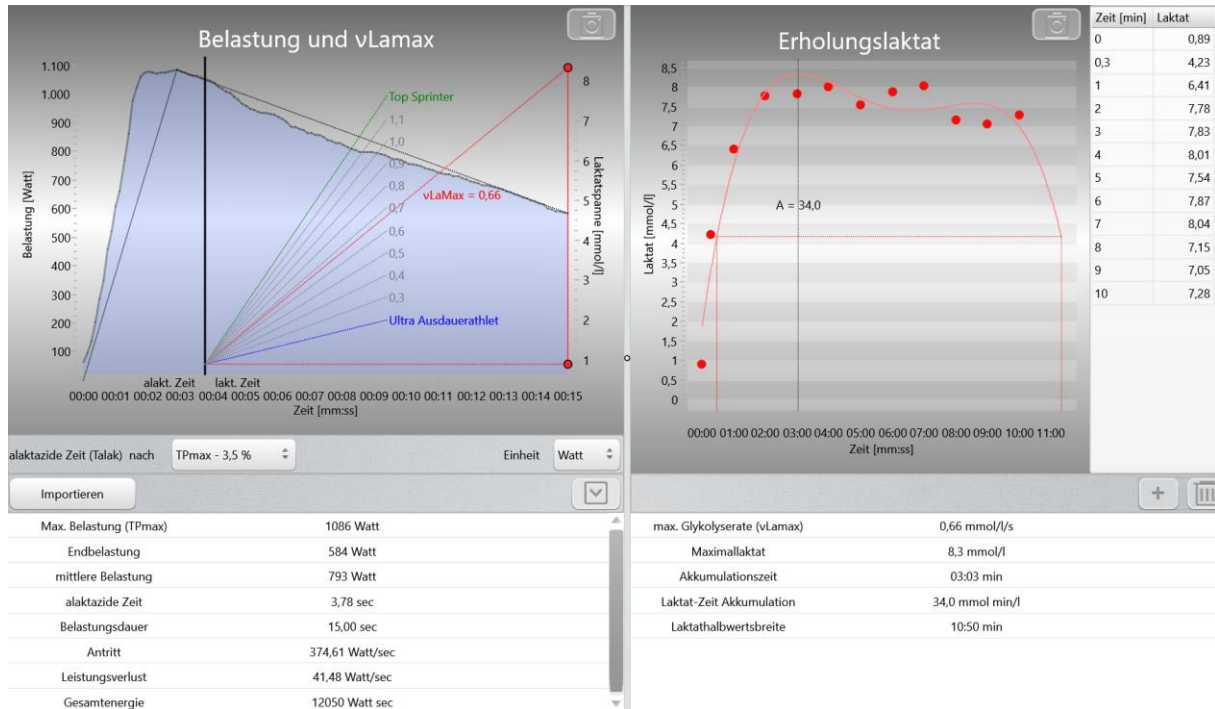


Abbildung 1 Screenshot der Software "vLaMax Modul" mit Ausgabe der Ergebnisse im unteren Bereich

Bestimmung der alaktaziden Zeit

Die alaktazide Zeit ist ein maßgeblicher Faktor zur Berechnung der vLamax.

Sie wurde in dieser Studie bestimmt über die Formel Talak = TPmax - 3,5%. Die alaktazide Zeit endet also an dem Punkt, wo sich die erbrachte Leistung um 3,5% gegenüber der maximal erbrachten Leistung (Pmax) reduziert hat. Die so errechneten alaktaziden Zeiten lagen hier im Mittel bei 3,6 s mit einer Standardabweichung von 2,2 s (1,5 - 7,2 s).

Bestimmung der $\dot{V}O_2\text{max}$ aus der Spiroergometrie

Die Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme als Eingangsparameter für die Stoffwechselsimulation erfolgte auf Basis der üblichen Vorgehensweise bei Rampentests. Die Berechnung erfolgte mittels Software „MetaSoft“ von CORTEX.

