

Physikalische Leistung zur Trainings – und Wettkampfsteuerung im Radsport

***Leitfaden und Arbeitsunterlage für den Spezial - Trainerkurs
Radsport Straße/Bahn an der Sportakademie Wien 2006/2007***

Erstellt von Alfred Nimmerichter

PHYSIKALISCHE LEISTUNG ZUR TRAININGS – UND WETTKAMPFSTEUERUNG IM RADSPORT 1

*Leitfaden und Arbeitsunterlage für den Spezial - Trainerkurs Radsport Straße/Bahn an der
Sportakademie Wien 2006/2007..... 1*

1. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN..... 4

1.1. *Maßeinheiten und Größen* 4

1.2. *Rollwiderstand*..... 5

1.3. *Steigungswiderstand* 6

1.4. *Luftwiderstand*..... 8

1.5. *Leistung*..... 10

2. MOBILE LEISTUNGSMESSUNG 13

3. LEISTUNGSMESSUNG IM RADSPORT 15

3.1. *Mobile Leistungsmessung zur Trainings – und Wettkampfsteuerung*..... 20

3.2. *Analyse von Messdaten*..... 25

3.2.1. *Bildung von Mittelwerten*..... 25

3.2.2. *Häufigkeitsverteilung* 28

3.2.3. *Streuungsdiagramme oder Scatterplots*..... 30

3.2.4. *Segmentanalyse* 32

4. *Schlussfolgerungen* 39

Literaturverzeichnis 40

Vorwort

In 75% der österreichischen Haushalte befindet sich zumindest ein Fahrrad. 60% der Österreicher geben an, das Radfahren als Freizeitbeschäftigung zu betreiben (STATISTIK AUSTRIA, 2001). Von diesen etwa 4,8 Millionen Freizeitradlern sind knapp 42 Tausend als Mitglieder in 386 Sportvereinen organisiert (BUNDESSPORT ORGANISATION, Stand 01.01.2006). Und davon sind etwa 2000 als Lizenzfahrer in den diversen Kategorien des österreichischen Radsportverbandes an diversen Wettkämpfen beteiligt (ÖRV, Stand 18.08.2006).

Wie unterschiedlich die Ziele, Beweggründe und physischen Voraussetzungen der verschiedenen Gruppen auch sein mögen, eines ist ihnen allen gleich: um auf ihrem Fahrrad voranzukommen müssen sie physikalische Leistung erbringen! Die Gesetze der Physik kennen dabei keinen Unterschied zwischen Mann oder Frau und jung oder alt.

Dieses Skriptum soll die Einflussgrößen auf die Leistung darstellen, sowie deren Wertigkeit und Umsetzung in der Trainingspraxis zeigen...

1. Physikalische Grundlagen

Arbeit, Leistung, Kraft, Energie, Drehmoment...all diese Begriffe sind seit der Schulzeit in unseren Köpfen verankert. Deren Bedeutung ist jedoch nicht mehr ganz so klar, was auch verständlich ist wenn man nicht permanent oder zumindest gelegentlich mit der Materie beschäftigt ist. Die Kommentare bei Radsportübertragungen im Fernsehen, verstärken die Konfusion mit Aussagen wie: „...Kraftersparnis...“, „...er muss weniger arbeiten...“, „...seine Herzfrequenz ist schon bei 170...“, um nur einige zu nennen.

Dieser erste Abschnitt soll daher zur wieder Auffrischung der grundlegenden physikalischen Kenntnisse dienen und einen Überblick für die Radsport – und vor allem Leistungsrelevanten Kenngrößen verschaffen.

1.1. Maßeinheiten und Größen

Physikalische Größen sind seit 1954 im Internationalen Einheitensystem (SI Einheiten) festgelegt und definiert. Es besteht aus sieben Basiseinheiten und aus einer Vielzahl von daraus abgeleiteten Größen. Die Tabelle 1 und Tabelle 2 geben einen Überblick über relevante Größen.

Größe	Name	Formelzeichen	Einheitenzeichen
Länge	Meter	l	m
Masse	Kilogramm	m	kg
Zeit	Sekunde	t	s

Tabelle 1: Basiseinheiten des SI Systems

Größe	Name	Formelzeichen	Einheitenzeichen
Kraft	Newton	F	N
Energie, Arbeit	Joule	E, W	J
Leistung	Watt	P	W
Drehmoment	-	M	Nm
Beschleunigung	-	a	m/s^2
Geschwindigkeit	-	v	m/s

Tabelle 2: Abgeleitete Einheiten des SI Systems

Die beim Radfahren auftretenden Kräfte können, als zwei sich entgegen gesetzte Kräfte beschrieben werden. Es sind dies einerseits die der Vorwärtsbewegung entgegen wirkenden Kräfte (F_{total}) und die Vortriebswirksamen Kräfte (F_p). Die Vortriebswirksame Kraft muss, mit wenigen Ausnahmen (Bergabfahren, Rückenwind), von der Muskulatur entwickelt und auf das Rad übertragen werden. Die der Vorwärtsbewegung entgegen wirkenden Kräfte können folgendermaßen beschrieben werden:

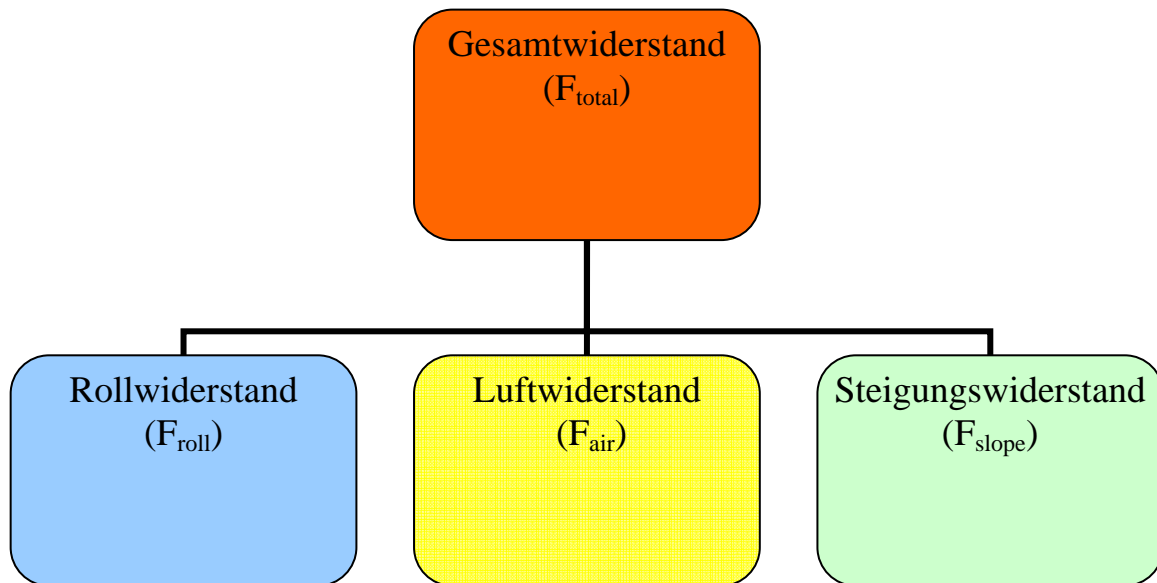


Abbildung 1: zu überwindende Kräfte

Schließt man die zusätzlichen Kräfte durch Beschleunigung aus und nimmt an das der Reibungswiderstand des Antriebes (Tretlager, Pedal, Nabe, Kette, Schaltung) etwa 3% - 5% (Antriebseffizienz (DT_{eff}) = 95% - 97%) beträgt¹, dann gilt

$$F_{\text{total}} = F_{\text{roll}} + F_{\text{air}} + F_{\text{slope}} / DT_{\text{eff}}$$

Formel 1

In Abhängigkeit des Widerstandes haben weitere externe Faktoren wie Systemgewicht (Fahrer + Ausrüstung + Rad), Windverhältnisse, Position auf dem Rad, Steigungswinkel, Meereshöhe und Temperatur Einfluss auf deren Größe.

1.2. Rollwiderstand

F_{roll} ist Abhängig von der Masse des Systems (m_{tot}) und dem Rollreibungskoeffizienten (C_r). Den größten Einfluss auf C_r haben der Reifendruck und die Beschaffenheit des Untergrundes. Dabei nimmt mit zunehmendem Reifendruck von 150 auf 600 kPa (1,5 – 6 bar) C_r um 62% und zwischen 600 und 1200 kPa (6 – 12 bar) um 24% ab². Je größer m_{tot} ist, umso mehr Kraft wirkt vertikal auf die Laufräder und erhöht damit C_r . Wird m_{tot} von 76 auf 91kg erhöht, nimmt C_r um 12% zu².

Die Größe des Laufrades, das Material des Reifens und die Temperatur beeinflussen ebenfalls, jedoch in geringerem Ausmaß C_r ^{3, 4}. Entsprechend dem Physikalischen Gesetz

$$\text{Kraft (N)} = \text{Masse (kg)} \times \text{Beschleunigung (m/s}^2\text{)}$$

kann F_{roll} daher folgendermaßen beschrieben werden

$$F_{\text{roll}} = m_{\text{tot}} \times g \times C_r$$

Formel 2

(g = Erdbeschleunigungskraft 9,81m/s²)

Fährt eine Person mit einem Körpergewicht von 70kg auf einem Rennrad das 8kg wiegt, das Gewicht von zusätzlicher Ausrüstung legen wir mit 2kg fest, und der Reifendruck beträgt 6 bar so kann F_{roll} entsprechend berechnet werden

$$F_{\text{roll}} = 80 \times 9,81 \times 0,008 = \underline{6,3 \text{ N}}$$

Es spielt dabei keine Rolle ob mit einer Geschwindigkeit von 10 km/h oder 40 km/h gefahren wird. F_{roll} ist unabhängig von der Geschwindigkeit. Tabelle 3 gibt einen Überblick über verschiedene Rollreibungskoeffizienten.

Bodenbeschaffenheit	C_r
Holzbahn	0,0025
Feine Teerstraße	0,0040
Normale Asphaltstraße	0,0080
Grobe Asphaltstraße	0,0085
Kopfsteinpflaster	0,0092

Tabelle 3: C_r von Rennrädern 27'', Reifendruck 6 bar

1.3. Steigungswiderstand

Ebenso wie bei F_{roll} ist auch bei F_{slope} die Masse von entscheidender Bedeutung. Jeder Radfahrer trachtet danach, möglichst leichtes Material zu verwenden, wenn der Steigungswinkel der Straße ansteigt. Beim Bergauf fahren müssen wir also den Steigungswiderstand oder genauer die Hangabtriebskraft überwinden. Die Steilheit eines Anstieges wird zumeist in Prozentwerten angegeben. Eine Steigung von 10% bedeutet, dass 10 Höhenmeter auf einer horizontalen Distanz von 100 Meter überwunden werden müssen. Dabei wird, nach den Regeln der Trigonometrie, das Seitenverhältnis a/b im rechtwinkligen Dreieck berechnet.

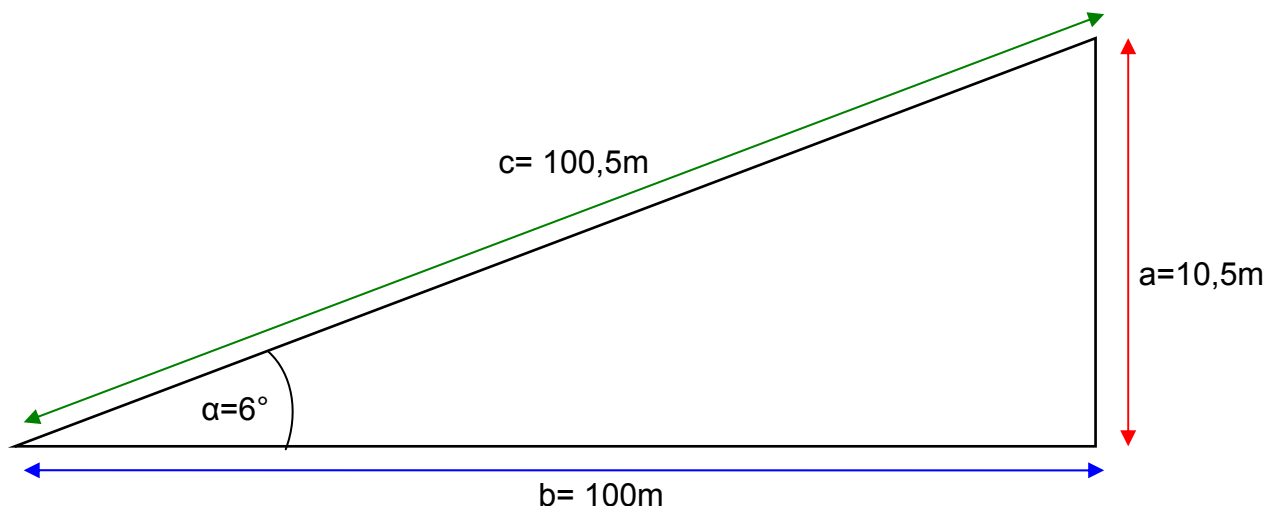


Abbildung 2: Größen im rechtwinkligen Dreieck zur Berechnung des Steigungswiderstandes

- α = Steigungswinkel
- a = zurückgelegte Höhenmeter (Gegenkathete α)
- b = horizontale Distanz (Ankathete α)
- c = zurückgelegte Distanz (Hypotenuse)

Wie erwähnt erfolgt die Prozentangabe der Steigung als Verhältnis a/b (Tangens α), oder genauer

$$\text{Steigungsprozent} = \text{Tangens } \alpha \times 100$$

Da die zurückgelegte Strecke (c) geringfügig größer als die horizontale Distanz ist, ($b/c = \text{Cosinus } \alpha < 1$) wird zur Berechnung des Steigungswiderstandes das Verhältnis a/c (Sinus α) verwendet. Da im Radsport selten Steigungen von mehr als 12° zu bewältigen sind, können wir zur einfacheren Berechnung des Steigungswiderstandes davon ausgehen, dass die Steigungsprozent / 100 gleich Sinus α sind⁵.

$$\text{Sinus } \alpha \sim \text{Tangens } \alpha \sim \text{Steigungsprozent} / 100$$

In Tabelle 4 sind die vernachlässigbaren Unterschiede zwischen Tangens α und Sinus α dargestellt.

Steigungswinkel ($^\circ$)	Tangens α	Sinus α	Cosinus α
2	0,03492	0,03489	0,999
4	0,06993	0,06976	0,997
6	0,10510	0,10453	0,995
8	0,14054	0,13917	0,990
10	0,17633	0,17365	0,984
12	0,21256	0,20791	0,978

Tabelle 4: Tangens $\alpha \sim$ Sinus α

Somit kann für die Berechnung von F_{slope} folgende Formel definiert werden

$$F_{\text{slope}} = m_{\text{tot}} \times g \times \sin \alpha \quad \text{Formel 3}$$

Möchte also unser Radfahrer mit einem Gesamtgewicht von 80kg einen Steigungswinkel von 6° oder 10,5% bewältigen können wir die ihm entgegenwirkende Hangabtriebskraft berechnen

$$F_{\text{slope}} = 80 \times 9,81 \times 0,105 = \underline{82,4 \text{ N}}$$

Ebenso wie für F_{roll} gilt auch für F_{slope} , dass dieser unabhängig von der Geschwindigkeit ist.

1.4. Luftwiderstand

Anders als beim Luftwiderstand (F_{air}). Die Überwindung von F_{air} stellt die wesentliche Anforderung bei Geschwindigkeiten über 15 km/h in der Ebene dar. Dabei wirkt sich eine Erhöhung der Geschwindigkeit nicht linear sondern quadratisch auf F_{air} aus. Das heißt eine Verdoppelung der Geschwindigkeit bewirkt einen vierfach erhöhten F_{air} . Bei Geschwindigkeiten über 40 km/h entfallen 80% - 90% von F_{total} auf F_{air} ^{6,7}. Die wesentlichen Einflussgrößen stellen der Strömungskoeffizient (C_d), der abhängig von der Form des Objektes ist und die frontale Windangriffsfläche (A_p), die abhängig von der Position des Fahrers auf dem Rad ist, dar. Verwendete C_d 's im Radsport liegen im Bereich 0,6 – 0,9. A_p 's sind, zur Vereinfachung, ebenfalls meist abgeleitete Größen aus der Körperoberfläche (BSA) nach Du BOIS^{8,9}.

$$BSA (m^2) = 0,007184 \times (\text{Körpergewicht (kg)})^{0,425} \times (\text{Körpergröße (cm)})^{0,725}$$

$$A_p = BSA \times 0,185$$

Auf die zugrunde liegenden Messverfahren kann im Rahmen dieser Unterlage nicht eingegangen werden, es wird auf die Fachliteratur verwiesen^{3,4,6,7,10,11}. Tabelle 5 gibt einen Überblick über abgeleitete C_d 's.

Position	C^d
Oberlenker	0,9
Bremsgriff	0,8
Unterlenker	0,75
Triathlonlenker	0,65
Aeroposition	0,59

Tabelle 5: Strömungskoeffizienten in Abhängigkeit der Position auf dem Rad

Weiters können die Luftdichte (ρ) und natürlich die Geschwindigkeit als beeinflussende Faktoren auf F_{air} definiert werden.

