

# Der Respirationsquotient, RQ

Peter Bützer

## 1 Physiologische Grundlagen und praktische Anwendung

Verhältnis von ausgeatmetem Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) zu eingeatmetem Sauerstoff (O<sub>2</sub>).

Respirationsquotient<sup>1</sup>:

$$RQ = V_{CO_2} / V_{O_2} \text{ (richtig wäre: } V_{CO_2} / V_{O_2}); (V = \text{Volumen})$$

Die Volumina VCO<sub>2</sub> und VO<sub>2</sub> sind proportional den Anzahl Molen dieser Gase (→ Gasgesetz).

VCO<sub>2</sub> entstammt unter überwiegend dem Citrat-Zyklus und steht - je nach oxidiertem Substrat - in einem stöchiometrisch festgelegten Verhältnis zur VO<sub>2</sub>.



Tabelle 1: Brennwerte der Hauptnährstoffe

Zusammensetzung des Nährstoffs	Bruttogleichung der Oxidation	Energieumsatz in kJ	physikalischer Brennwert in kJ pro Gramm	RQ-Wert
<b>Kohlenhydrate</b> (z.B. Glukose): elementare Zusammensetzung 40% C; 53% O; 7% H	1 mol C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> + 6 mol O <sub>2</sub> → 6 mol CO <sub>2</sub> + 6 mol H <sub>2</sub> O Glycogen: (C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub>	- 2826 kJ	<b>15.7 kJ Glucose</b> (Disaccharide: 16.6 kJ/g ; Polysaccharide: 17.6 kJ/g)	<b>6/6 =</b> <b>1</b>
<b>Fett</b> – hier als <b>Palmitinsäure</b> mit der elementaren Zusammensetzung: 77% C; 11% O; 12% H	1 mol C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> + 23 mol O <sub>2</sub> → 16 mol CO <sub>2</sub> + 16 mol H <sub>2</sub> O Tristearin: a C <sub>54</sub> H <sub>110</sub> O <sub>6</sub>	- 10040 kJ	<b>39.1 kJ</b> (Durchschnitt für Fette 39.8 kJ/g)	<b>16/23=</b> <b>0.7</b>
<b>Eiweiss</b> - hier als -Gly-Pro-Hypro- (Collagen) mit der elementaren Zusammensetzung: C:50.52%; H:6.71%; N:14.73%; O:28.04% <b>Mittelwert für tierisches Protein:</b> elementare Zusammensetzung 53%C; 23% O; 7% H; 16% N und 1% S; <b>Harnstoff</b>	2 C <sub>10</sub> H <sub>19</sub> N <sub>3</sub> O <sub>5</sub> + 15 O <sub>2</sub> → 12 CO <sub>2</sub> + 13 H <sub>2</sub> O + 3 CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O Proteine im Durchschnitt: C <sub>31</sub> H <sub>56</sub> N <sub>8</sub> O <sub>10</sub>	- 3 680 kJ	<b>23.9 kJ/g</b> Durchschnittlicher physiologischer Brennwert von 18.4 kJ/g Protein	<b>12/15 =</b> <b>4/5</b> <b>0.8</b>

Aus der Stöchiometrie der vollständigen Oxidation eines Substrats ergibt sich für jede Verbindung mit derselben Summenformel ein spezifischer RQ. Die vollständige Verbrennung von Kohlenhydraten liefert einen RQ von 1.00, Fette von im Mittel 0.7 (reine gesättigte CH-Verbindung: 0.66), Proteine von ca. 0.8.

Bei der physiologischen Energiegewinnung liegen jedoch in der Regel Mischverhältnisse vor, für die anhand des RQ Fett- und Kohlenhydratanteil bestimmt werden können. Der Mittelwert bei gemischter Diät liegt bei 0.82. *So ergibt sich beispielsweise für einen RQ von 0.80 ein Verhältnis von 33.4% Kohlenhydratverbrennung zu 66.6% Fettverbrennung an der Energiegewinnung.* Der Fettvorrat würden theoretisch für ca. 40 Marathonläufe ausreichen. Die alleinige Verbrennung von Eiweiss stellt jedoch ausser bei Hungerperioden bzw. Dauerbelastungen von mehr als 60 Minuten Dauer keine zu berücksichtigende Einflussgrösse dar. Eine Abschätzung des Anteils der Eiweissverbrennung am Energieumsatz ist über die Stickstoffausscheidung im Urin möglich. Die Energieinhalte von Glucose, Fetten und Proteinen lassen sich auch abschätzen. Glucose ist teiloxidiert, etwas weniger die Proteine und am wenigsten die Fette.