Bestimmung der VT2 aus der Spiroergometrie

Die Bestimmung des respiratorischen Kompensationspunkts (RCP = VT2) wurde zwar ebenfalls vorgenommen, dieser wurde aber nicht weiter in der Simulation berücksichtigt. Die Leistung an der VT2 lag in allen Fällen deutlich über dem FTP und dem unten bestimmten Crossing Point (MaxLASS) aus der Simulation, was der Praxiserfahrung entspricht. Es sei erwähnt, dass – wie üblich – keine Leistungskorrektur durch die Reaktionszeit der Sauerstoffaufnahme (Tau-Zeit) erfolgte. Mit einer angenommenen mittleren Verzögerungszeit von 30 s hätte sich eine Verschiebung/Korrektur der Wattleistung um etwa 15 Watt (bei den Männern) nach unten ergeben. Aber auch diese Korrektur reicht nicht, um die Abweichung zu eliminieren, die im Mittel über 70 Watt beträgt.

Es zeigte sich ansonsten eine gut ausgeprägte Korrelation zwischen VT2 und Crossing Point ($r = 0,87$, $p < 0,001$):

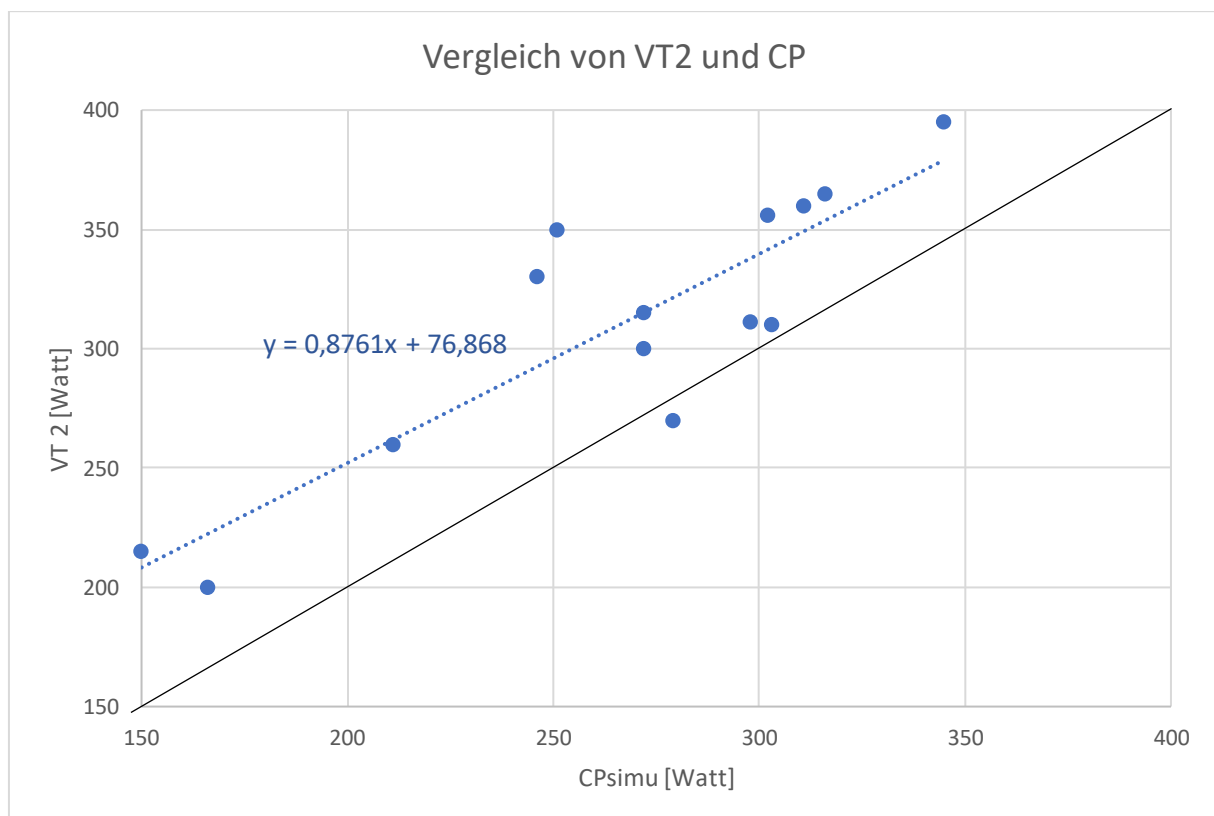


Abbildung 2 Vergleich von VT2 und Crossing Point. Wie aus der Praxiserfahrung zu erwarten liegt die VT2 im Mittel gleichmäßig deutlich über dem simulierten Crossing Point aber korreliert gut ($r=0.87$).