Die Luftdichte nimmt mit zunehmender Temperatur und mit sinkendem Luftdruck ab. Das heißt, das F_{air} kleiner wird wenn es wärmer ist und wir in größerer Meereshöhe Radfahren. Die geringere Luftdichte erklärt, warum viele Rekordversuche in solch großen Höhen erfolgreich absolviert werden. In Mexico City (2200m) beträgt die Luftdichte bei einer Temperatur von 20° Celsius nur 75% der Luftdichte auf Meereshöhe. Allerdings sind dem Versuch F_{air} zu reduzieren Grenzen gesetzt, da mit zunehmender Höhe die Ausdauerleistungsfähigkeit sinkt. In einer Meereshöhe von 2500m fällt die maximale Sauerstoffaufnahme um etwa 10% - 15% ab¹².

		Temperatur (° Celsius)												
		-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Seehöhe (m)	0	1,342	1,317	1,293	1,270	1,247	1,226	1,205	1,185	1,165	1,146	1,128	1,110	1,093
	200	1,309	1,284	1,261	1,238	1,216	1,195	1,175	1,155	1,136	1,117	1,099	1,082	1,065
	400	1,276	1,252	1,229	1,207	1,186	1,165	1,145	1,126	1,107	1,089	1,072	1,055	1,039
	600	1,244	1,220	1,198	1,177	1,156	1,136	1,116	1,098	1,080	1,062	1,045	1,029	1,013
	800	1,212	1,190	1,168	1,147	1,127	1,107	1,088	1,070	1,052	1,035	1,019	1,003	0,987
	1000	1,182	1,160	1,139	1,118	1,099	1,079	1,061	1,043	1,026	1,009	0,993	0,978	0,963
	1200	1,152	1,131	1,110	1,090	1,071	1,052	1,034	1,017	1,000	0,984	0,968	0,953	0,938
	1400	1,124	1,103	1,082	1,063	1,044	1,026	1,009	0,992	0,975	0,959	0,944	0,929	0,915
	1600	1,095	1,075	1,055	1,036	1,018	1,000	0,983	0,967	0,951	0,935	0,920	0,906	0,892
	1800	1,068	1,048	1,029	1,010	0,992	0,975	0,959	0,942	0,927	0,912	0,897	0,883	0,870
	2000	1,041	1,022	1,003	0,985	0,968	0,951	0,935	0,919	0,904	0,889	0,875	0,861	0,848
	2200	1,015	0,996	0,978	0,960	0,943	0,927	0,911	0,896	0,881	0,867	0,853	0,839	0,826
	2400	0,990	0,971	0,953	0,936	0,920	0,904	0,888	0,873	0,859	0,845	0,831	0,818	0,806
	2600	0,965	0,947	0,929	0,913	0,897	0,881	0,866	0,851	0,837	0,824	0,811	0,798	0,786
	2800	0,941	0,923	0,906	0,890	0,874	0,859	0,844	0,830	0,816	0,803	0,790	0,778	0,766
3000	0,917	0,900	0,883	0,867	0,852	0,837	0,823	0,809	0,796	0,783	0,770	0,758	0,747	

Tabelle 6: Luftdichte (kg/m³) in Abhängigkeit von Temperatur und Seehöhe

Wie bereits erwähnt steigt F_{air} mit dem Quadrat der Geschwindigkeit (in m/s). Hier ist zu beachten, dass es sich um die gesamte Windgeschwindigkeit handelt, also der Summe aus der Fahrgeschwindigkeit und der eventuell auftretenden Windgeschwindigkeit. Dabei wird Rückenwind mit einem negativen Vorzeichen versehen, weil er natürlich F_{air} bei konstanter Fahrgeschwindigkeit reduziert.

Somit kann F_{air} definiert werden als

$$F_{\text{air}} = 0,5 \times \rho \times C_d \times A_p \times V^2 \quad \text{Formel 4}$$

Berechnen wir für den Musterradfahrer mit 70kg Körpergewicht und einer Größe von 180cm, F_{air} bei einer Geschwindigkeit von 30km/h, windstille einer Temperatur von 20° Celsius auf Meereshöhe und in Bremsgriffposition, können folgende Variablen eingesetzt werden

$$F_{\text{air}} = 0,5 \times 1,205 \times 0,8 \times 0,3395 \times 8,33^2 = \underline{11,4\text{N}}$$

Abbildung 3 zeigt die Auswirkung von Positionsänderungen auf F_{air} .

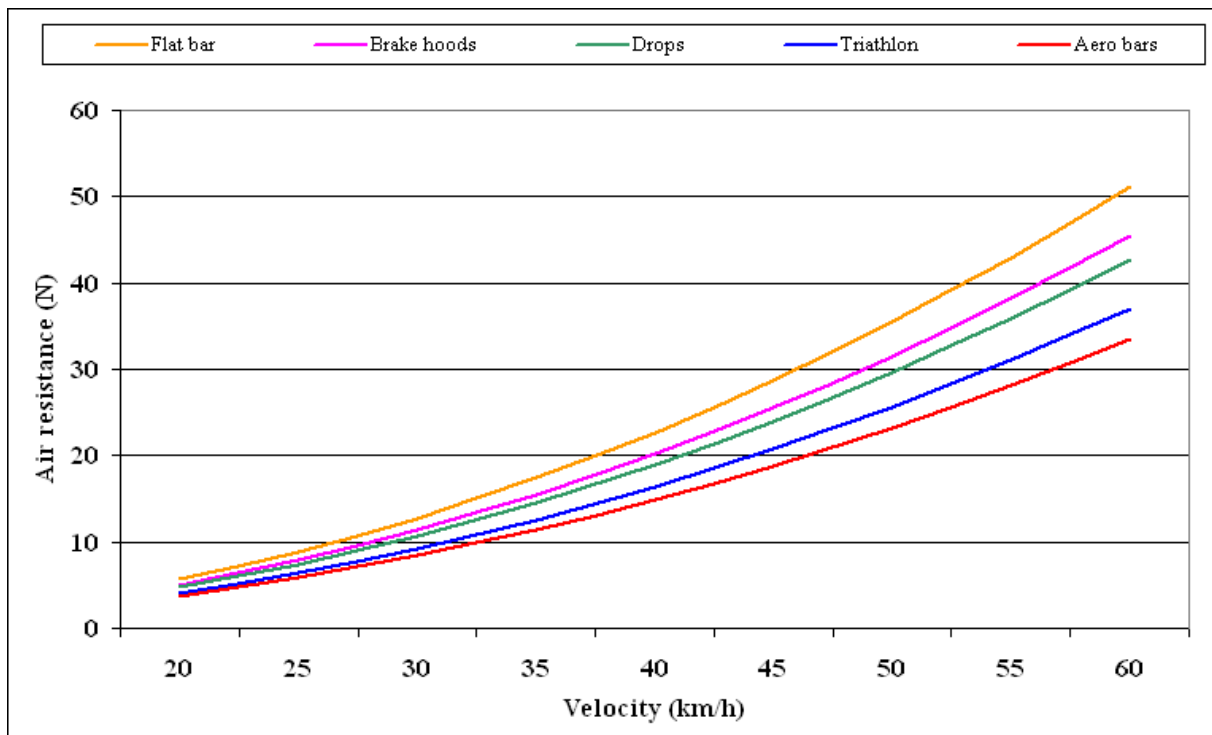


Abbildung 3: F_{air} bei unterschiedlichen Positionen und Geschwindigkeiten

Nachdem nun alle Kräfte bekannt sind die der Vorwärtsbewegung entgegenwirken, kann in Bezug auf Formel 1 F_{total} berechnet werden

$$F_{\text{total}} = 6,3 + 11,4 = \underline{17,7\text{N}} \quad (\text{w.o. ohne Steigung})$$

$$F_{\text{total}} = 6,3 + 5,04 + 82,4 = \underline{93,7\text{N}} \quad (\text{w.o. mit Steigung; } 20\text{km/h})$$

Die mechanischen Reibungsverluste des Antriebes sind dabei außer Acht gelassen.

1.5. Leistung

Da jetzt die entsprechenden Kräfte beschrieben wurden, kann nun sehr einfach auch die Leistung berechnet werden.

$$P_{\text{total}} (\text{Watt}) = F_{\text{total}} (\text{N}) \times V (\text{m/s}) \quad \text{Formel 5}$$

Wenn die aufzubringende Leistung für den Rollwiderstand (P_{roll}), den Steigungswiderstand (P_{slope}) und den Luftwiderstand (P_{air}) separat ermittelt werden soll gilt

$$P_{\text{total}} = (F_{\text{roll}} \times V) + (F_{\text{air}} \times V) + (F_{\text{slope}} \times V) \quad \text{Formel 6}$$

Erweitern wir die Beispiele des vorigen Abschnittes nun um den Faktor Geschwindigkeit.

$$P_{\text{total}} = 17,7 \times 8,33 = \underline{147W} \quad (\text{ohne Steigung; } 30\text{km/h})$$

$$P_{\text{total}} = 93,7 \times 5,55 = \underline{520W} \quad (\text{mit Steigung; } 20\text{km/h})$$

oder

$$P_{\text{total}} = (6,3 \times 8,33) + (11,4 \times 8,33) = \underline{147W}$$

$$P_{\text{total}} = (6,3 \times 5,55) + (5,04 \times 5,55) + (82,4 \times 5,55) = \underline{520W}$$

Wie in der Formel 6 ersichtlich ist, steigen P_{roll} und P_{slope} proportional mit zunehmender Geschwindigkeit. Wird diese verdoppelt, steigt, bei sonst gleichen Bedingungen, auch die benötigte Leistung auf das zweifache.

P_{air} steigt jedoch mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit. Soll die Geschwindigkeit verdoppelt werden, muss die achtfache Leistung erbracht werden.

$$P_{\text{air}} = V^3$$

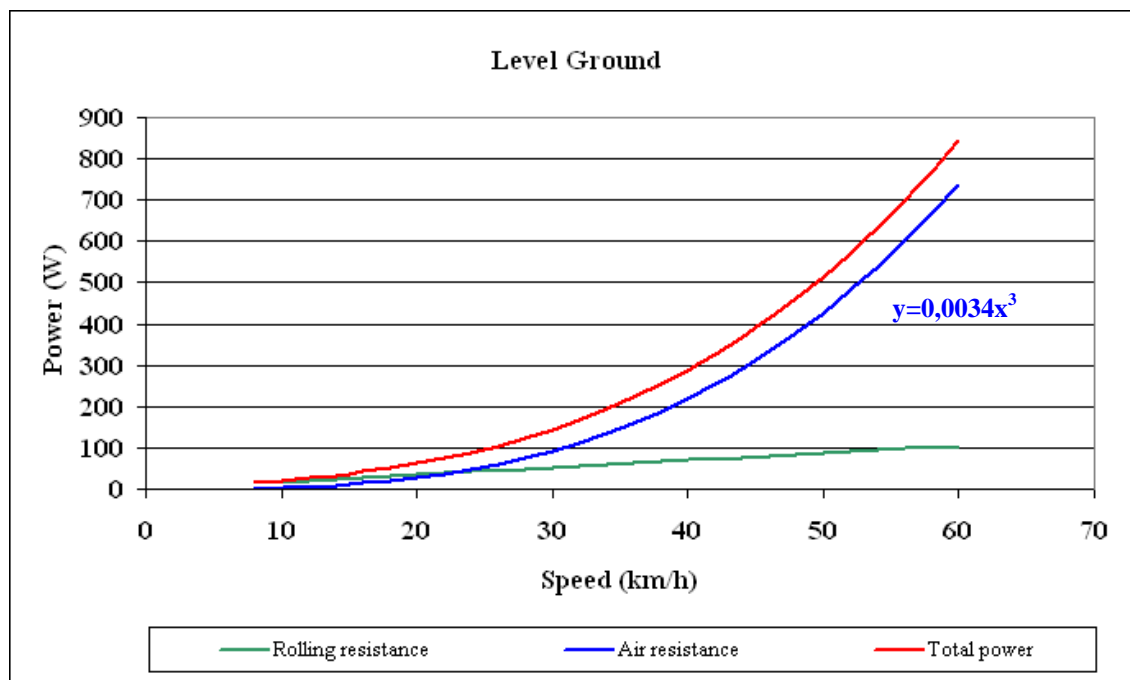


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen P_{air} , P_{roll} und P_{total} mit der Geschwindigkeit in der Ebene (Berechnungsgrundlagen der Daten in den Kapiteln 1.2 – 1.4)

Abbildung 4 stellt die zunehmende Leistungsanforderung bei Erhöhung der Geschwindigkeit dar. Deutlich sichtbar sind der gleichmäßige Anstieg von P_{roll} und das exponentielle Ansteigen von P_{air} . Abbildung 5 macht deutlich, dass mit steigender Geschwindigkeit der Anteil an P_{air} deutlich zunimmt. Bei üblichen

Geschwindigkeiten im Radsport von über 40km/h, müssen 80 – 90% der Leistung zur Überwindung von P_{air} aufgebracht werden.

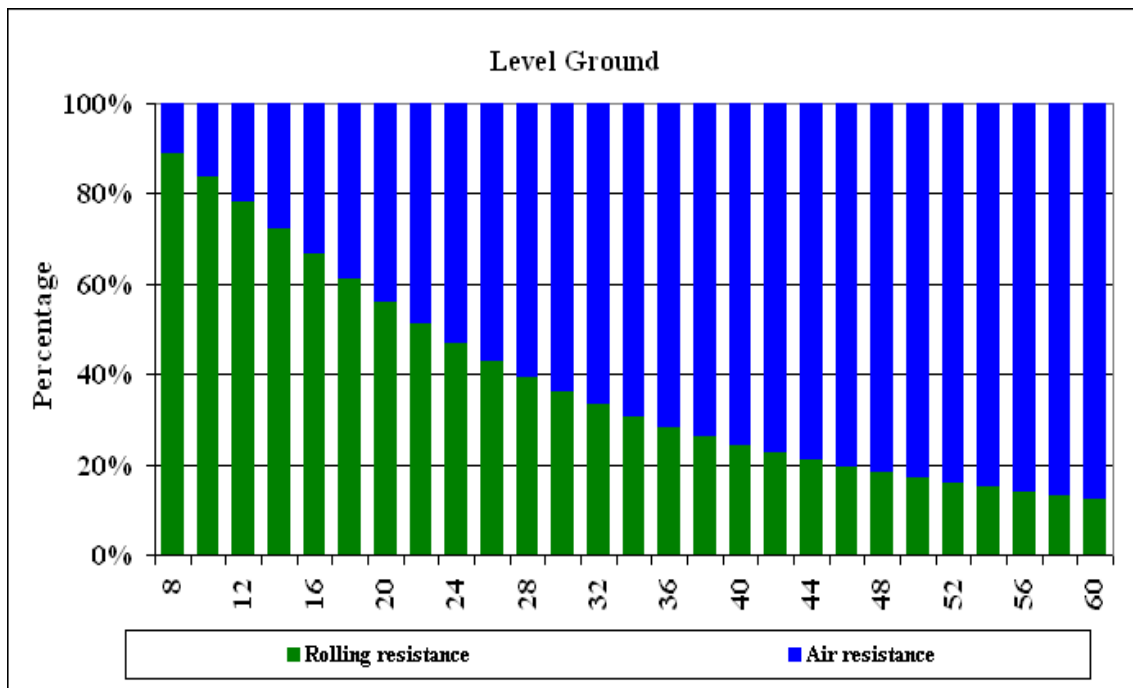


Abbildung 5: Anteile von P_{air} und P_{roll} an P_{total} in der Ebene. (Berechnungsgrundlagen der Daten in den Kapiteln 1.2 – 1.4)

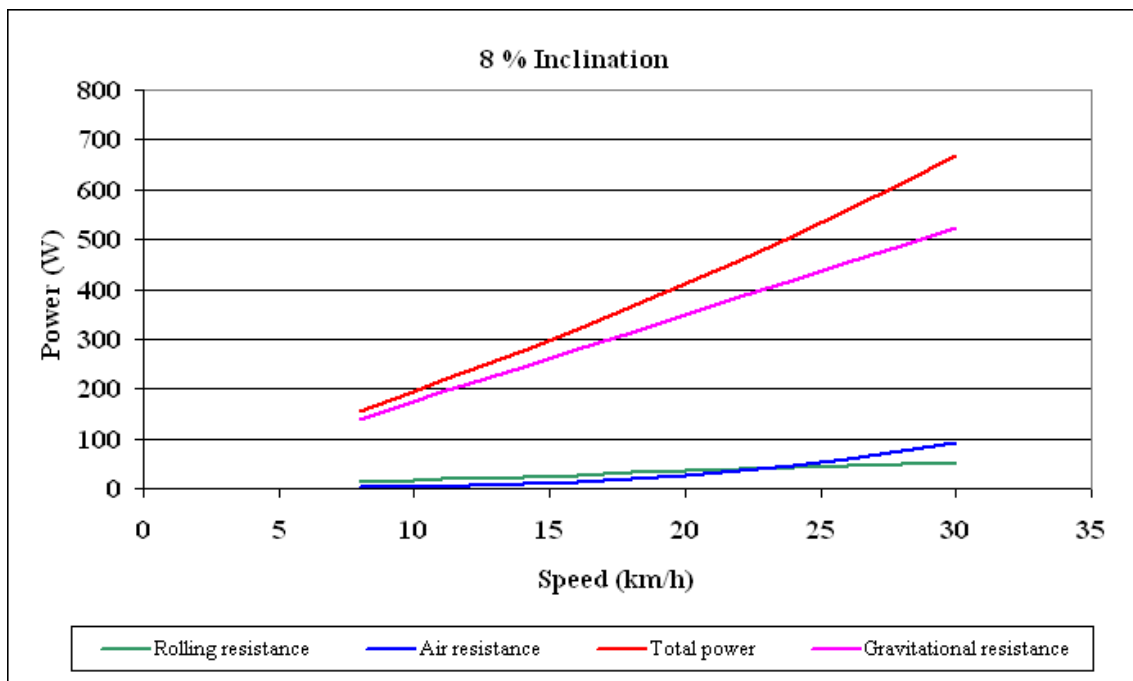


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen P_{air} , P_{roll} , P_{slope} und P_{total} mit der Geschwindigkeit bei 8% Steigung (Berechnungsgrundlagen der Daten in den Kapiteln 1.2 – 1.4)