**VO<sub>2</sub> (z.B. in Liter pro Minute) ist direkt proportional der Leistung!!** (Leistungsmessung).

## 2 Warum ist die Atmung beim Sport so wichtig?

Sport erhöht den Sauerstoffbedarf. Untrainierte atmen bei Bewegung bis ca. 10 x mehr Luft ein. Wer viel Sauerstoff aufnehmen und diesen zu den wichtigen Organen und Muskeln transportieren kann, erhöht den Umsatz durch Oxidation und damit die Leistung.

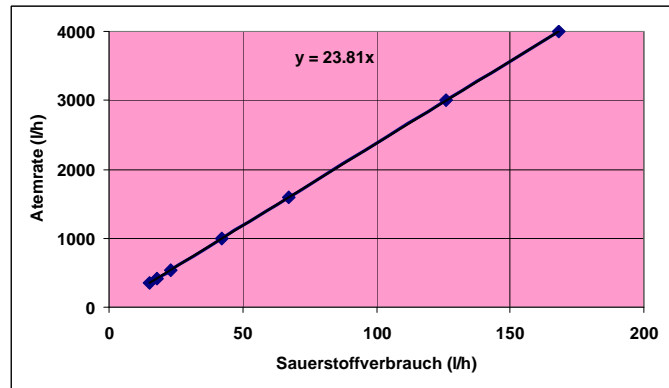
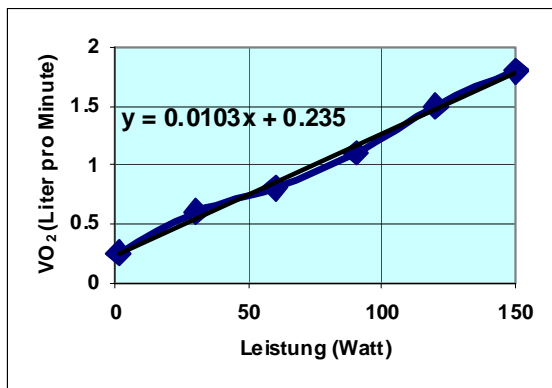


Abbildung 1: Abhängigkeit des VO<sub>2</sub> von der Leistung

Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Atemrate (Aufnahme von Luft) und Sauerstoffverbrauch beim Menschen

Während der VO<sub>2</sub>-Wert ganz entscheidend genetisch bedingt ist, kann der Sauerstofftransport im Blut durch grosse Blutvolumina und hohe Hämatokritwerte verbessert werden. Da werden legale Mittel wie Höhentraining, Unterdruckkammern, Eisen- und Vitamin B12-Präparate, aber auch illegales Doping mit eigen- und Fremdblut, EPO und EPO-Aktivatoren verwendet.

## 3 Der dynamische Übergang bei der Energiegewinnung

Die Energiegewinnung im Körper passt sich den Belastungen optimal an, indem die rasch verfügbaren Energievorräte für rasche, die langsamer verfügbaren für langdauernde Prozesse eingesetzt werden.

Tabelle 2: Energiebereitstellung im Körper

Name	Chemische Reaktion	Funktion	Belastungs-dauer (Vorrat)
<b>Direkte Energiegewinnung</b>			
	ATP → ADP+P+Energie	Abspaltung einer Phosphatgruppe und Zerfall von ATP zu ADP und Phosphat	1-4 sec.
Energiegewinnung durch Resynthese (Wiederaufbau)	KP+ADP→ ATP	(Kreatinkinase)= Auffüllung des ATP durch den Kreatinphosphatspeicher (KP)	8-10sec.
<b>Glukose</b>			
Anaerobe Glykolyse	1 mol Glukose+Enzym→ 2 mol ATP + 2 Laktat	Abbau von Glukose (Glykogen) <u>ohne</u> Sauerstoffverbrauch; Abfallprodukt:Laktat	1 ½ min
Aerobe Glykolyse	1 mol Glukose + 6 O <sub>2</sub> +Enzyme → 38mol ATP + 6 H <sub>2</sub> O + 6 CO <sub>2</sub>	Abbau von Glukose (Glykogen) <u>mit</u> Sauerstoffverbrauch; Abfallprodukt Wasser (Schweiss) und Kohlendioxyd (Atmung)	Ab 2 min bis 20-30min
<b>Fette</b>			
Lipolyse	1 mol Fettsäure + 23 O <sub>2</sub> → 129mol ATP + 16 H <sub>2</sub> O + 16 CO <sub>2</sub>	Abbau von Fettsäure mit Sauerstoffverbrauch; Abfallprodukt Wasser (Schweiss) und Kohlendioxyd (Atmung)	Ab 20-30min bis Stunden