Simulation

Die Bestimmung sowohl des Crossing Points als auch der Leistung am Maximum der Fettverbrennung wurde über die Software „Metabolic Modeller“ der Firma mesics bestimmt. Die Ergebnisse der Simulationssoftware wurden zuvor mittels Vergleich anderer Arbeiten [3] auf Korrektheit überprüft.

Bestimmung des Crossing Points über die Simulation

Der Crossing Point ist der Punkt an der die simulierte Laktatproduktion und -elimination gemäß MaxLaSS (MLSS) Definition übereinstimmen. In Abb.3 ist der Verlauf der beiden Kurven und der Schnittpunkt dargestellt.

Bestimmung der Leistung der maximalen Fettverbrennung über die Simulation

Der Leistungspunkt am FatMax wird von der verwendeten Simulationssoftware bereits ausgegeben. Er entspricht dem Wert an der oberen X-Achse beim Maximum der beigefarbenen Fläche (Fettverbrauch in g/h).

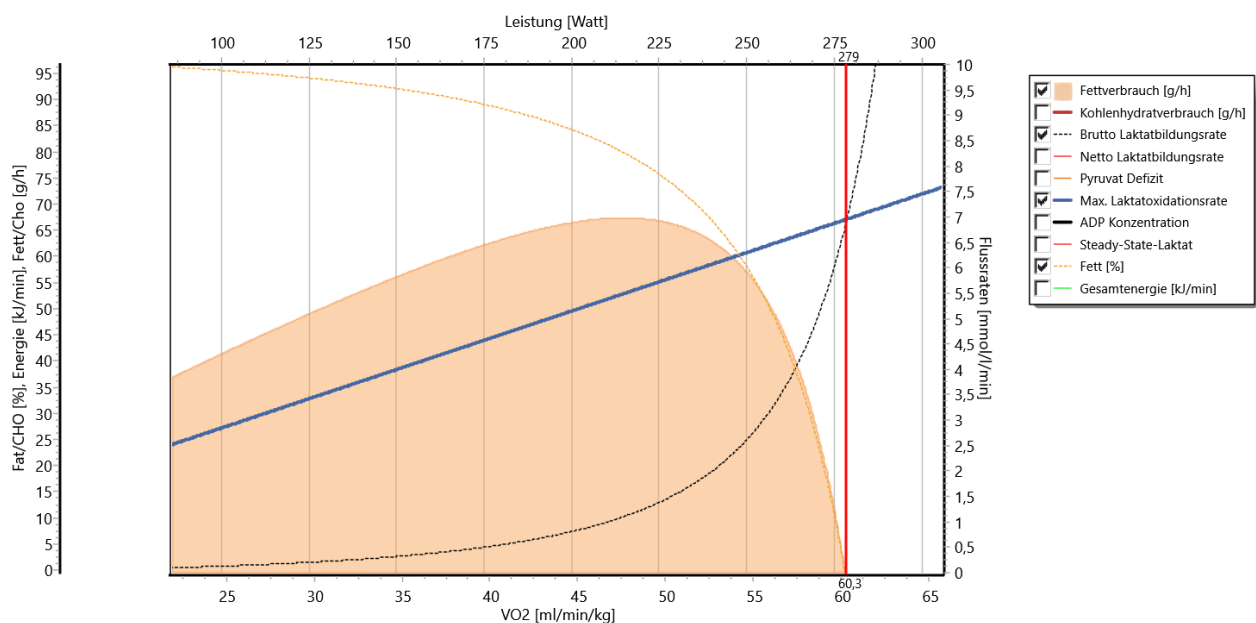


Abbildung 3 Fettstoffwechselsimulation. Dargestellt sind auszugsweise die relative (beige, gepunktet) und absolute Fettverbrennung (beige, flächig), die Bruttolaktatbildungsrate (schwarz) und -oxidationsrate (blau). Am Schnittpunkt wird der Crossing Point ausgegeben (roter Marker). Die jeweilige Leistung ist an der oberen Achse und die relative Sauerstoffaufnahme an der unteren Achse dargestellt (Quelle: Software „Metabolic Modeller“ von mesics).