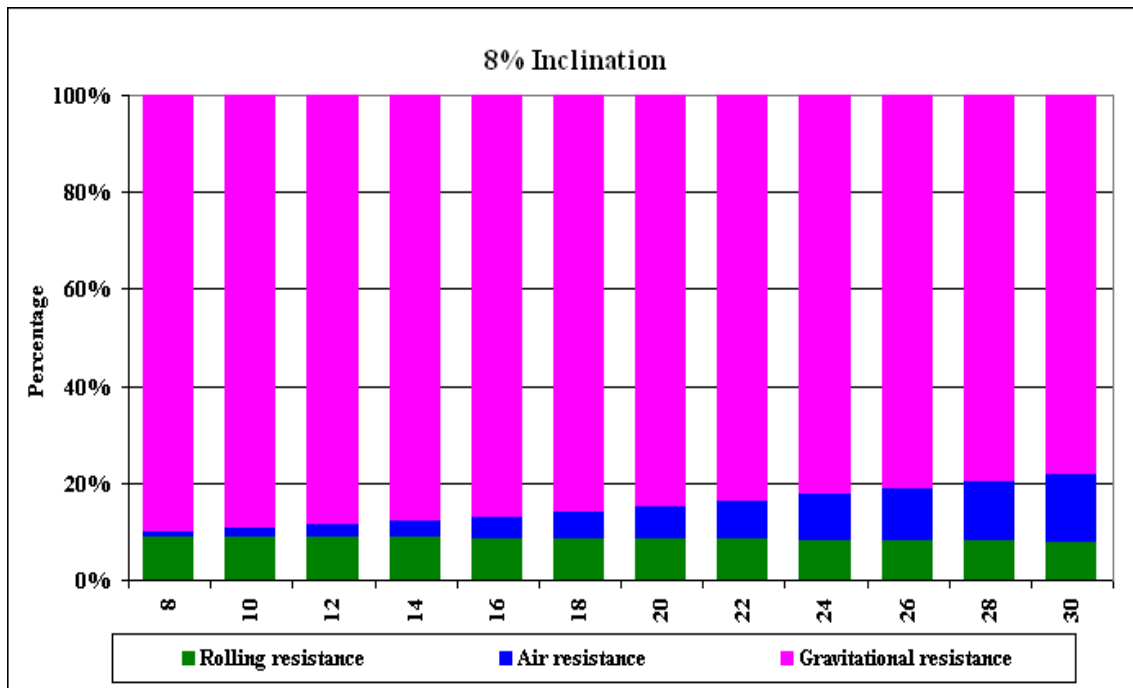


Abbildung 7: Anteile von P_{air} , P_{roll} und P_{slope} an P_{total} bei 8% Steigung. (Berechnungsgrundlagen der Daten in den Kapiteln 1.2 – 1.4)

Wie Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen, muss in Steigungen (hier 8%) ein Großteil der Leistung zur Überwindung der Hangabtriebskraft, erbracht werden.

2. Mobile Leistungsmessung

Wie in Abschnitt 1.1 erwähnt, muss die vortriebswirksame Kraft (F_p), die zur Überwindung der Summe aller bremsenden Kräfte nötig ist, vom Sportler auf das Antriebssystem des Fahrrades übertragen werden. Diese Übertragung erfolgt über die Kurbeln, die Tretlagerachse und schließlich mit Hilfe der Kette an das Hinterrad, wodurch es zur Vorwärtsbewegung des Rades kommt.

Seit Ende der 80er Jahre ist es möglich, die Leistung direkt am Fahrrad zu messen. Möglich wird das durch den Einsatz von Dehnmessstreifen (DMS). Es sind dies technische Bauteile, die die Verformung von Materialien, die aufgrund von Krafteinwirkung verursacht sind, registrieren. Bei Rotationsbewegungen wirkt die Kraft (F) entlang eines Hebelarmes (r) und wird als Drehmoment (M) bezeichnet. Beim Radfahren erfolgt die Kraftübertragung über die Kurbel. Es wird somit ein Drehmoment erzeugt.

$$\text{Drehmoment (Nm)} = \text{Kraft (N)} \times \text{Hebelarm (m)}$$

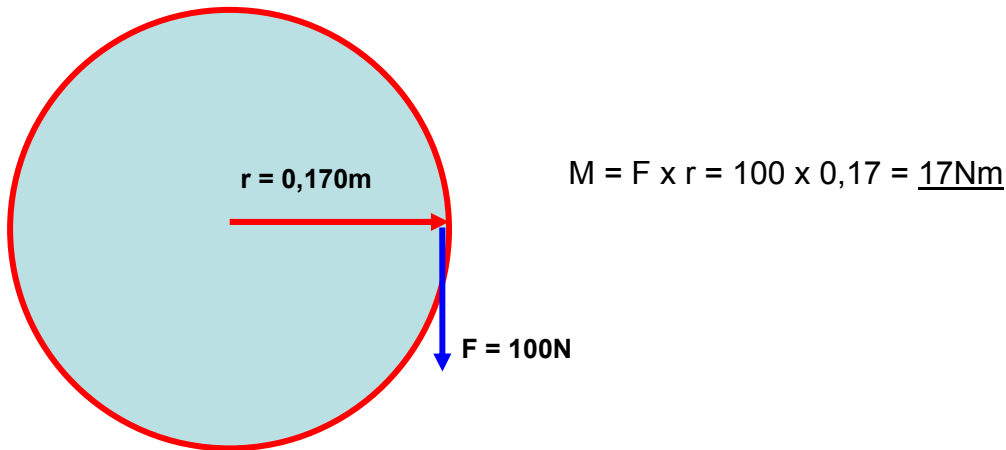


Abbildung 8: Drehmoment bei einer Kurbellänge von 170mm und einer aufgebrauchten Kraft von 100N

Die im Radsport übliche Angabe zur Drehzahl oder Tretfrequenz (rpm), erlaubt die Berechnung der Winkelgeschwindigkeit (ω), also die zeitliche Änderung des Drehwinkels (Einheit = Radiant/s),

$$\omega = 2 \times \pi \times \text{rpm} / 60 = 2 \times 3,14 \times 90 / 60 = \underline{9,43 \text{ rad/s}}$$

wodurch die Berechnung der Leistung möglich wird.

$$\text{Leistung (P)} = M \times \omega = 17 \times 9,43 = \underline{160 \text{ W}}$$

Formel 7

Hier ist es wichtig zu Bemerkem, dass ω unabhängig vom Radius, also der Kurbellänge ist. Anders als die Umdrehungsgeschwindigkeit (V).

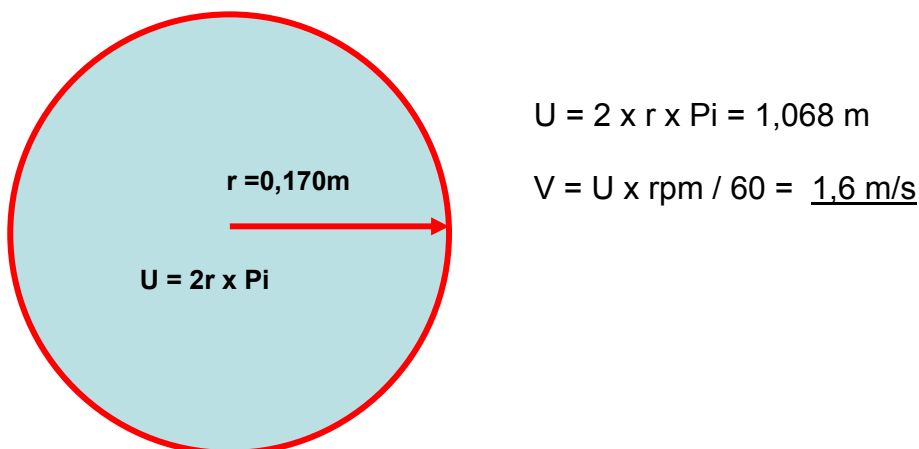


Abbildung 9: Bestimmung des Kreisumfanges und der Umdrehungsgeschwindigkeit bei einer Kurbellänge von 170mm und einer Tretfrequenz von 90rpm

Somit kann die Leistung auch wie in Abschnitt 1.5 beschrieben, berechnet werden.

$$P = F \times v$$

$$P = 100 \text{ N} \times 1,6 \text{ m/s} = \underline{160 \text{ W}}$$

Wir erhalten in beiden Fällen das gleiche Resultat. Wichtig ist die Unterscheidung ob ein Drehmoment oder eine Kraft als Berechnungsgrundlage vorliegt.

Leistung (P) = $M \times \omega$
oder

$$\text{Leistung (P)} = F \times v$$

Die handelsüblichen Systeme messen das Drehmoment mittels DMS. Je nach Fabrikat erfolgt die Messung

- An der Kurbel (Schoberer Rad Messtechnik ®)
- An der Tretlagerachse (Ergomo ®)
- An der Hinterradnabe (Power Tap ®)

Die Bestimmung der Drehzahl, zur Berechnung der Winkelgeschwindigkeit, erfolgt über einen Reed – Kontakt (wie der Speichenmagnet zur Geschwindigkeitsmessung). Die gemessenen Daten werden an einen Mikroprozessor gesteuerten Radcomputer übertragen und können am Display abgelesen werden (Leistung, Tretfrequenz, Geschwindigkeit, Herzfrequenz, Distanz, Zeit).

3. Leistungsmessung im Radsport

Setzen wir die Leistung zur Steuerung im Training ein, bemerken wir, dass die Streuung der Messwerte deutlich größer ist, als bei der Herzfrequenzsteuerung. Ursache dafür sind ständig wechselnde äußere Bedingungen, wie Wind und Streckenverhältnisse. Aber auch durch den Straßenverkehr in Kurven und Kreisverkehren wird die hohe Fluktuation der Leistung deutlich. In jeder Phase des Trainings, in der kein Drehmoment übertragen wird, fällt die Leistung auf Null ab und beim Beschleunigen nach Kurven oder aus dem Stillstand, werden kurzfristig sehr hohe Werte erreicht. Diese Variation verdeutlicht, wie unterschiedlich die tatsächliche Belastung während des Trainings und vor allem im Wettkampf ist. Die Herzfrequenz kann aufgrund des trägen Verhaltens, dem biologische Systeme unterliegen, diese Varianz nicht wiedergeben (vgl. Abbildung 10). Die, zum Teil auch heute noch bestehende Meinung, der Straßenradsport sei eine Sportart mit sehr konstanter Belastung, beruht auf den seit Ende der 70er Jahre verfügbaren, mobilen Herzfrequenz Messgeräten.

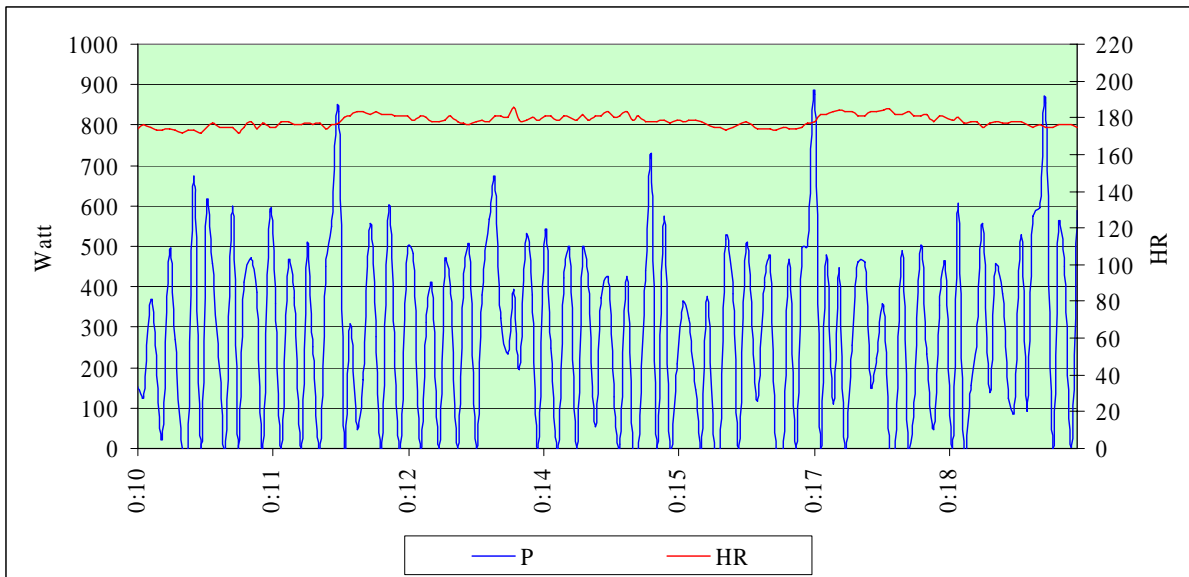


Abbildung 10: Ausschnitt aus einem Radkriterium: Variable Leistung, konstante Herzfrequenz

Der Zusammenhang zwischen Herzfrequenz und Leistung bei Laboruntersuchungen ist bekannt. Dabei wird eine ÄUßERE BELASTUNG vorgegeben (Watt, km/h, kp...) und die INNERE BEANSPRUCHUNG (HF, VO₂, RR, Laktat...), also die Reaktion des Organismus auf den Reiz, wird gemessen. Aufgrund dieser Messergebnisse, kann einer bestimmten Leistung eine Herzfrequenz zugeordnet werden. Unter solchen, standardisierten Laborbedingungen, ist das Verhalten der Herzfrequenz mit einer hohen Korrelation vorhersehbar. Unter Feldbedingungen ist dies jedoch nicht mehr der Fall. Zu groß ist die Abhängigkeit der Herzfrequenz von Äußeren Faktoren wie Temperatur, Höhe, Dehydration, Hypoglykämie, variable Leistung, Ermüdung oder Krankheit. (vgl. Abbildung 11 - Abbildung 14).

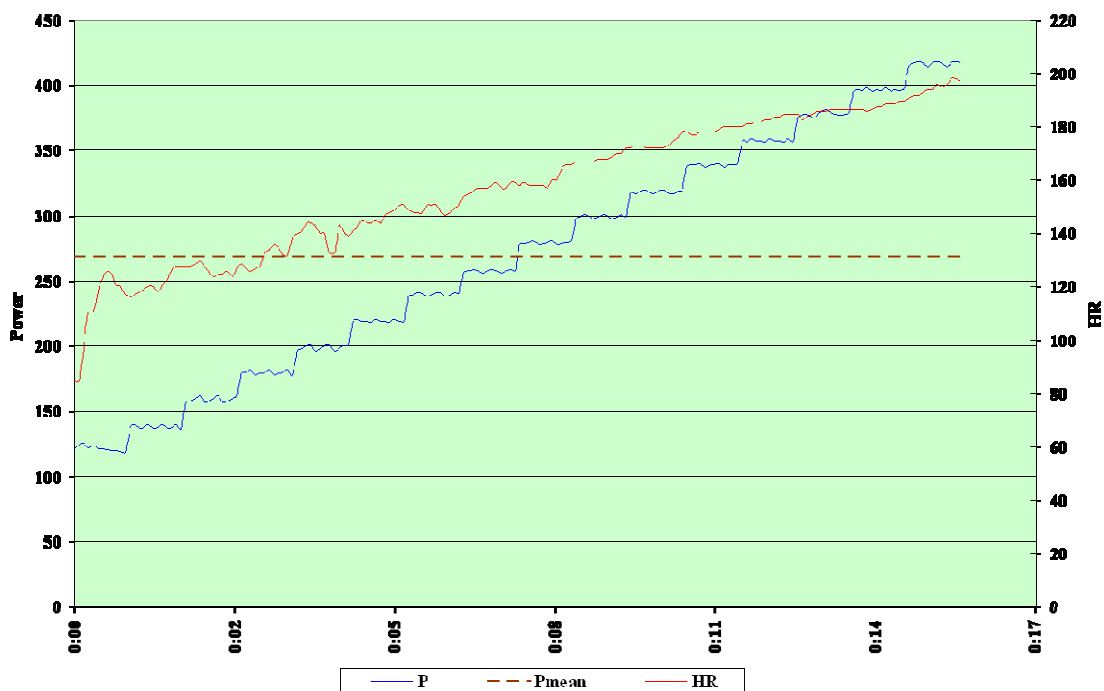


Abbildung 11: Herzfrequenz und Leistung bei einem Laborstufentest

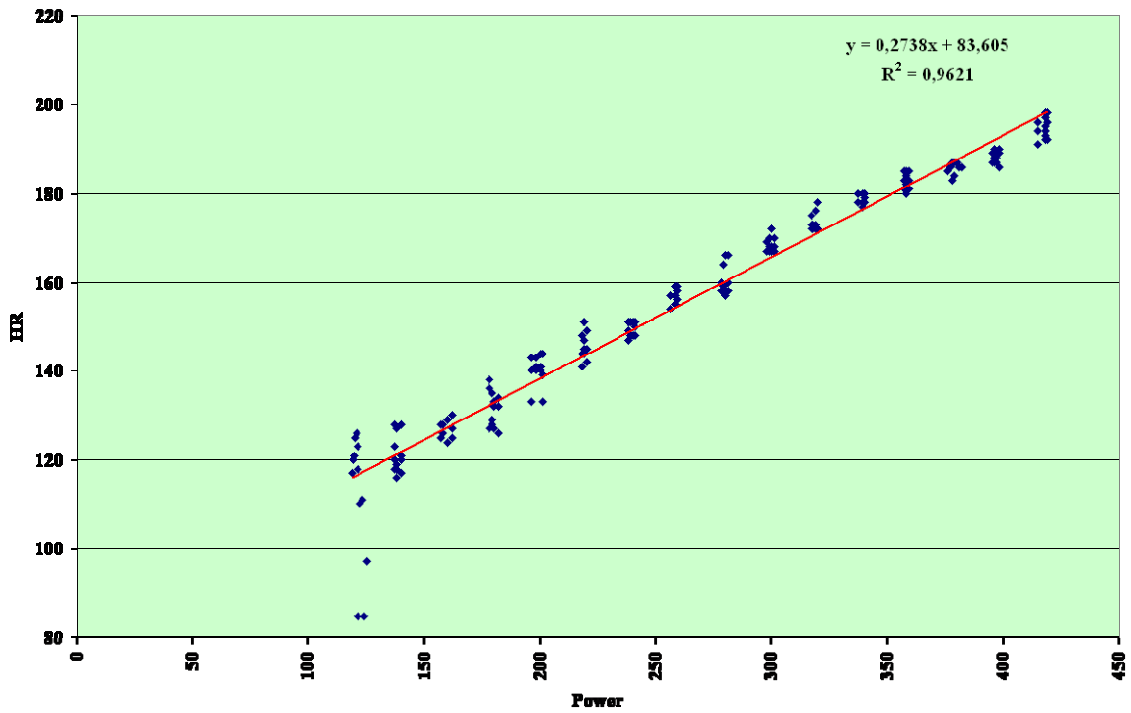


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen Herzfrequenz und Leistung während eines Laborstufentests