Die Umstellung der Energiebereitstellung ist von aussen durch die abgerufene Leistung gesteuert.

Diese Leistungen sind sehr unterschiedlich und beim Menschen, ausser bei ganz kurzzeitigen Spitzen, durch die Atemraten bestimmt.

**Tabelle 3: Mittlere Atemraten für den Menschen (Atemzeitvolumen)**

Tätigkeit	Atemzeitvolumen Liter/Stunde	Atemzeitvolumen AZV Liter/Minute	Atemzeitvolumen m <sup>3</sup> /s
Liegen	300	5	0.000'083
Sitzen	400	6.7	0.000'11
Stehen	600	10	0.000'17
leichte Arbeit	1000	17	0.000'28
mittlere Arbeit	1600	27	0.000'44
schwere Arbeit	3000	50	0.000'83
schwerste Arbeit	4000	67	0.001'1

Dass zwischen der Atemrate, dem VO<sub>2</sub> und der Leistung ein Zusammenhang besteht, ist aus **Abbildung 1** und **2** ersichtlich. Typische Werte der Leistung als Energieverbrauch pro Stunde sind in der **Tabelle 4** zusammengestellt.

**Tabelle 4: Energieverbrauch des Körpers**

Tätigkeit (1 Std.)	Energieverbrauch (kJ)	entspricht
Klavierspielen	419	einem Apfel
langsames Radfahren	586	einem Glas Bier
Staubsaugen	628	zwei gekochten Eiern
schnelles Gehen	879	zwei Glas Coca-Cola
Tischtennis	1172	einem Thunfischsandwich
Treppensteigen	1340	einem Schweinskotelett
Tennis	1424	vier Scheiben Schinken
schnelles Radfahren	2093	vier Pfannkuchen mit Sirup
schnelles Schwimmen	2177	zehn Schokoladeplätzchen
Cross-country-Laufen	2470	einer halben Käsepizza

Deutsch R.M., Realities of Nutrition, Palo Alto, 1976

## 4 Simulation

Annahmen:

Es sind drei Elemente, die für die Atmung - Energiegewinnung durch Oxidation mit Sauerstoff – im Vordergrund stehen: Sauerstoff (O<sub>2</sub>), Wasserstoff (H in Verbindungen), Kohlenstoff (C in Verbindungen).

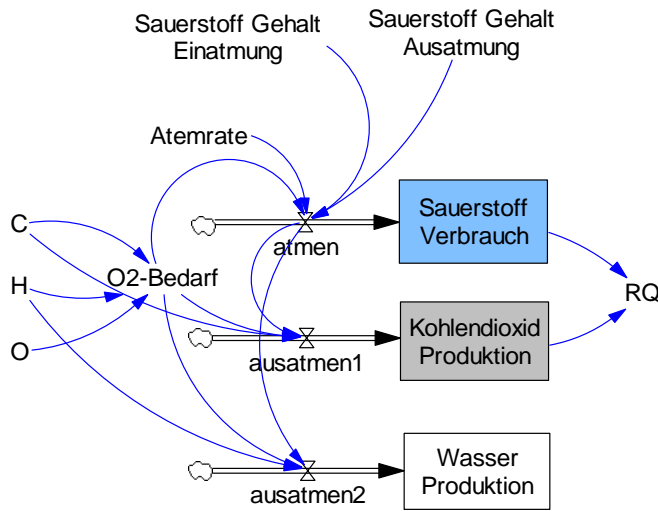


Abbildung 3: Simulationsdiagramm zur Bestimmung des Respirationsquotienten (RQ).