Vergleich der Simulation mit gemessenen Parametern

Vergleich FTP vs. Crossing Point

Der jeweils mit dem Crossing Point zu vergleichende Parameter FTP (functional threshold power) wurde vom Trainer der Probanden bereitgestellt. Die Berechnungen des (hier verwendeten) mFTP erfolgten auf der recht weit verbreiteten Software „WK05“ von TrainingPeaks [4]. Laut Angaben des Trainers fällt der mittels „WK05“ ermittelte mFTP recht gut mit den 60 minütigen Wettkampfleistungen überein.

Die in Abbildung 4 gezeigte Korrelation zwischen Crossing Point und mFTP ist mit $r = 0,89$ ($p < 0,001$) hoch, allerdings ist auch eine hohe Standardabweichung von 10 % bzw. etwa 20 Watt vorhanden. In Extremfällen weichen Simulation und Praxis hier um etwa 50 Watt voneinander ab.

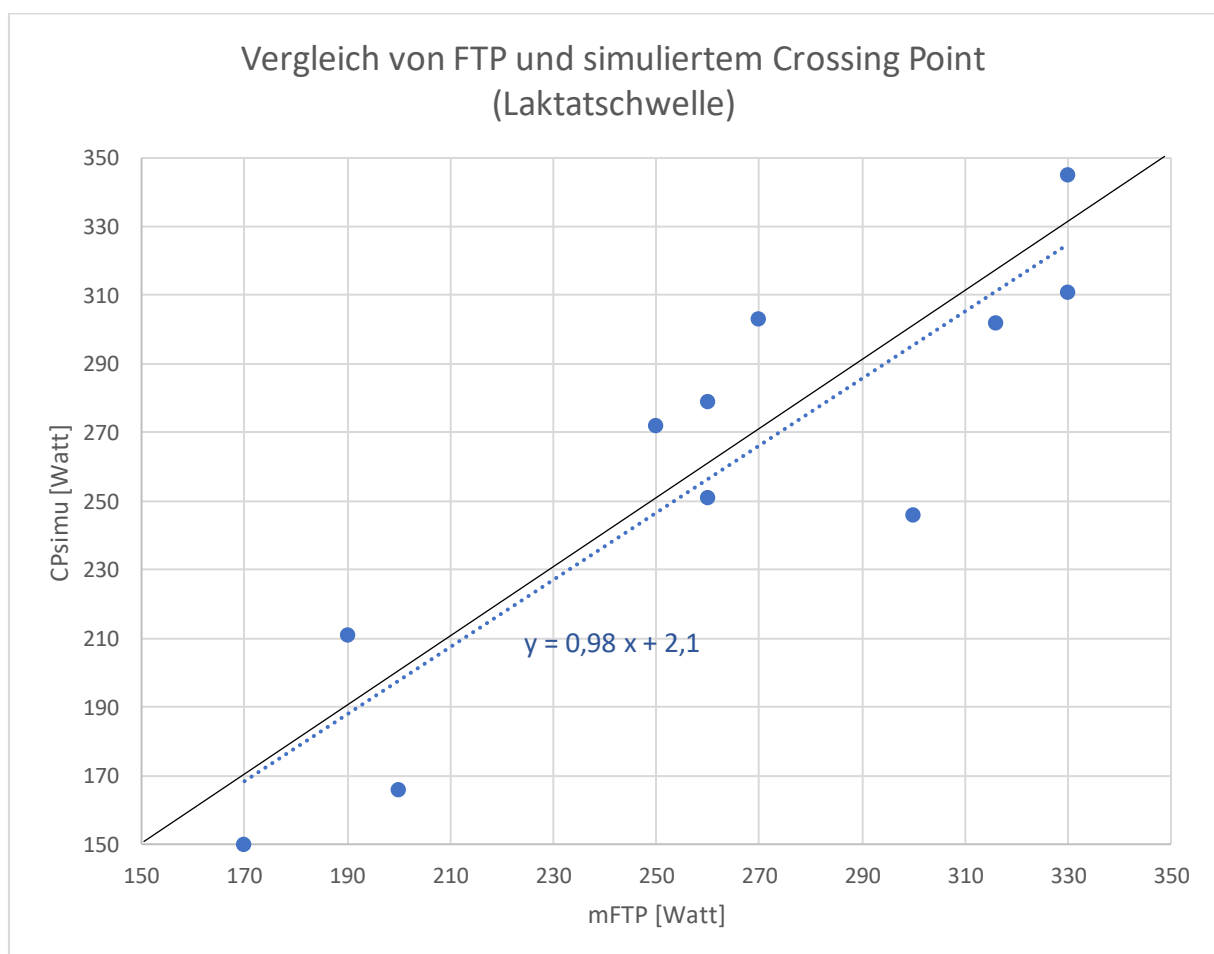


Abbildung 4 Vergleich der aus dem Training über Leistungsmessung bekannten Schwelle und des simulierten Crossing Point bei 11 Probanden (bei 3 Probanden war der FTP bis dato mangels Trainingsdaten noch nicht bekannt)

Vergleich der Leistung an der maximalen Fettverbrennung

Die in Abbildung 5 gezeigte Korrelation zwischen der Leistung am FatMax mittels Spirometrie (wie üblich aus der gemessenen respiratorischen Austauschrate RER abgeleitet) und der simulierten Leistung am FatMax ist mit $r = 0,76$ ($p = 0,00151$) zwar mäßig hoch, aber es liegt im Mittel eine Überschätzung von 8% und eine hohe Standardabweichung von 18% vor, was rund 40 Watt entspricht.