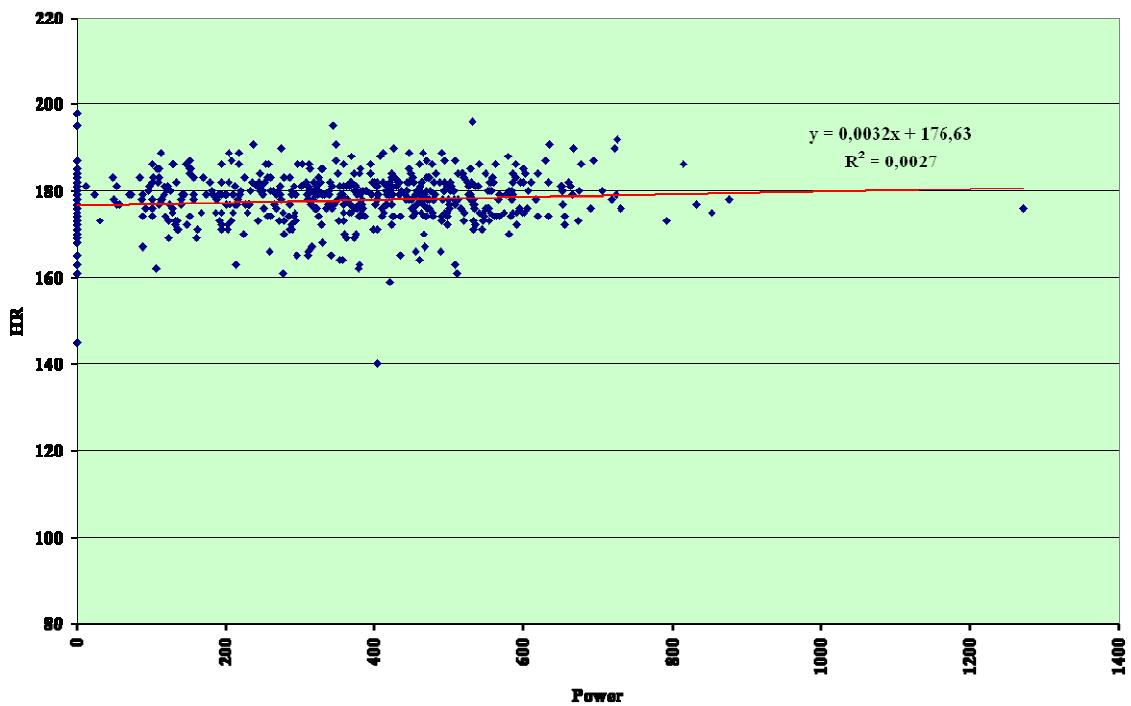


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Herzfrequenz und Leistung bei einem Kriterium

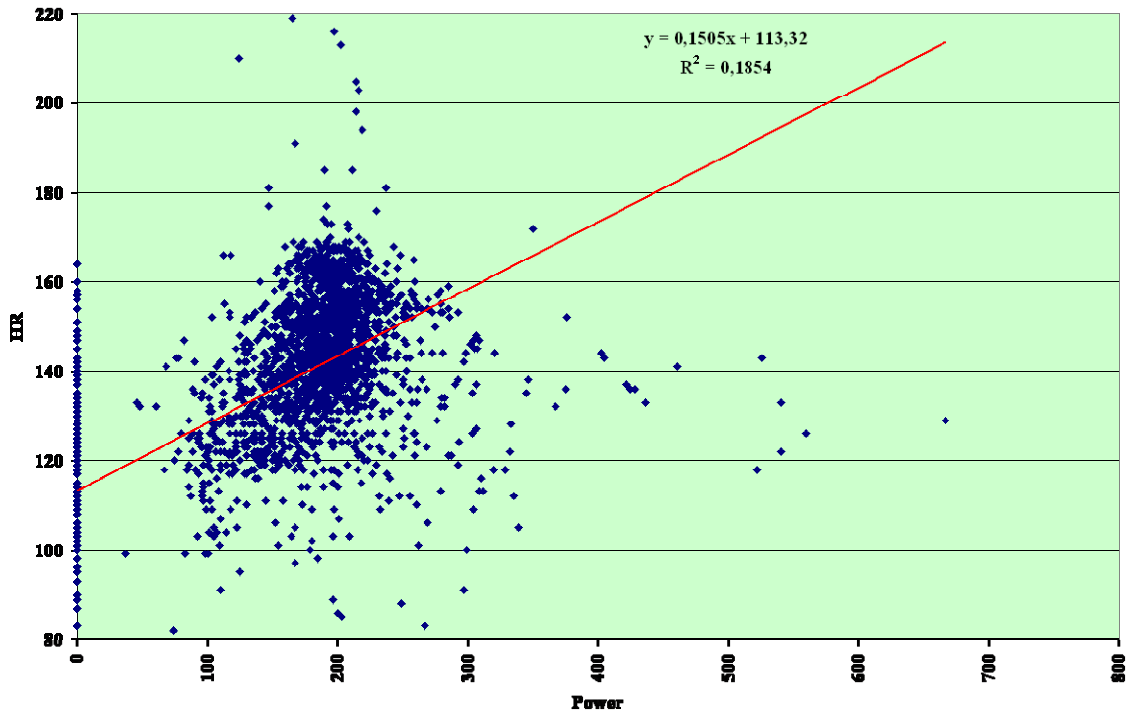


Abbildung 14: Zusammenhang zwischen Herzfrequenz zur Leistung bei einem Grundlagentraining über 5h

Der fehlende Zusammenhang zwischen Herzfrequenz und Leistung, erlaubt keine zuverlässige Aussage über die tatsächliche Belastung. Vielmehr gibt die Herzfrequenz Aufschluss über die BEANSPRUCHUNG des Herzkreislauf Systems, auf eine, durch die physikalische Leistung darstellbare, BELASTUNG. Also den eigentlichen Trainingsreiz.

Sie gibt daher, als integrativer Parameter, Auskunft über anatomische und physiologische Größen des O₂ Aufnahme – und Transportsystems (Lunge, Herz, Gefäße, Blut,...), das vegetative Nervensystem (Stress, Wettkampfsituation,...) und, den bereits erwähnten externen Faktoren. Noch größer als diese intraindividuellen Variationen sind die interindividuellen. Personen übergreifende Vergleiche sind unzulässig und bieten auch keinerlei Information über die Leistungsfähigkeit. Das bedeutet jedoch nicht, dass die Herzfrequenz keine Wertigkeit in der Trainings – und Wettkampfanalyse hat. Wenn sie als das gesehen wird, was sie ist: ein Parameter der die Beanspruchung auf einen Reiz wiedergibt. Sieht man die Herzfrequenz im Zusammenhang zur Leistung, können Adaptationen des Herzkreislauf Systems auf einen Trainingsinduzierten Stimulus bewertet werden.

Abbildung 15 zeigt die Herzfrequenz und die Leistung bei einem 7 bzw. 8 min Intervalltraining an der anaeroben Schwelle im März und im Juli. Während der Wintersaison beträgt die Herzfrequenz 184 Schläge/min. bei einer Leistung von 265 Watt. Im Sommer wird bei einer Herzfrequenz von 173 Schlägen/min. eine Leistung von 323 Watt erbracht. 60 Watt mehr Leistung mit 10 Herzschlägen weniger verdeutlicht die Trainingsbedingte Auswirkung auf das Herzkreislauf System.

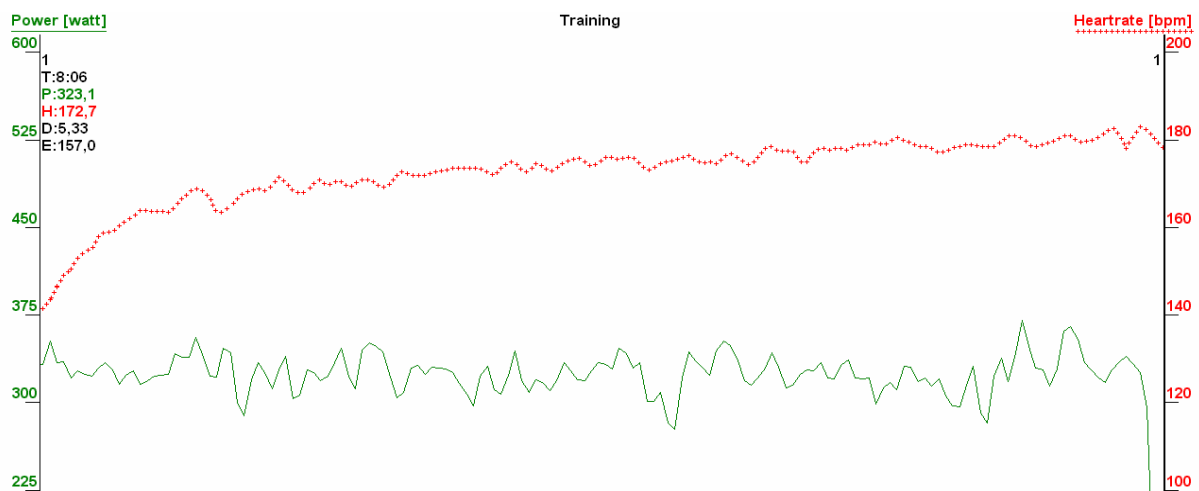
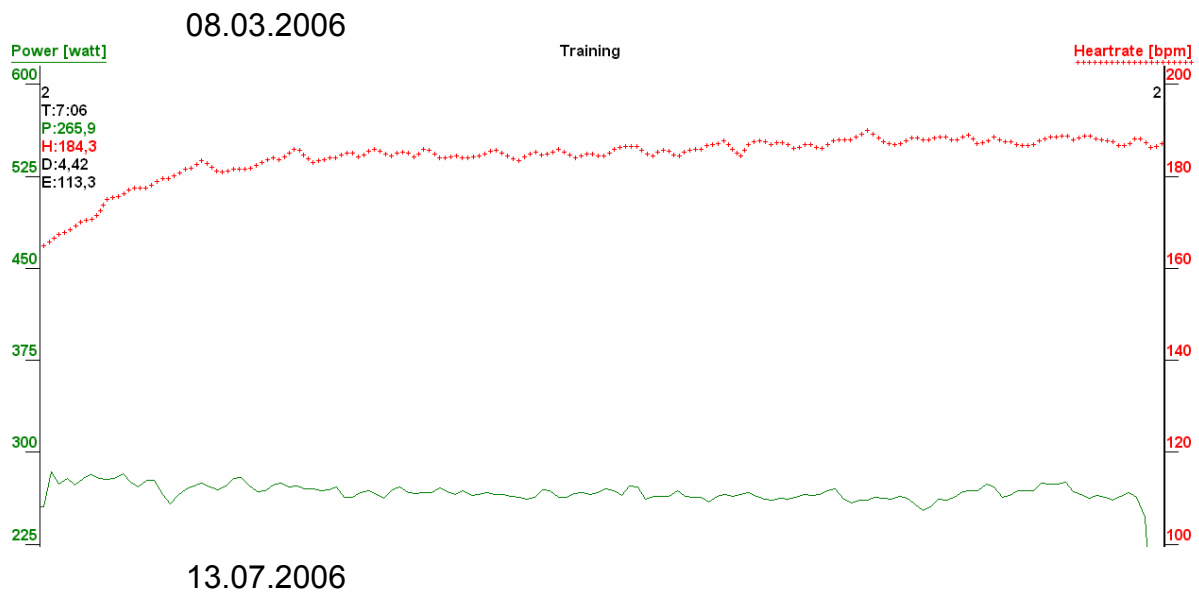


Abbildung 15: Adaptation des HKL – Systems: Leistung und Herzfrequenz zu unterschiedlichen Saisonzeitpunkten

Die nachfolgenden Abschnitte beleuchten die Einsatzmöglichkeiten der mobilen Leistungsmessung im Radsport. Fallbeispiele und Analyseverfahren geben einen Einblick in die Routinemäßige Verwendung.

Hinweis: alle in diesem Skriptum verarbeiteten Daten von mobilen Leistungsmessungen, wurden mittels SRM® System ermittelt.

3.1. Mobile Leistungsmessung zur Trainings – und Wettkampfsteuerung

Jeder Parameter der zur Steuerung des Trainings eingesetzt werden soll, basiert auf der Grundlage der physiologischen Antwort auf einen Reiz.

Wie im vorigen Abschnitt besprochen, wird im Rahmen einer Leistungsdiagnostischen Untersuchung, zumeist unter standardisierten Laborbedingungen, eine ansteigende Belastung (Watt, km/h,...) vorgegeben und die resultierende Beanspruchung eines biologischen Markers (HF, VO₂, RR, Laktat...) gemessen. Bei der anschließenden Analyse der Messdaten, werden neben den Maximalwerten auch diverse submaximale Kenngrößen definiert (fixe oder individuelle Laktatschwellen, ventilatorische Schwellen, Herzfrequenzknickpunkte...). Eine Bewertung oder Gegenüberstellung der, in der Anzahl sehr umfangreichen Schwellenkonzepte, wird in diesem Skriptum nicht vorgenommen.

Lactat mmol/l	Watt	Watt/kg	% Pmax	HF	% Hfmax	VO2 ml/min	VO2 ml/min/kg
1,5	253,4	3,93	62%	158	81%	3138	48,65
2,0	275,1	4,26	67%	164	84%	3380	52,40
2,5	291,9	4,53	71%	168	86%	3570	55,34
3,0	305,6	4,74	75%	172	88%	3727	57,78
3,5	317,2	4,92	77%	175	90%	3861	59,86
4,0	327,3	5,07	80%	177	91%	3978	61,67
4,5	336,2	5,21	82%	179	92%	4082	63,28
5,0	344,1	5,33	84%	181	93%	4175	64,73
5,5	351,3	5,45	86%	183	94%	4260	66,05
6,0	357,8	5,55	87%	184	95%	4338	67,26
7,0	369,4	5,73	90%	187	96%	4477	69,41
8,0	379,5	5,88	93%	189	97%	4598	71,29
9,0	388,4	6,02	95%	191	98%	4706	72,96
10,0	396,3	6,14	97%	193	99%	4803	74,47
11,0	403,5	6,26	98%	195	100%	4891	75,83
12,0	410,0	6,36	100%	196	100%	4972	77,09
Maximaldaten:							
Lactat mmol/l	Watt	Watt/kg	SVI	HF	Stufenanzahl	VO2 ml/min	VO2 ml/min/kg
13,5	410,00	6,36	67,00	195	9	4970	77,05

Tabelle 7: Spiroergometrisches Testergebnis eines Straßenradfahrers während der Wettkampfperiode. Fixes Schwellenkonzept mit 2mmol/l bzw. 4 mmol/l Laktat.

In Tabelle 7 ist als Beispiel das Testergebnis eines Straßenradfahrers dargestellt. Die Auswertung erfolgte nach dem fixen Schwellenkonzept von 2mmol/l bzw. 4mmol/l Laktat nach MADER¹³.