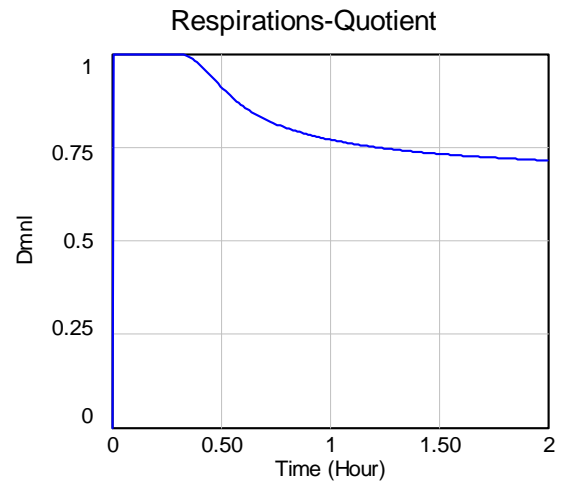


Abbildung 4: Zeitdiagramm mit der Umstellung von der Glycolyse auf die Lipolyse

Die Simulation erlaubt, den Respirationsquotienten in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung der verfügbaren Energie abzuschätzen.

Folgerungen

Mit dem Respirationsquotienten lässt sich bestimmen, welche Energiequelle für die Energiebereitstellung im betrachteten Zeitpunkt besonders wichtig ist.

Dokumentation (Gleichungen, Parameter)

- (01) Atemrate= 400  
Units: Liter/Hour [300,4000]  
Liter/Std: Liegen :300, Sitzen :400, Stehen :600, leichte Arbeit :1000, mittlere Arbeit :1600, schwere Arbeit :3000, schwerste Arbeit :4000
- (02) atmen= IF THEN ELSE(Sauerstoff Gehalt Ausatmung>=Sauerstoff Gehalt Einatmung, 0 ,Atemrate\*(Sauerstoff Gehalt Einatmung-Sauerstoff Gehalt Ausatmung ) )"O<sub>2</sub>-Bedarf"  
Units: Liter/Hour [0,?]  
konstantes Atmen wird angenommen, es kann nie mehr Sauerstoff ausgeatmet, als eingeatmet werden
- (03) ausatmen1= atmen\*C/"O<sub>2</sub>-Bedarf"  
Units: Liter/Hour [0,?]
- (04) ausatmen2= atmen\*H/2/"O<sub>2</sub>-Bedarf"  
Units: Liter/Hour [0,?]
- (05) C= 6  
Units: Dmnl [0,?,1]  
Anzahl C-Atome in der Summenformel
- (06) FINAL TIME = 2  
Units: Hour  
The final time for the simulation.
- (07) H= 12  
Units: Dmnl [0,?,1]  
Anzahl H-Atome in der Summenformel
- (08) INITIAL TIME = 0  
Units: Hour  
The initial time for the simulation.
- (09) Kohlendioxid Produktion= INTEG (ausatmen1, 0)  
Units: Liter [0,?]
- (10) O= 6-RAMP(30, 0.3 , 0.5)  
Units: Dmnl [1,?,1]  
Anzahl O-Atome in der Summenformel, Umstellung von der Glycolyse O=6 auf die Lipolyse
- (11) "O<sub>2</sub>-Bedarf"= (2\*C+H/2-O)/2  
Units: Dmnl  
Der Sauerstoff, der schon im Molekül ist, muss bei der Verbrennung mit der Atmung nicht zugeführt werden

- (12)  $RQ = \frac{\text{Kohlendioxid Produktion}}{(\text{Sauerstoff Verbrauch} + 0.0001)}$   
Units: Dmnl
- (13) Sauerstoff Gehalt Ausatmung = 0.17  
Units: Dmnl [0,?]  
Atemluft enthält noch etwa 16-17 % Sauerstoff,
- (14) Sauerstoff Gehalt Einatmung = 0.21  
Units: Dmnl [0,1]  
Der normale Sauerstoffgehalt der Luft ist 21% -> 0.21
- (15) Sauerstoff Verbrauch = INTEG ( atmen, 0)  
Units: Liter [0,?]
- (16) SAVEPER = TIME STEP  
Units: Hour [0,?]  
The frequency with which output is stored.
- (17) TIME STEP = 0.01  
Units: Hour [0,?]  
The time step for the simulation.
- (18) Wasser Produktion = INTEG (ausatmen2, 0)  
Units: Liter [0,?]