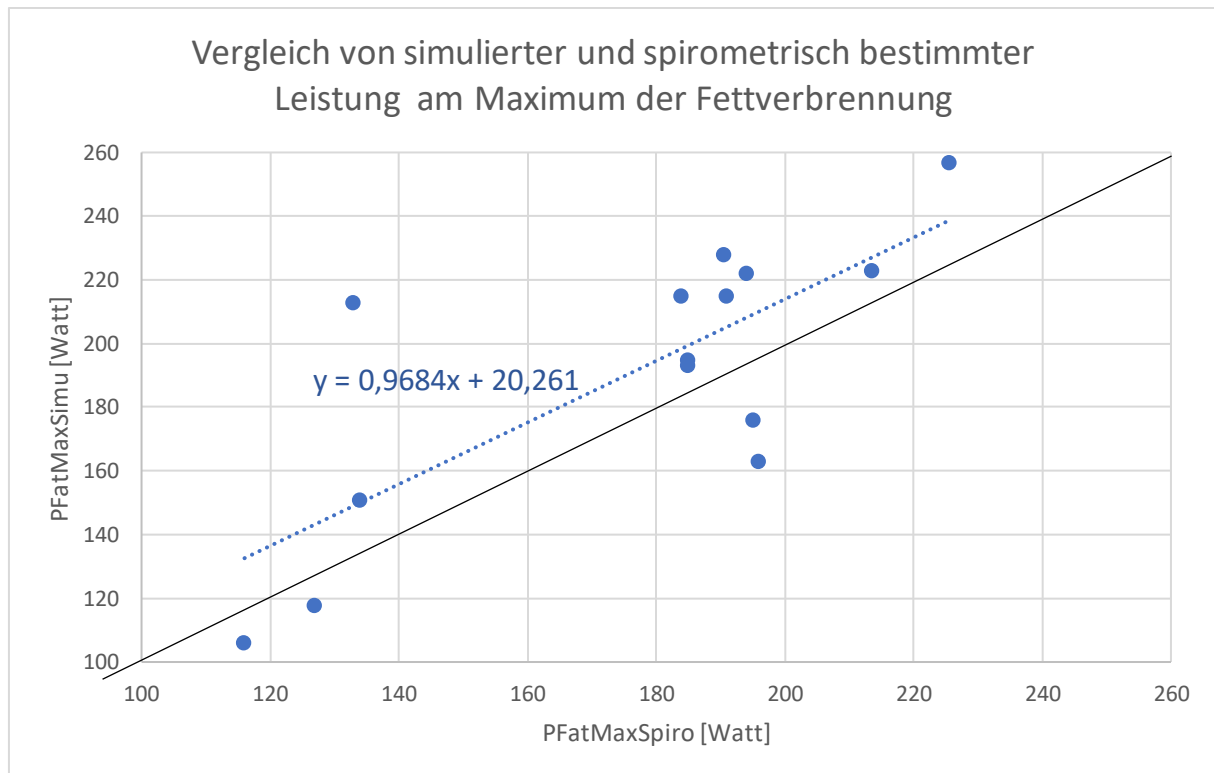


Abbildung 5 Vergleich der Leistung am Maximum der Fettverbrennung (spirometrisch gemessene und simuliert) bei 14 Probanden

Abschätzung der $\dot{V}O_2\text{max}$ aus der Endlast im Rampentest

Für die $\dot{V}O_2\text{max}$ existieren recht gute Abschätzungsformeln. In dieser Studie wurden zwei Formeln gefunden.

Im zunächst durchgeführten Rampentest wurde folgende Formel gefunden:

$$\dot{V}O_2\text{max [ml/min/kg]} = (600 + 9 * P_{\text{max}}) / \text{KG}$$

mit

P_{max} = Endlast im Rampentest in Watt

KG = Körpergewicht in Kg

Die Korrelation zwischen so geschätzter und tatsächlicher $\dot{V}O_2\text{max}$ ist mit $r = 0,95$ hochsignifikant ($p < 0,001$) in Bezug zu den hier gemessenen Probandendaten.