Das Ergebnis Leistungsdiagnostischer Untersuchungen erlaubt eine retrospektive Analyse der gesetzten Trainingsmaßnahmen. Wurden die gesetzten Trainingsziele erreicht? Ist es zu den angestrebten Verbesserungen in Teilbereichen der Leistungsfähigkeit gekommen? Wie ist das Verhalten der erhobenen Parameter im Vergleich mit vergangenen Untersuchungen?

Eine wesentliche Aufgabe ist es aber auch, Trainingsbereiche für die folgende Trainingsphase festzulegen. Diese Einteilung erfolgt häufig auf der Grundlage einer Korrelation eines erhobenen Parameters mit der Wettkampfleistung. Im Radsport sind dies unter anderem die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) und ein hoher Grad deren Ausschöpfung unter submaximalen Bedingungen^{14, 15, 16, 17}, die maximale Leistung (P_{max}) im Stufentest^{18, 19} sowie die durchschnittliche Leistung (P_{mean}) während simulierter Zeitfahr – Belastungen unterschiedlicher Distanzen^{20, 21, 22, 23}.

Da die direkte Trainingssteuerung über die Sauerstoffaufnahme und, bis vor wenigen Jahren auch über die Leistung, nicht möglich war, wurden korrespondierende Herzfrequenzen zur Ermittlung der Wettkampfanforderung und davon ausgehend zur Umsetzung der Trainingsziele verwendet. Die Festlegung der Zonen erfolgt dabei auf Laktat basierten Konzepten^{24, 25, 26}, oder auf Basis der VO_{2max} ²⁷. PADILLA et.al.^{24, 25} und IMPELLIZZERI et.al.²⁶ definierten als Marker für ihre Intensitätsbereiche die „lactate threshold“ (LT) und den „onset of blood lactate accumulation“ (OBLA).

Definition LT: „...die Belastungsintensität die einen Laktatanstieg um 1 mmol/l über den Basiswert verursacht, der bei einer Belastung zwischen 40 – 60% der maximalen Leistung gemessen wird.“²⁸

Definition OBLA: „...die Belastungsintensität die eine Laktatkonzentration von 4 mmol/l hervorruft.“²⁹

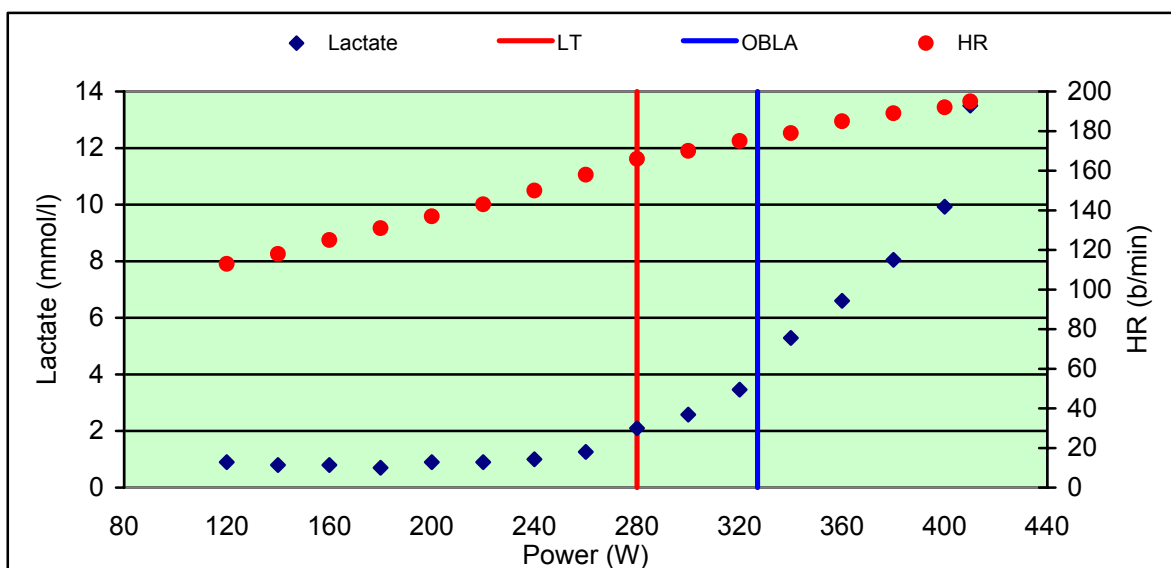


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Intensitätsmarker LT und OBLA

FERNANDEZ-GARCIA et.al. ²⁷ legten die Intensitätsbereiche als Prozentwerte der VO_{2max} fest.

Zone	% VO_{2max}
Anaerobic (AN)	> 90
Intense Aerobic (IA)	70 – 90
Moderate Aerobic (MA)	50 – 70
Recovery (RE)	< 50

Tabelle 8: Einteilung der Intensitätsbereiche als Prozentwert der VO_{2max} nach FERNANDEZ-GARCIA²⁷

In der praktischen Umsetzung des Leistungsgesteuerten Trainings, finden beide genannten Varianten, also die Festlegung der Intensitätsbereiche anhand von maximalen – wie auch submaximalen Kenngrößen, Anwendung. Dabei muss betont werden, dass die Ableitung von Maximalwerten nur dann Gültigkeit hat, wenn beim Testverfahren tatsächlich eine Ausbelastung erreicht wurde.

Auch ohne aufwendige Laboruntersuchung, können Intensitätsbereiche festgelegt werden. Ist man im Besitz eines mobilen Leistungsmesssystems, kann die durchschnittliche Leistung (P_{mean}) während eines 40 – 60 Minuten dauernden simulierten Zeitfahrens, gemessen werden. Empirische Beobachtungen zeigen eine hohe Korrelation zwischen P_{mean} und P_{LT} ($r^2 = 0,925$ unveröffentlichte Ergebnisse). Auf dieser Grundlage können Leistungs-basierte Intensitätsbereiche folgendermaßen festgelegt werden:

Zone	% P_{LT}	% P_{OBLA}	% P_{max}
1	< 65	< 55	< 45
2	65 – 85	55 – 75	45 – 60
3	85 – 105	75 – 90	60 – 70
4	105 – 120	90 – 105	70 – 85
5	120 – 150	105 – 125	85 – 100
6	150 – 200	125 – 170	100 – 135
7	> 200	> 170	> 135

Tabelle 9: Intensitätsbereiche als Prozentwerte von P_{LT} , P_{OBLA} und P_{max}

Zu beachten ist, dass bei der relativen Angabe von Intensitätsbereichen der zugrunde liegende Parameter berücksichtigt wird. Herzfrequenz, Sauerstoffaufnahme oder Leistung, können nicht mit den gleichen Prozentwerten des jeweiligen Maximums berechnet werden.

% P_{max}	% HF_{max}	% VO_{2max}
40	65 – 70	45 – 50
50	70 – 75	50 – 60
60	75 – 81	60 – 70
70	81 – 87	70 – 78
80	87 – 91	78 – 88
90	91 – 96	88 – 95

Tabelle 10: Vergleich von Intensitätsangaben in Prozentwerten der P_{max} , HF_{max} und VO_{2max} bei trainierten Radfahrern. (n=58)

Zone	Beschreibung
1	Training zur Förderung der Regeneration. Der Trainingsumfang liegt zwischen 60 und 120 Minuten. Große Anteile bei sehr langen Trainingseinheiten mit 6 - 8 Stunden Dauer, aber auch bei Wettkämpfen. Geringe muskuläre und energetische Beanspruchung.
2	Training zur Ökonomisierung und Stabilisierung der Grundlagenausdauer. Der Trainingsumfang liegt, je nach Leistungsstand, zwischen 90 und 300 Minuten. Erhöhte muskuläre und energetische Beanspruchung mit zunehmender Belastungsdauer. Die Energiebereitstellung erfolgt dominant aus dem Fettstoffwechsel. Adäquate Kohlenhydratzufuhr bei Blocktraining nötig.
3	Training zur Entwicklung der Ausdauer und zur Verbesserung der aeroben Kapazität (auch intensives Ausdauertraining oder GA2). Der Trainingsumfang liegt zwischen 30 und 90 Minuten, meist als Wechsel – oder Intervallmethode. Typische Intensität für 45 – 75 Minuten Zeitfahren. Hohe muskuläre Beanspruchung. Aufgrund der Belastungsdauer Ausschöpfung der Glykogenspeicher.
4	Training im Bereich des maximalen Laktat steady – states (Entwicklungsbereich). Der Trainingsumfang liegt zwischen 15 und 60 Minuten, hauptsächlich als Intervallmethode zwischen 3 und 30 Minuten. Typische Intensität für 10 – 40 Minuten Zeitfahren. Sehr hohe muskuläre Beanspruchung. Maximale Inanspruchnahme der aeroben Energiebereitstellung. Fast ausschließlich Kohlenhydrat Oxidation.
5	Training zur Entwicklung der VO_{2max} (Spitzenbereich). Ausgeprägte muskuläre Beanspruchung. Intervalldauer abhängig von der Zielstellung, Alaktazid oder Laktazid, zwischen 15 Sekunden und 5 Minuten. Typische Intensität für 4000m Verfolgung.
6	Training zur Entwicklung der anaeroben Leistungsfähigkeit. Intervalldauer 30 – 120 Sekunden. Typische Intensität für die zweite Hälfte im 1000m Zeitfahren.
7	Sehr kurze, hoch intensive Antritte von maximal 20 bis 30 Sekunden Dauer. Hohe neuromuskuläre Beanspruchung. Bei Start aus dem Stillstand starker Kraftreiz. Typische Intensität für die erste Runde im 1000m Zeitfahren, oder die letzten 250m bei Sprints.

Tabelle 11: Beschreibung der Leistungsbasierten Intensitätsbereiche

In Tabelle 12 sind die festgelegten Intensitätsbereiche aufgrund der Leistungsdiagnostischen Ergebnisse eines Straßenradfahrers (siehe Tabelle 7) dargestellt. Ergänzend zur Leistung, wurde auch die Herzfrequenz angegeben.

Zone	Watt	HF
1	< 180	< 130
2	180 – 235	130 – 150
3	235 – 290	150 – 167
4	290 – 330	167 – 180
5	330 – 400	180 – 195
6	400 – 550	-
7	> 550	-

Tabelle 12: Intensitätsbereiche für einen Straßenradfahrer (vgl. Tabelle 7)

Auf der Grundlage dieser Intensitätsbereiche, kann die Steuerung über den Parameter erfolgen, der den direktesten Bezug zur Belastung wiedergibt.

Bei der praktischen Umsetzung gilt das Prinzip der spezifischen Belastung. Wie in Abbildung 10 in Abschnitt 3 dargestellt, ist die Variabilität der Leistung beim Radsport sehr groß. Es ist daher weder sinnvoll, noch möglich ein Training mit konstanter Leistung zu absolvieren. Dies gilt in erster Linie für die „Grundlagenausdauer“ Zonen 1 – 3. Hier wird vielmehr der gesamte Bereich der Zielzone genutzt und kann, je nach Situation, auch kurzfristig verlassen werden. Trotzdem bleibt die Orientierung während dem Training ein bestimmter Wert. Bei den Bereichen 4 – 6, kann die Steuerung deutlich genauer erfolgen. Hier wird für kurze Zeit eine relativ hohe Intensität angestrebt, meist in Kombination mit einer bestimmten Tretfrequenz.

Zone 7 beinhaltet alle willkürlichen und unwillkürlichen nahezu maximalen Belastungen. Also geplante Sprints über 100 oder 200 Meter, oder kurze Antritte im Wettkampf oder Training. Hierbei wird das Training nicht unmittelbar gesteuert, sondern vielmehr in der Analyse beurteilt wie hoch die Leistung bei einem bestimmten Antritt ist.

Beispiele für geplante Trainingseinheiten:

Mo	ruhige Einheit, überwiegend Z1~170W, Anstiege max. 220W	2h
Di	Z2 ~200-220W mit 10x3min frequenztr. kl.Übersetzung ~230W/120rpm flach	3,5h
Mi	Z3 3x8min 270W/100rpm flach + 3x8min 280/70 Berg; 7P. rest ~180-200W	3h
Do	Z2 ~200-220W mit 8Sprints a'250m	4h
Fr	Intervalltr Z5: 3Serien mit 10x 30sec 420W/100rpm 30sec150W; rest 180-200W	3h
Sa	Wechseltr Z3-Z4: 3x30min mit 6x (3min 260-280W/2min 310-330W) 15P.Z1	3,5h
So	Fahrtspiel hügelig, Anstiege <1km Z5-Z6;>1,5km Z3-Z4 kraftorientiert	4h

Tabelle 13: Beispiele für Inhalte von Trainingseinheiten mit Zielangaben der Leistung

Die Leistungsmessung findet nicht nur zur Steuerung im Training, sondern auch im Wettkampf Anwendung. Im Einzelzeitfahren passiert häufig der Fehler, dass zu schnell begonnen wird und die Leistung danach abfällt. MATTERN et.al.³⁰ konnten zeigen, dass die Resultate bei 20 km Zeitfahren besser waren ($33,10 \pm 0,38\text{min}$ vs. $32,25 \pm 0,38\text{min}$), wenn die ersten vier Minuten mit einer um 15% niedrigeren Leistung absolviert wurde, als bei vorangegangenem, selbst gesteuertem Rennverlauf. Auch die Wahl der richtigen Übersetzung und damit die Beibehaltung der „optimalen“ Tretfrequenz, sind dabei überprüfbar. Bei Massenstartrennen kann durch taktisches Verhalten Energie sparend gefahren werden, um für entscheidende Rennsituationen genug Reserven zu haben. Die Dauer der Leistungsspitzen (z.B. nicht mehr als 60 Sekunden in Zone 6) bei Ausreißversuchen oder beim Heranfahen an eine Fluchtgruppe kann limitiert werden. Oder es kann die tolerierbare Leistung in Anstiegen, ähnlich dem Zeitfahren, gesteuert werden.

3.2. Analyse von Messdaten

Aufgrund der Vielzahl an erhobenen Messdaten (Leistung, Tretfrequenz, Herzfrequenz, Geschwindigkeit, Zeit), sind auch die Möglichkeiten der Analyse sehr vielseitig.

3.2.1. Bildung von Mittelwerten

Als einfachste Methode, bietet sich die Bildung von Mittelwerten an. Bei Berechnungen von ganzen Trainingseinheiten oder Wettkämpfen, gestattet dieser erste Überblick dem Betrachter, bei Kenntnis über den Athleten, eine grobe Einschätzung über die Belastung. Es kann jedoch keine Aussage über die Struktur oder Teilbereiche des Datensatzes getroffen werden. So kann beispielsweise eine P_{mean} von 200 Watt in 30 Minuten zustande kommen durch

- Konstante 200 Watt
- 2 Minuten Intervalle von 300 / 100 Watt
- 10 Minuten 400 Watt + 20 Minuten 100 Watt

Da diese Belastungsstrukturen unterschiedliche Wirkung auf den Organismus haben liegt auf der Hand. Bei dieser Form der Betrachtung, kann die Herzfrequenz als Unterscheidungsmerkmal nützlich sein. Bei variablen Einheiten mit intensiven Belastungsphasen liegt sie meist höher als bei vergleichbaren P_{mean} Werten ruhigeren Charakters. Werden Mittelwerte über einzelne Phasen der Einheit gebildet (Anstieg, Attacke, die letzten 10km...), geben diese einen wesentlich besseren Einblick in die Anforderungen des analysierten Abschnittes.