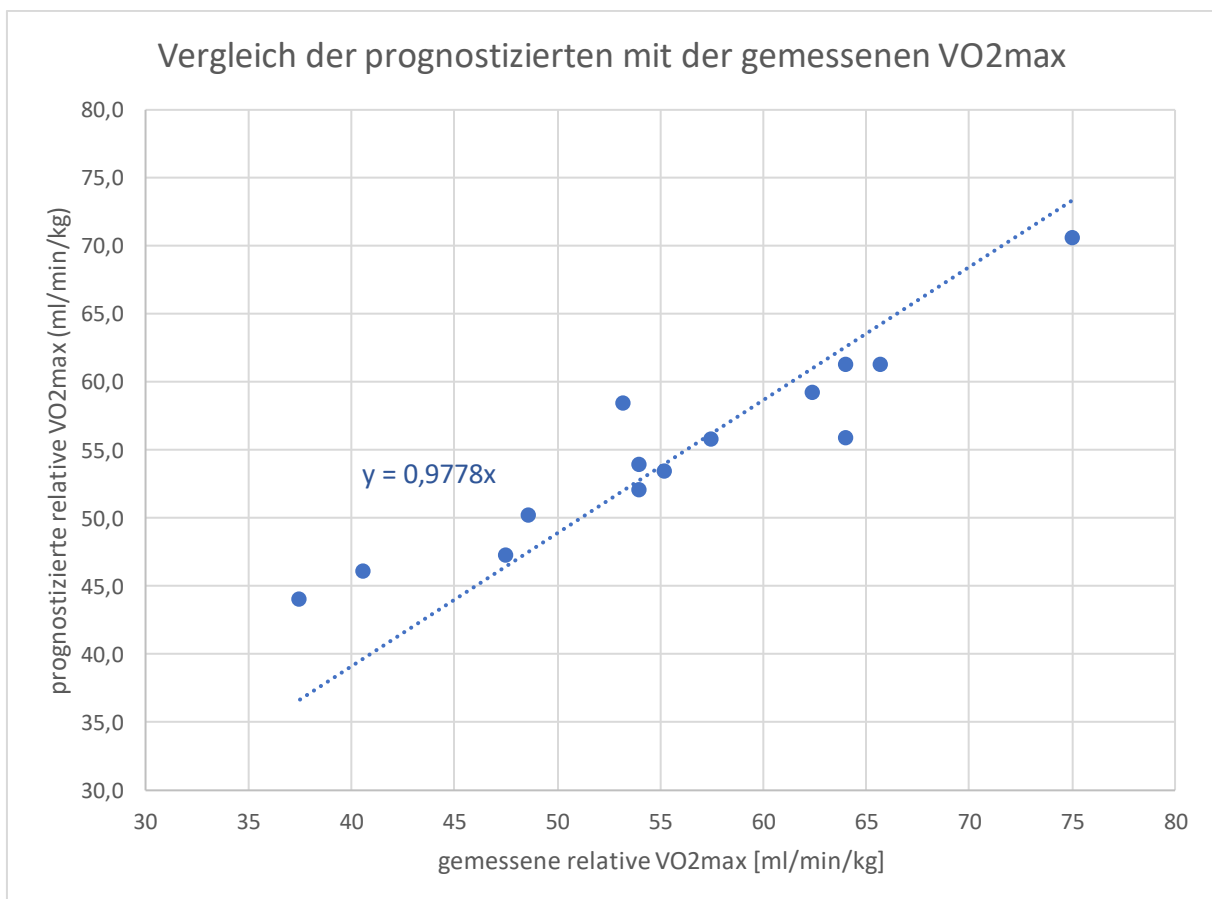


Abbildung 6 Vergleich der prognostizierten $\dot{V}O_2\text{max}$ mit der im Rampentest gemessenen $\dot{V}O_2\text{max}$. Die Korrelation ist mit $r = 0,945$ hochsignifikant

Abschätzung der $\dot{V}O_2\text{max}$ aus der mittleren Last im 4 min all-Out Test

Die meisten Teilnehmer absolvierten zudem während des Trainings einen All-Out Test über 4 min. Die mittlere Leistung vom eigenen Powermeter wurde notiert.

Die lineare Regression ergab folgenden Zusammenhang:

$$\dot{V}O_2\text{max [ml/min/kg]} = (139,69 + 11,876 * P_{4\text{avg}}) / \text{KG}$$

mit

$P_{4\text{avg}}$ = mittlere Last bei einer 4 minütigen Ausbelastung in Watt

KG = Körpergewicht in Kg

Die Korrelation zwischen $P_{4\text{avg}}$ und im Rampentest gemessener $\dot{V}O_2\text{max}$ ist mit $r = 0,95$ hochsignifikant ($p < 0,001$) in Bezug zu den hier gemessenen Probandendaten.

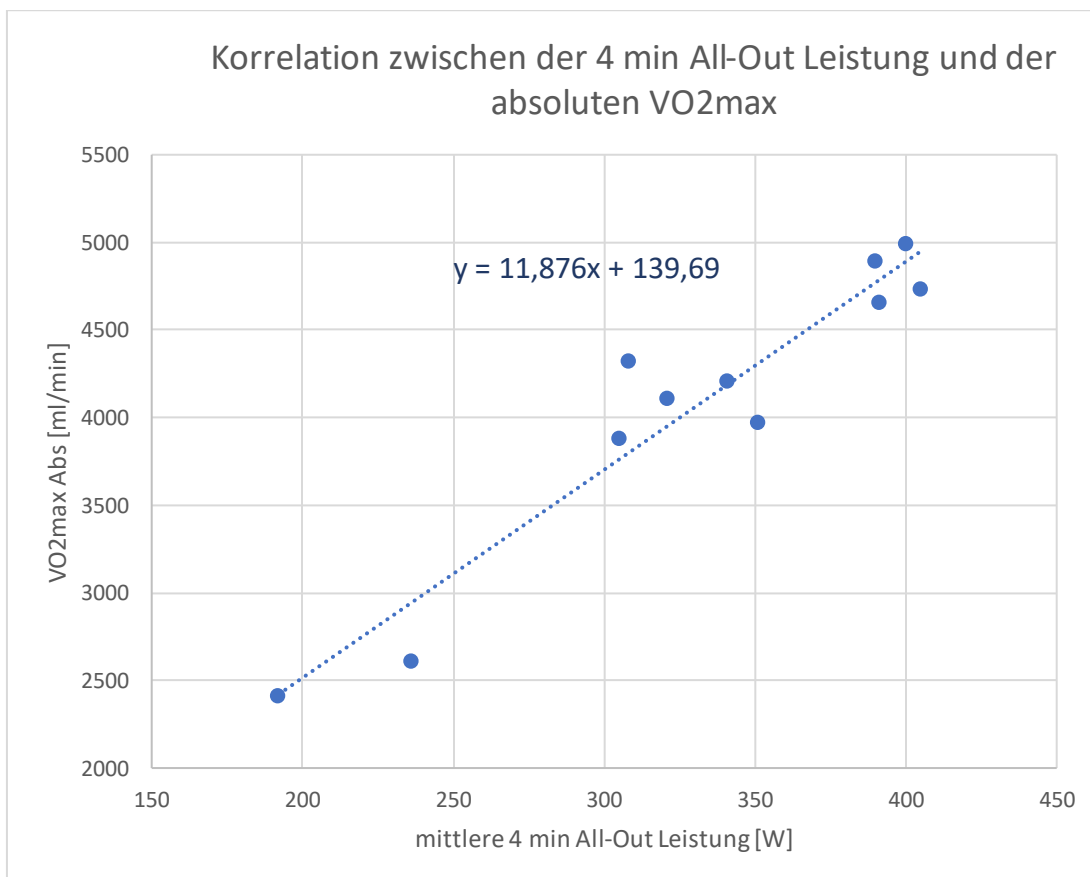


Abbildung 7 Korrelation zwischen mittlerer 4 min All-Out-Leistung und gemessener absoluter $\dot{V}O_2\text{max}$. Die Korrelation ist mit $r = 0,95$ hochsignifikant.

Ergebnisdiskussion

Die Studie sollte zeigen, wie gut die Simulation der Schwelle und der FatMax mit der Praxis übereinstimmt. In beiden Fällen ist die Korrelation recht hoch, allerdings muss im Mittel mit Abweichungen bis zu 20 Watt (Crossing Point) bzw. 40 Watt (FatMax) gerechnet werden.

Korrelationen mit anderen Parametern (hier: Geschlecht, Muskelmasse, Körperfettgehalt) auf die Ergebnisse und deren Abweichungen wurden untersucht, konnten aber nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Eine Abschätzung der $\dot{V}O_2\max$ aus der Endleistung P_{\max} im Rampentest oder auch der $P_{4_{\text{avg}}}$ im 4 minütigen All-Out-Test erscheint sehr valide möglich. Damit ist der aerobe Simulationsparameter $\dot{V}O_2\max$ auch während des Trainings gut bestimmbar.

Aussicht

Die Überprüfung des Crossing Point (bzw. des mFTP) durch den Goldstandard MaxLASS steht noch aus. Dazu soll eine zweite Studie mit denselben Probanden mittels Dauertests in naher Zukunft durchgeführt werden.