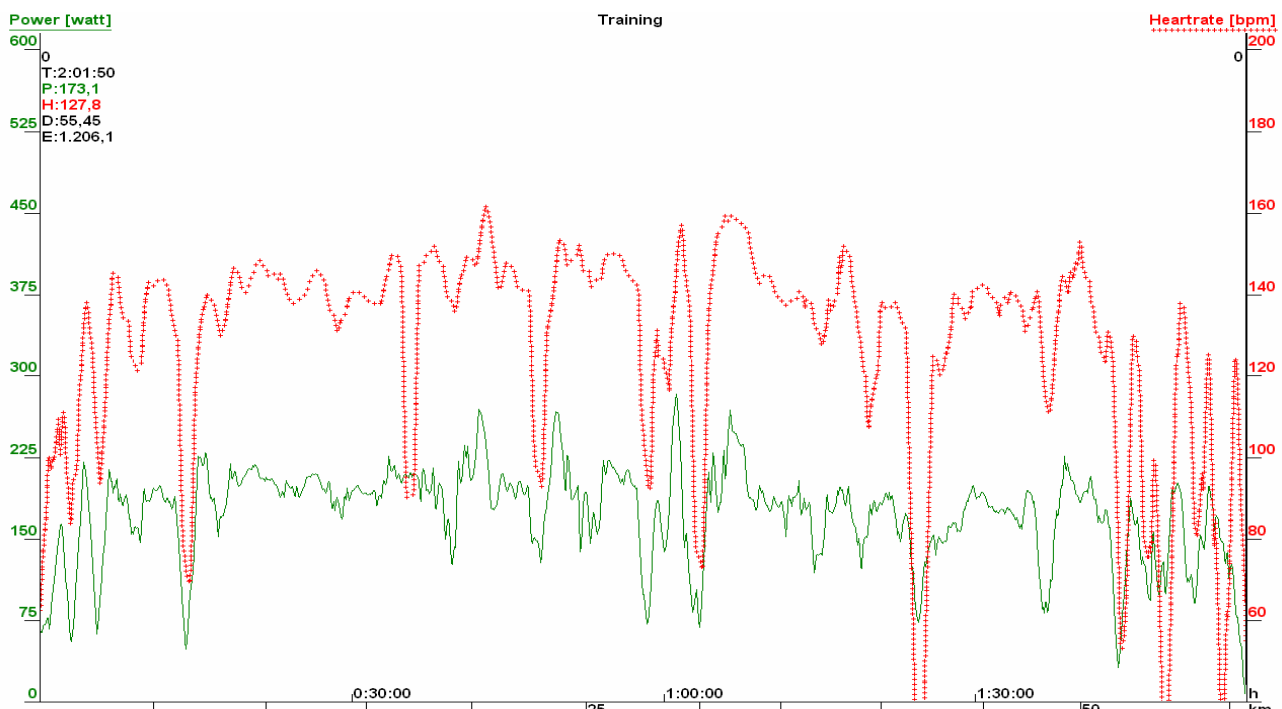


Abbildung 17: Regenerationstraining über 2h, $P_{\text{mean}} = 173 \text{ W}$; $\text{HF}_{\text{mean}} = 128 \text{ b/min}$

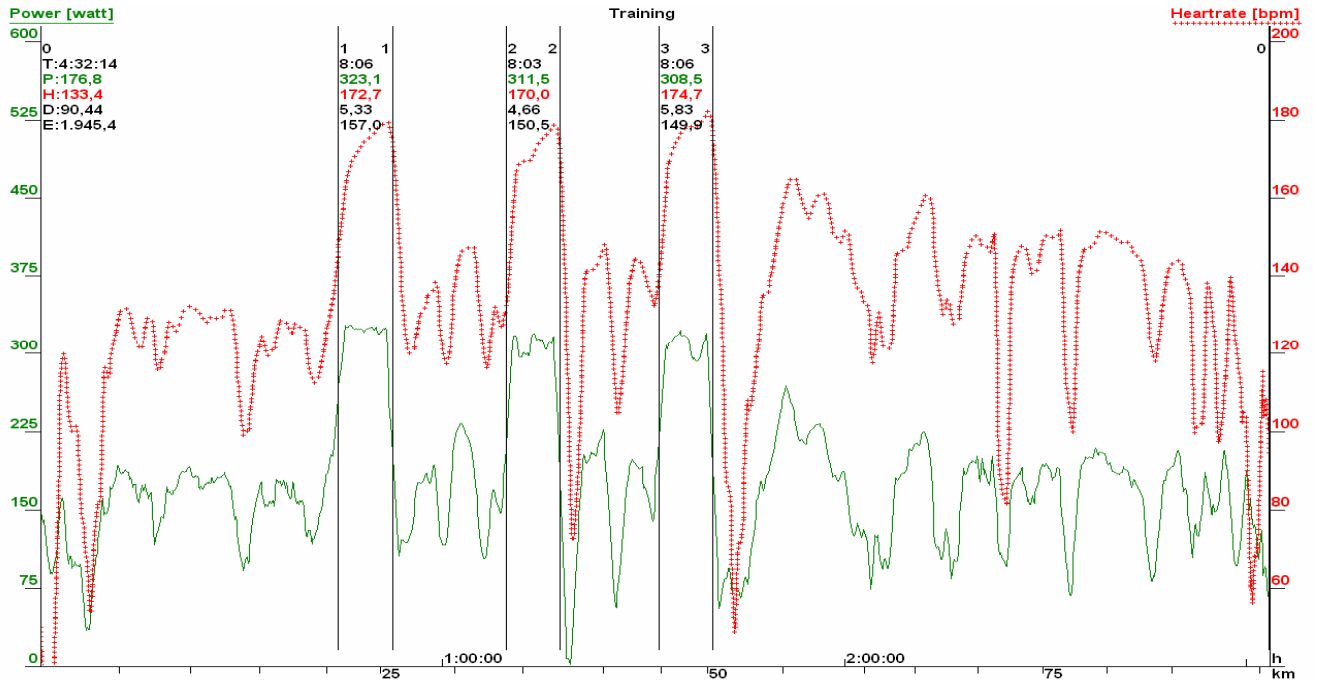


Abbildung 18: Training über 4,5h, $P_{\text{mean}} = 177 \text{ W}$; $HF_{\text{mean}} = 133 \text{ b/min}$; mit 3x8min in Zone 4

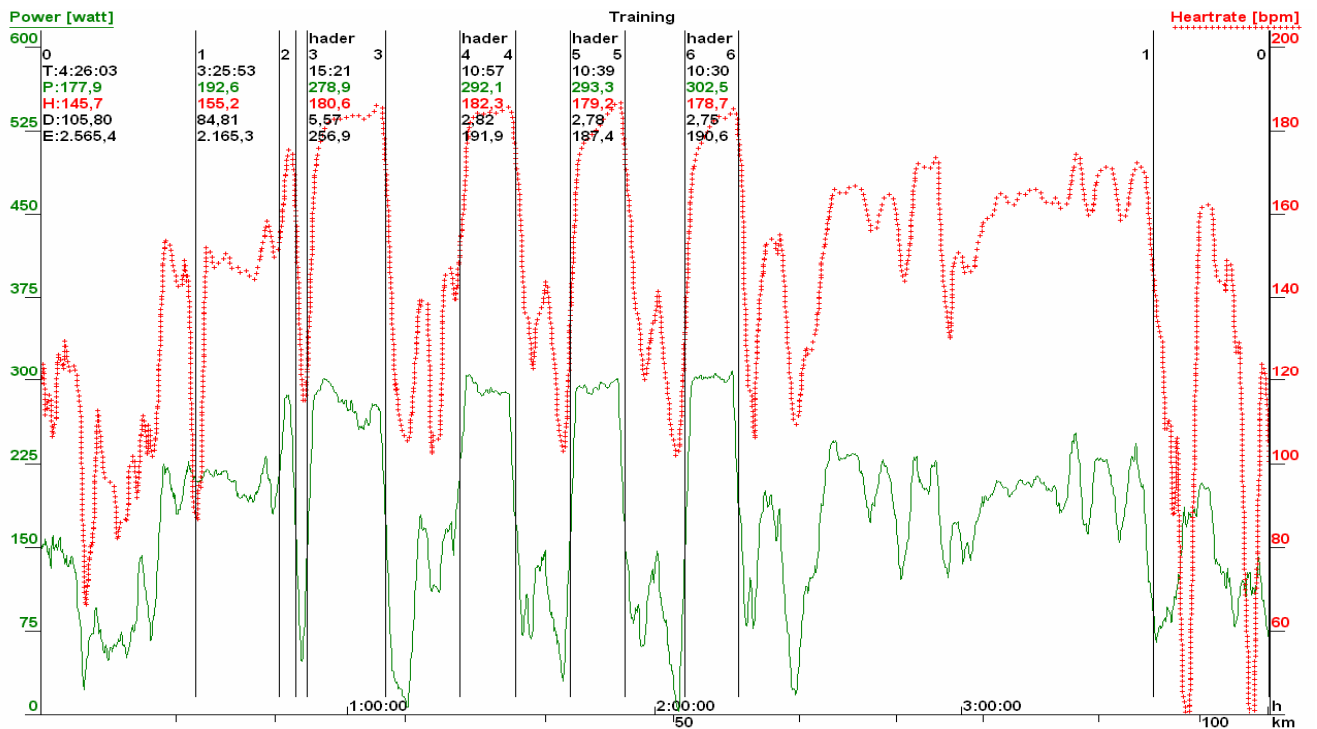


Abbildung 19: Training über 4,5h, $P_{\text{mean}} = 178 \text{ W}$; $HF_{\text{mean}} = 146 \text{ b/min}$; mit 4x10min in Zone 3-4

Die Abbildung 17 bis Abbildung 19, stellen drei Trainingseinheiten mit unterschiedlichem Inhalt, jedoch gleicher P_{mean} dar. Erst bei Ansicht der Details werden die entsprechenden Zielstellungen erkennbar. Auf die Darstellung der Tretfrequenz wurde in diesen Abbildungen vorerst verzichtet.

Durch Berechnung der physikalischen Arbeit ($W = P \times t$) ist ein Parameter verfügbar, der sowohl über die Gesamtbelastung einer Einheit, als auch über den kumulativen Effekt mehrerer Tage oder Wochen informiert. Darüber hinaus kann, unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades, auf den Energieverbrauch geschlossen werden. In Phasen erhöhten Energiebedarfes, aber auch wenn Körpermasse reduziert werden soll, kann somit eine adäquate Energiebilanzierung vorgenommen werden.

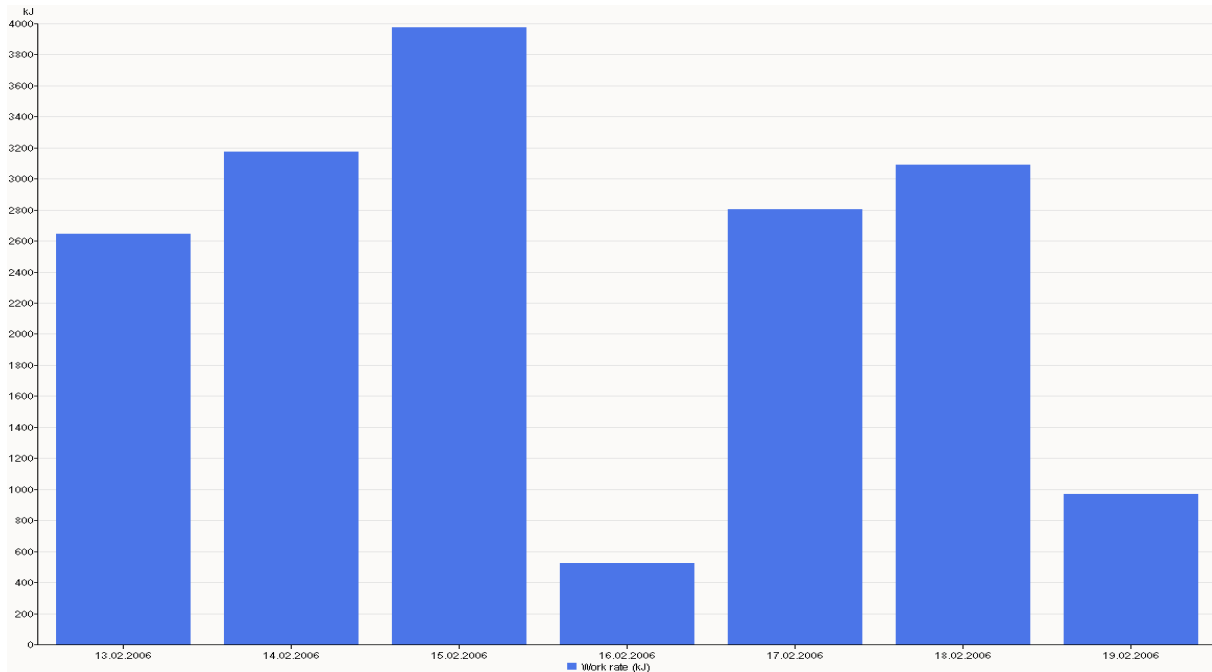


Abbildung 20: Physikalische Arbeit (kJ) während einer Trainingswoche im Februar

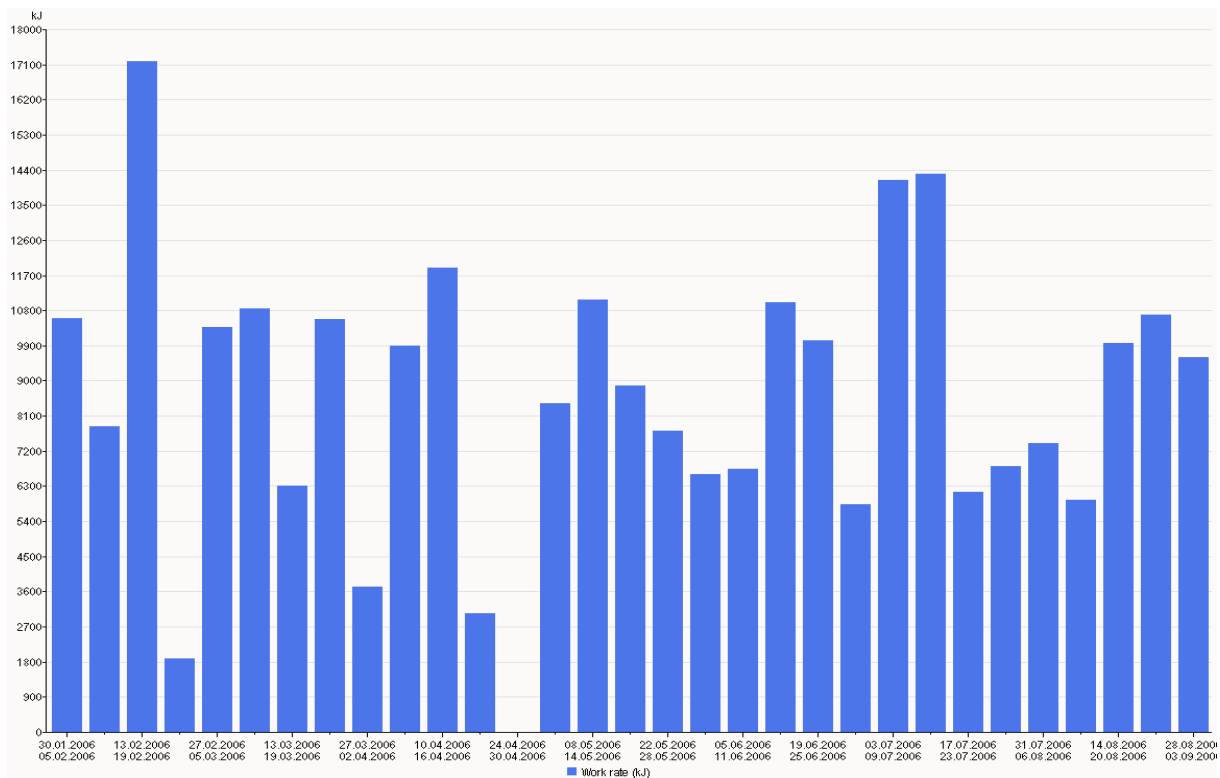


Abbildung 21: Physikalische Arbeit (kJ) pro Woche im Saisonverlauf

3.2.2. Häufigkeitsverteilung

Häufigkeitsverteilungen gestatten einen genaueren Einblick in die aufgezeichneten Messdaten. Dabei kann gezeigt werden, wie viel (absolute Häufigkeit) und wie hoch der Anteil (relative Häufigkeit) war, der in einem definierten Bereich absolviert wurde. Zur besseren Darstellung, erfolgt dies meist grafisch in Form eines Histogramms. Die Aufbereitung der Daten erfolgt meist zweidimensional. Das heißt jeder Messwert der in einem Bereich liegt, trägt zu der Summe der Anzahl der Werte in diesem Bereich bei.

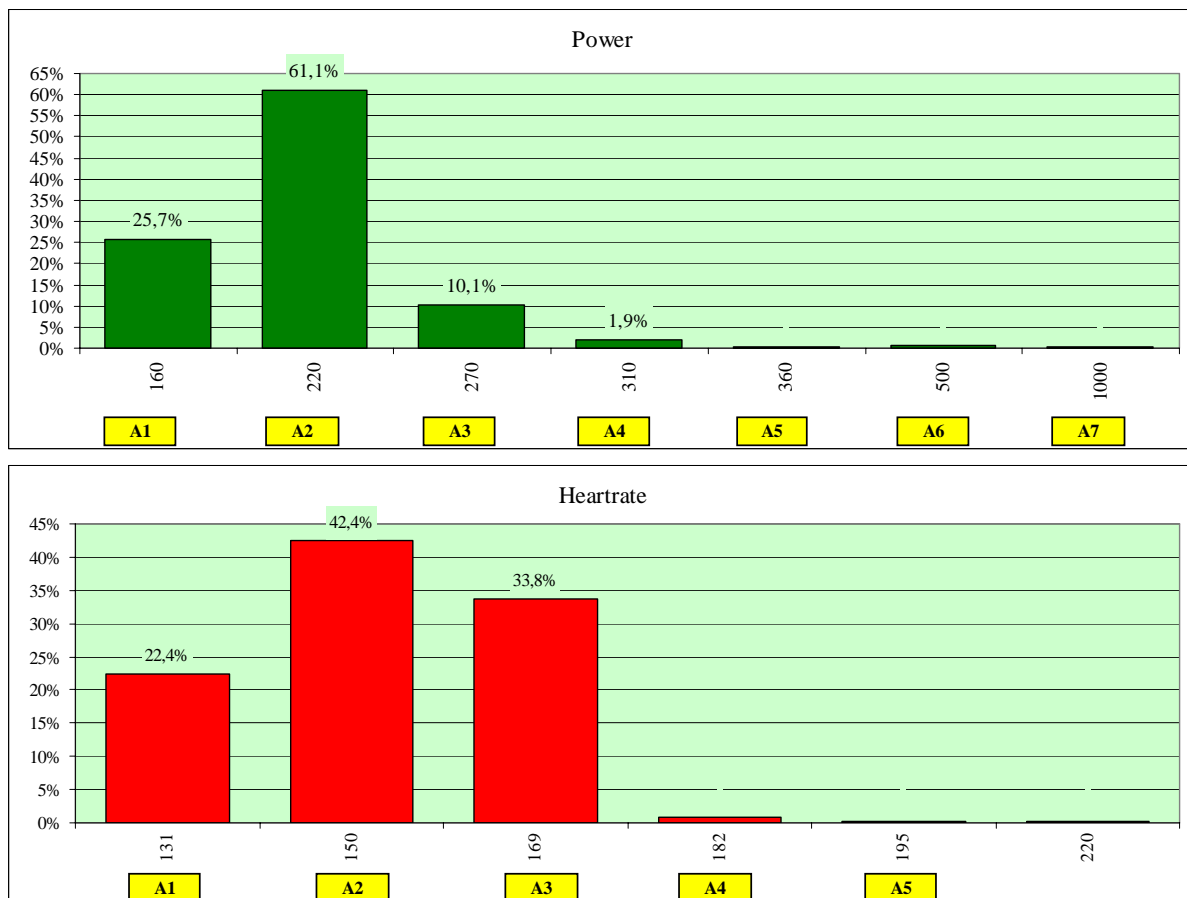


Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung der Leistung und der Herzfrequenz bei einem Grundlagentraining über 5h.

In Abbildung 22 sind die Histogramme der Leistung und der Herzfrequenz während eines Grundlagentrainings über 5 Stunden dargestellt. Während bei Betrachtung der Leistung der Schluss zulässig ist, dass die Zielstellung des Trainings optimal gelöst wurde, könnte man bei alleiniger Analyse der Herzfrequenz annehmen, dass die geforderte Intensität zu hoch war. Die Ursachen dafür sind auf Seite 15 erläutert. Darüber hinaus beeinflusst das Phänomen des „Cardiac drift“, also dem Ansteigen der Herzfrequenz mit zunehmender Belastungsdauer, bei gleich bleibender Belastung, die Beziehung zwischen Leistung und Herzfrequenz³¹. Bei Wettkampfanalysen konnte gezeigt werden, dass die niedrigen und die hohen

Bereiche, bei Herzfrequenzauswertung unterbewertet, der mittlere jedoch überbewertet wurde ³².

Zusätzlich können auch die Tretfrequenz und die Geschwindigkeit, sowie die Leistung in Relation zum Körpergewicht in dieser Form dargestellt werden.

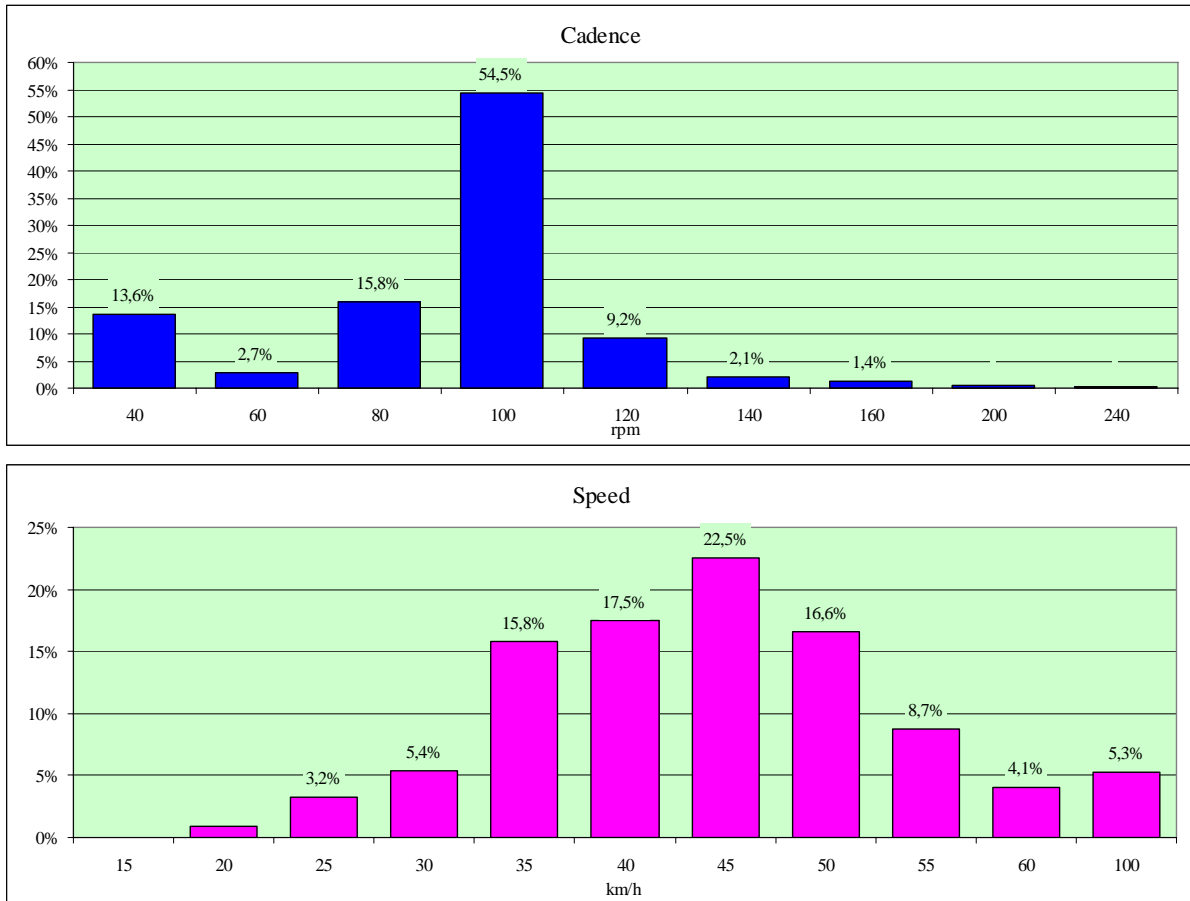


Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der Tretfrequenz und der Geschwindigkeit bei einem Wettkampf über 150 km/3,5h.

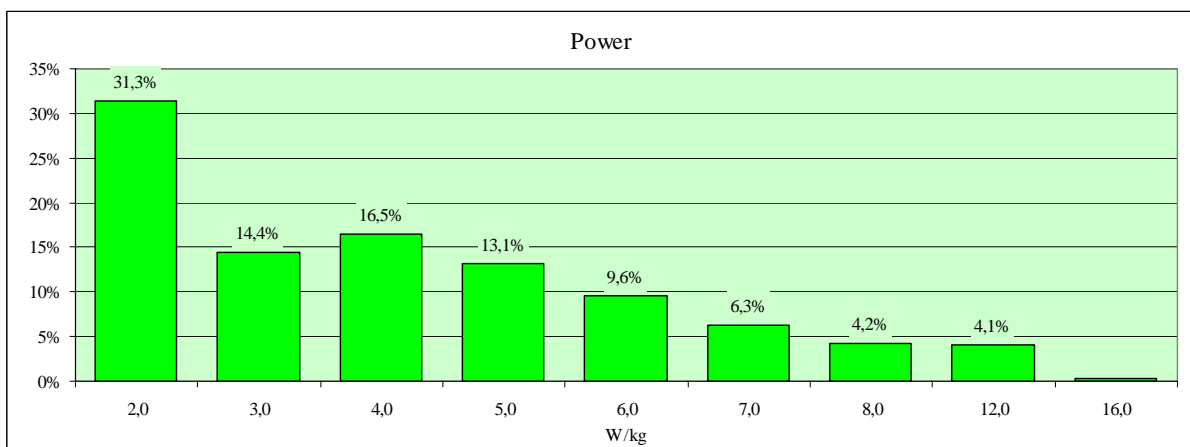


Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung der relativen Leistung bei einem Wettkampf über 150 km/3,5h.

Bei der Auswertung von Wettkampfdaten wird deutlich, dass ein großer Anteil in einem sehr niedrigen Intensitätsbereich absolviert wird. Hier wird darauf geachtet, möglichst energiesparend, im Windschatten des Feldes zu agieren. Andererseits ist deutlich erkennbar, dass die Leistung über das gesamte Spektrum verteilt ist und viel Zeit in sehr hohen Bereichen von Nöten ist, um den Wettkampfanforderungen gerecht zu werden.

Bei dieser Form der Darstellung ist jedoch nicht ersichtlich wie lange einzelne Sequenzen in bestimmten Leistungsbereichen andauern.

10% im Bereich 5 – 6 W/kg bedeutet, dass etwa 20 Minuten mit dieser Intensität gearbeitet wurde. Es kann aber nicht erkannt werden ob diese Leistung in einem Stück, oder 20 mal 1 Minute erbracht werden musste. Software gestützte Analyse ermöglicht die Anzeige von definierten Zonen und wie lange die einzelnen Abschnitte andauern.

Find #4 (498w):				
Duration:	0:54			
Work:	27 kJ			
Distance:	365 m			
	<u>Min</u>	<u>Max</u>	<u>Avg</u>	
Power:	416	629	498	watts
Heart rate:	184	195	192	bpm
Cadence:	80	88	85	rpm
Speed:	22	28.8	24.3	kph
Pace	2:05	2:44	2:28	min/km
Crank Torque:	47.1	69.2	55.9	N-m

Find #7 (607w):				
Duration:	0:24			
Work:	15 kJ			
Distance:	173 m			
	<u>Min</u>	<u>Max</u>	<u>Avg</u>	
Power:	445	757	607	watts
Heart rate:	184	196	190	bpm
Cadence:	78	103	89	rpm
Speed:	20.4	35.6	25.9	kph
Pace	1:41	2:56	2:19	min/km
Crank Torque:	45.2	92.6	67.3	N-m

Tabelle 14: Auszug einer Rennanalyse; Filterkriterium: mehr als 500W zwischen 20sec und 2min. Insgesamt konnten neun entsprechende Abschnitte gefunden werden

3.2.3. Streuungsdiagramme oder Scatterplots

Die Analyse der Daten muss nicht zwingend auf Zeitbasis erfolgen. Durch die bereits erwähnte Synchroner Speicherung diverser Parameter, können diese auch in Beziehung zueinander gesetzt werden. Die Darstellung erfolgt in so genannten „Scatterplots“. Dabei wird jeder Wert eines Datensatzes in Relation zu dem gleichzeitig gemessenen Wert eines anderen Datensatzes dargestellt. In Abbildung 11 bis Abbildung 14 wurde bereits gezeigt wie sich der biologische Parameter Herzfrequenz zu dem Physikalischen Parameter Leistung verhält. Auch die Leistungs – Geschwindigkeits Beziehung zeigt, dass vor allem in Wettkämpfen, kein Zusammenhang dieser Parameter zueinander besteht. Bei sehr hohen Geschwindigkeiten in Abfahrten ist die Leistung sehr niedrig. Beim Fahren im Feld kann mit geringer Leistung durch Windschattenfahren die Geschwindigkeit entsprechend hoch sein. Andererseits ist bei Anstiegen die Geschwindigkeit niedriger und die Leistung steigt deutlich an.

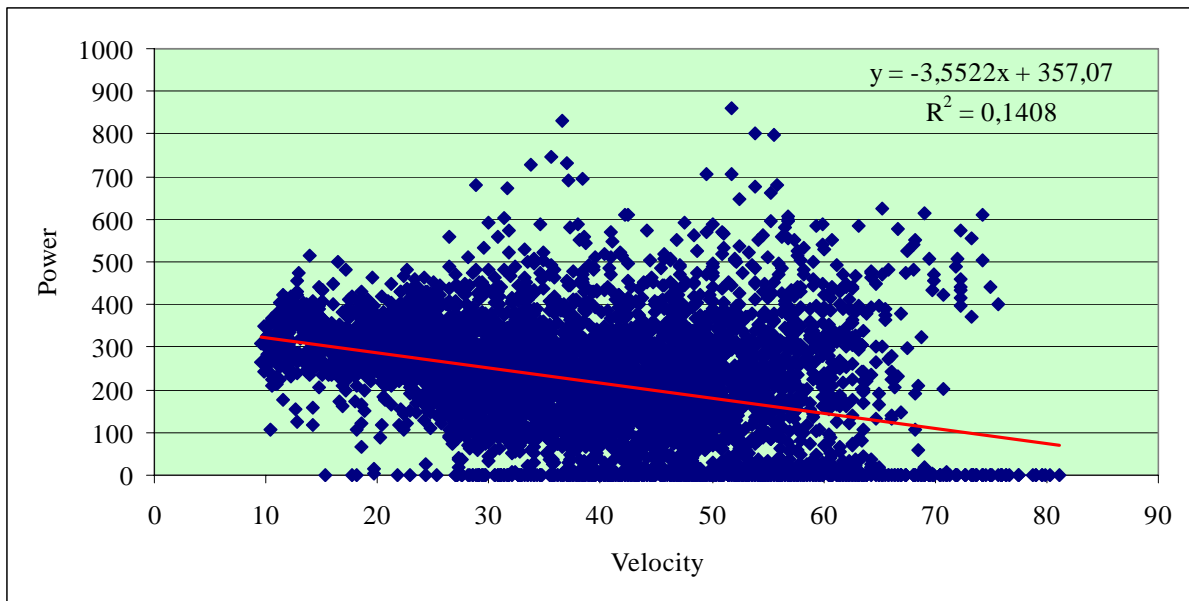


Abbildung 25: Leistung vs. Geschwindigkeit bei einem Rennen über 190km und 3000Hm

In Abbildung 25 ist zu erkennen, dass bei einem schweren Rennen über 190km mit 3000 Höhenmetern, die Beziehung zwischen Leistung und Geschwindigkeit sogar negativ ist. Damit wird verdeutlicht, dass die Geschwindigkeit keinen Rückschluss auf die Belastungsintensität zulässt. Zwei weitere Beispiele sind in Abbildung 26 und Abbildung 27 zu sehen.

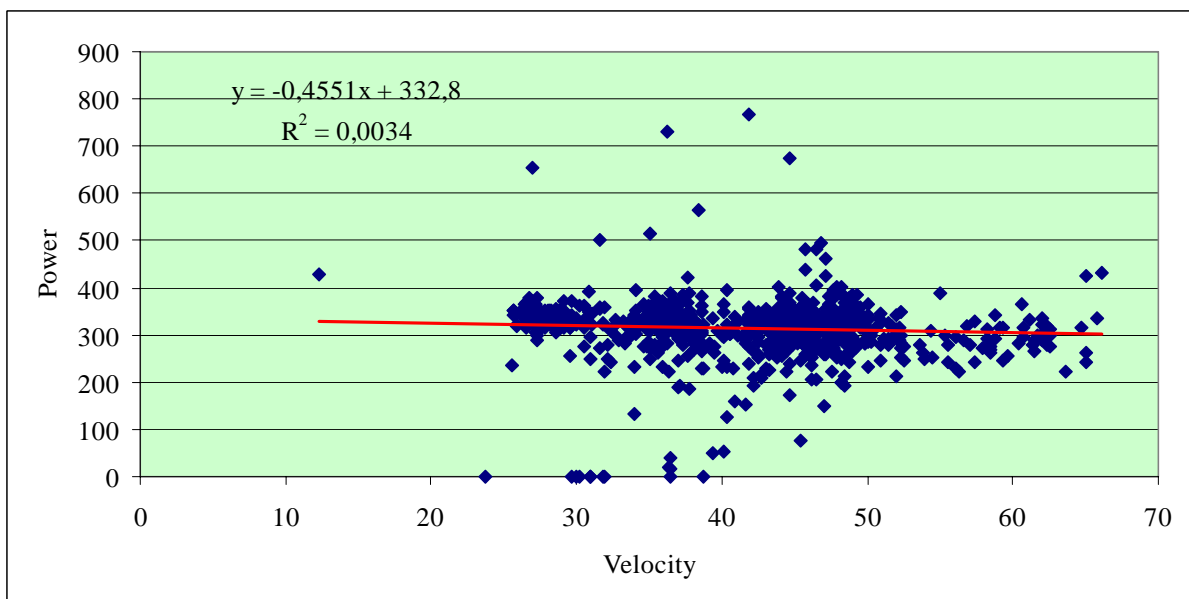


Abbildung 26: Leistung vs. Geschwindigkeit bei einem Einzelzeitfahren

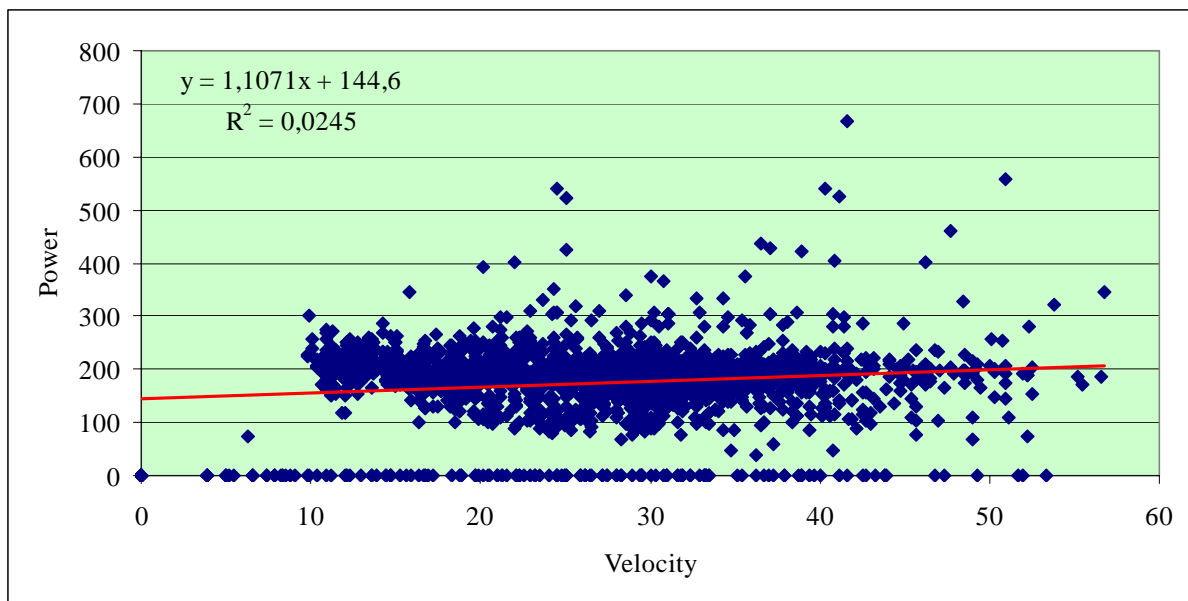


Abbildung 27: Leistung vs. Geschwindigkeit bei einem Grundlagenausdauertraining über 5h

Bei der Betrachtung von Scatterplots ist jedoch nicht nur der Zusammenhang zweier Parameter zu erkennen, sondern auch wie stark die Streuung bei verschiedenen Anforderungen ist. Bei Straßenrennen ist die Streuung naturgemäß sehr groß, während beim Einzelzeitfahren die Leistung sehr eng um das tolerierbare Maximum von etwa 300 Watt verteilt ist. Unabhängig von der Geschwindigkeit und somit vom Streckenprofil, versucht der Sportler die Leistung in relativ konstantem Bereich zu halten. Ähnlich wie beim Grundlagenausdauertraining, bei dem der Athlet ebenfalls versucht den geplanten Trainingsbereich anzusteuern.