Zur Bestimmung des simulierten Crossing Point aus der $v_{L\max}$ und der $\dot{V}O_2\max$ bedarf es einen recht hohen Meßaufwand. Ziel sollte es sein, die hieraus resultierenden Parameter durch einfach im Training zu bestimmende Messmethoden zu ersetzen. Während eine Abschätzung der $\dot{V}O_2\max$ aus der erreichten Endlast im Rampentest und kürzeren All-Out-Tests wie oben gezeigt mit zu erwartenden individuellen Abweichungen nutzbar ist, erscheint eine gesicherte Abschätzung der $v_{L\max}$ aus z.B. kurzen Sprinttests ohne die Bestimmung von Erholungslaktat höchst fraglich.

Die aktuell zusammen mit Prof. Hermann Heck (im Rahmen seines in Kürze erscheinenden Buches) entwickelte Software wird mittels mehrstufiger Simulation weitere interessante Ansätze zur Simulation der Stoffwechselforgänge aufzeigen.

Literatur

[1] Mader, A: „Eine Theorie zur Berechnung der Dynamik und des Steady State von Phosphorylierungszustand und Stoffwechselaktivität der Muskelzelle als Folge des Energiebedarfs“. Habilitationsschrift der Deutschen Sporthochschule Köln, 1984

[2] Mader, A (2003)

[3] Weber, S.: „Berechnung der leistungsbestimmenden Parameter der metabolischen Aktivität auf zellulärer Ebene mittels fahrradergometrischer Untersuchungen“, Diplomarbeit, Köln 2003

[4] <https://www.trainingpeaks.com/wko5/>