3.2.4. Segmentanalyse

Auf der Basis von Scatterplots, können weiterführende Analysen von Daten erfolgen. Besondere Aufmerksamkeit wird hier dem Wertepaar Leistung und Tretfrequenz geschenkt. Der Zusammenhang dieser Parameter ermöglicht die Beurteilung des neuromuskulären Verhaltens. Hierbei wird ersichtlich mit welcher Umdrehung welche Leistung realisiert wird und somit kann die Kraft – Geschwindigkeitsbeziehung zu jedem Messpunkt berechnet werden. Kraft **und** Geschwindigkeit sind die beiden Parameter die letztlich die Höhe der Leistung bestimmen und treten daher stets parallel zueinander in Erscheinung.

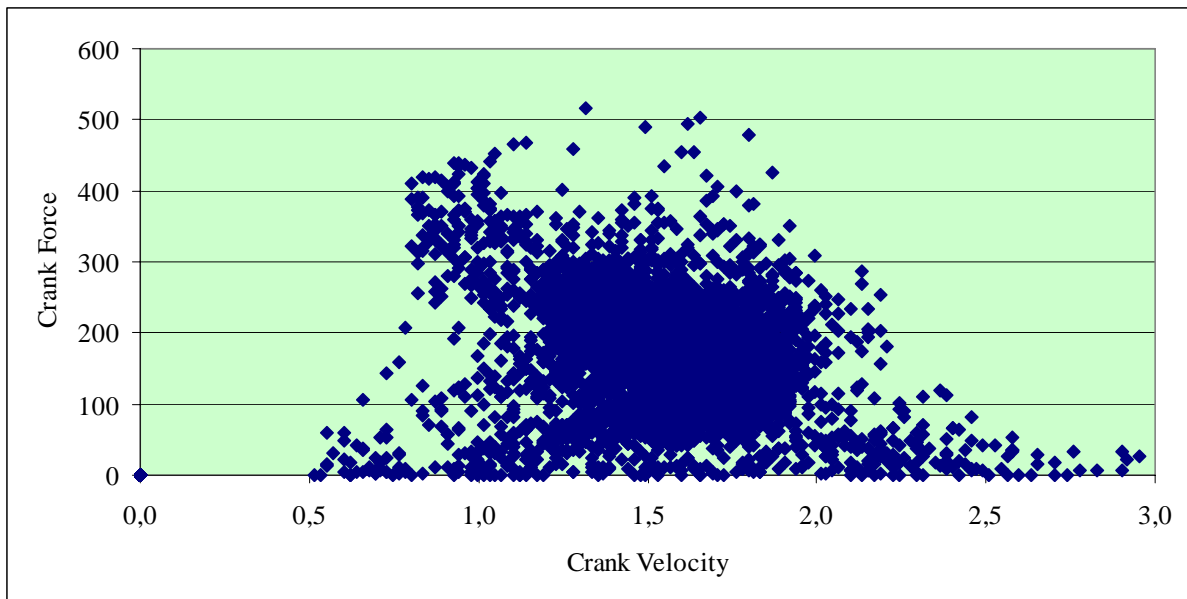


Abbildung 28: Berechnete Kraft – Geschwindigkeitsbeziehung bei einem Rennen über 190km und 3000Hm

Aufgrund der im Radsport üblicheren gemeinsamen „Sprache“ werden im Rahmen dieses Skriptums die Leistung und die Tretfrequenz zur weiteren Betrachtung gezeigt.

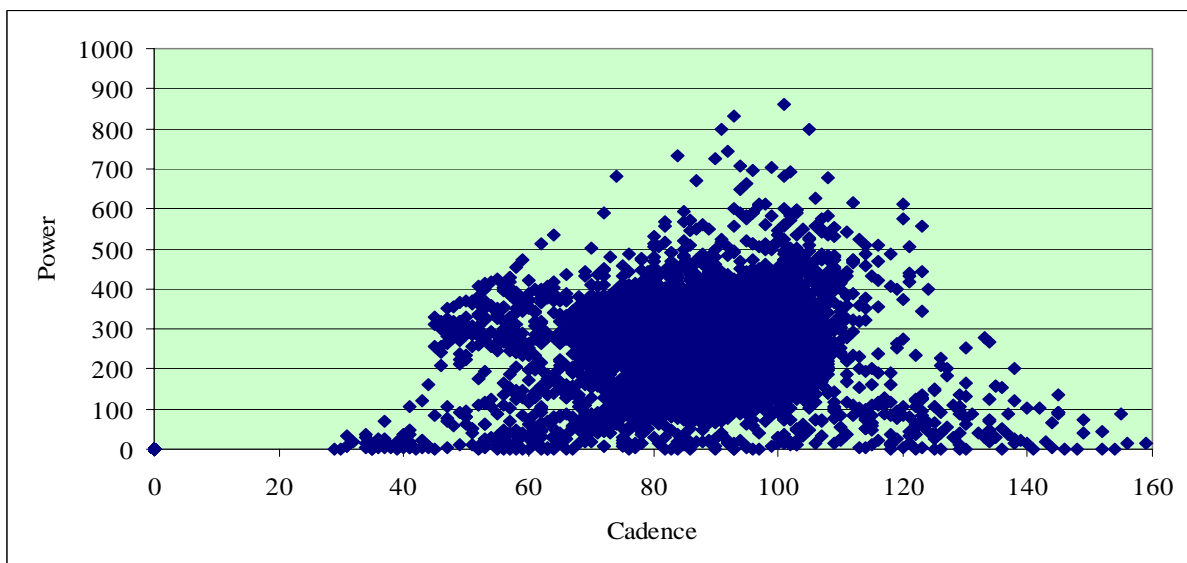


Abbildung 29: Leistungs – Tretfrequenzbeziehung bei einem Rennen über 190km und 3000Hm

Zu dieser bereits bekannten Darstellung als Scatterplot, können nun weitere Kennlinien zur Differenzierung eingezeichnet werden. In der praktischen Anwendung haben sich hier je zwei Werte auf der X bzw. Y Achse bewährt. Auf der Leistungsachse sind dies die mittlere Leistung bei einem Grundlagentraining (P_{Basic}) und die in Abschnitt 3.1 erwähnte P_{LT} . Auf der Achse der Tretfrequenz 60 und 90 Umdrehungen/min.

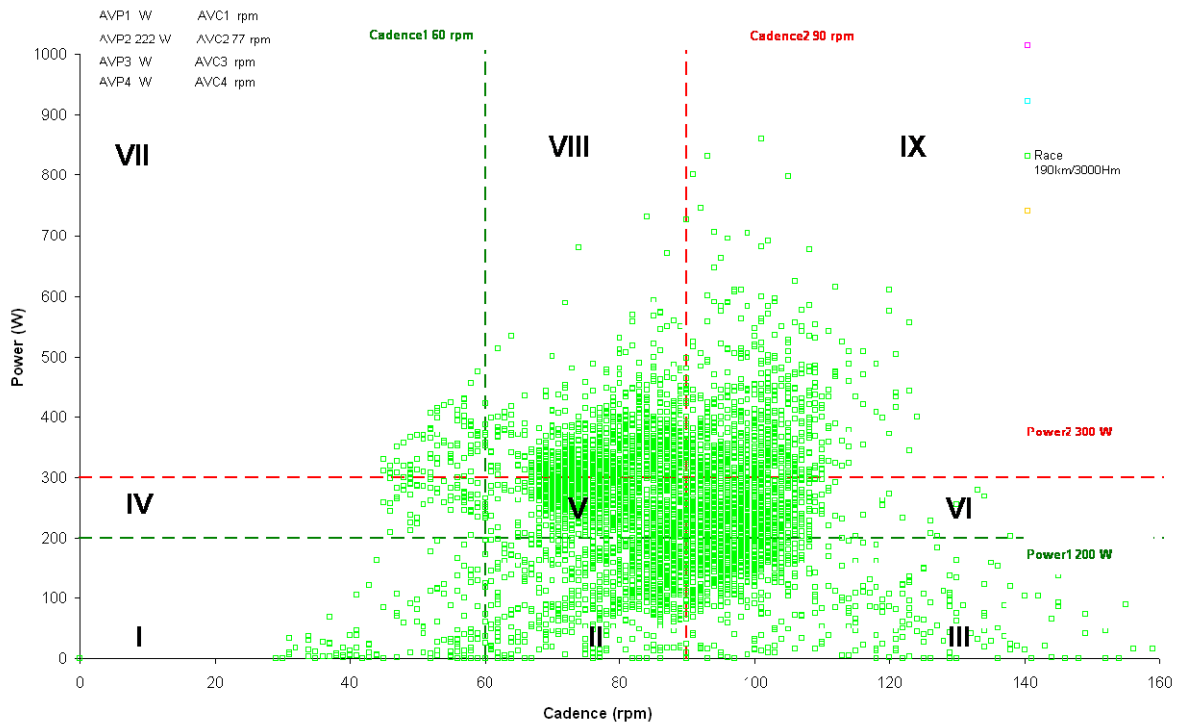


Abbildung 30: Leistung – Tretfrequenzbeziehung bei einem Rennen über 190km und 3000Hm mit Kennlinien zur Segmentanalyse

Durch die so eingefügten Linien entstehen neun Segmente die einen Einblick in die muskulären Anforderungen von Training und Wettkampf geben. Die Kenntnis der spezifischen Wettkampfanforderungen, ermöglicht eine individuelle Trainingsplanung mit Angaben zu Leistung und Tretfrequenz. Beide Parameter haben in Kombination miteinander Einfluss auf die Reaktion des Organismus und somit auf die physiologischen Adaptationen. Durch Berechnung und Darstellung in den bereits erwähnten Häufigkeitsdiagrammen, lässt sich die Punktwolke in einem Streudiagramm in leichter erkennbare Zahlenwerte auflösen.

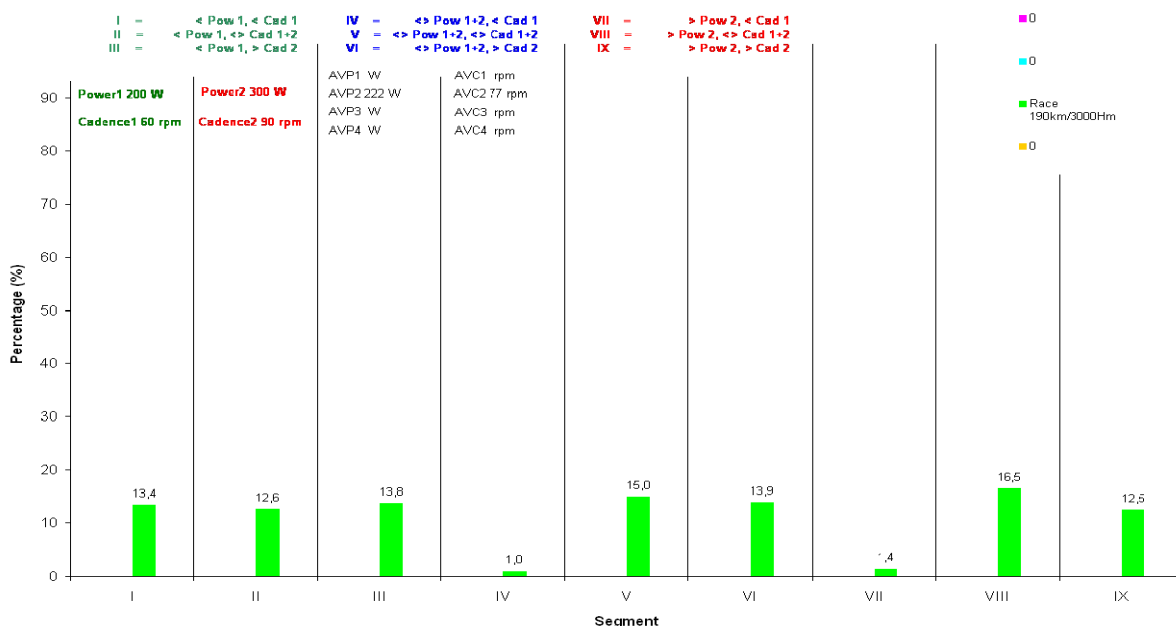


Abbildung 31: Segmentanalyse bei einem Rennen über 190km und 3000Hm

In Abbildung 31 ist die Segmentanalyse eines Rennens über 190km und 3000 Höhenmeter zu sehen. Dabei ist auffallend, dass bei sehr gleichmäßiger Verteilung über alle Bereiche, die Segmente IV + VII einen sehr geringen Anteil aufweisen. Das bedeutet, dass bei Leistungen über 200 Watt die Tretfrequenz kaum unter 60rpm gefallen ist, obwohl in drei Runden je zwei schwierige Anstiege zu bewältigen waren. Die Häufigkeit in Segment I ist typisch für eine Strecke mit vielen Höhenmetern, weil die Nullwerte in den Abfahrten einen hohen Anteil haben.

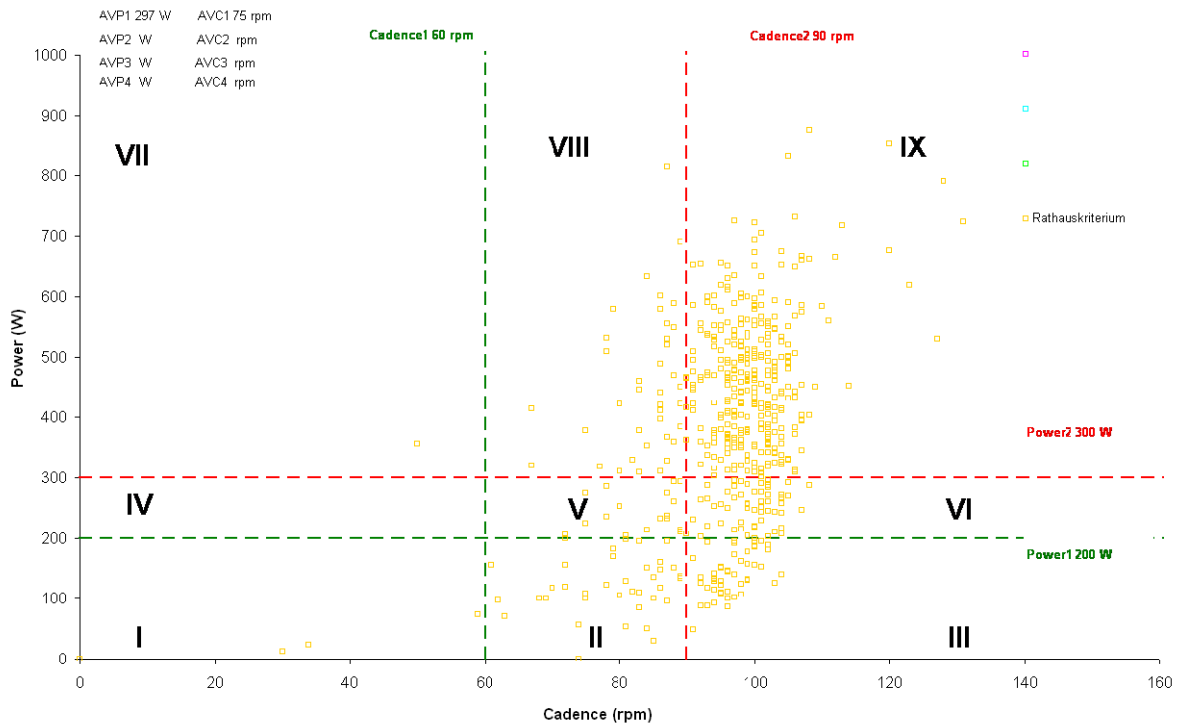


Abbildung 32: Leistungs – Tretfrequenzbeziehung bei einem Kriterium

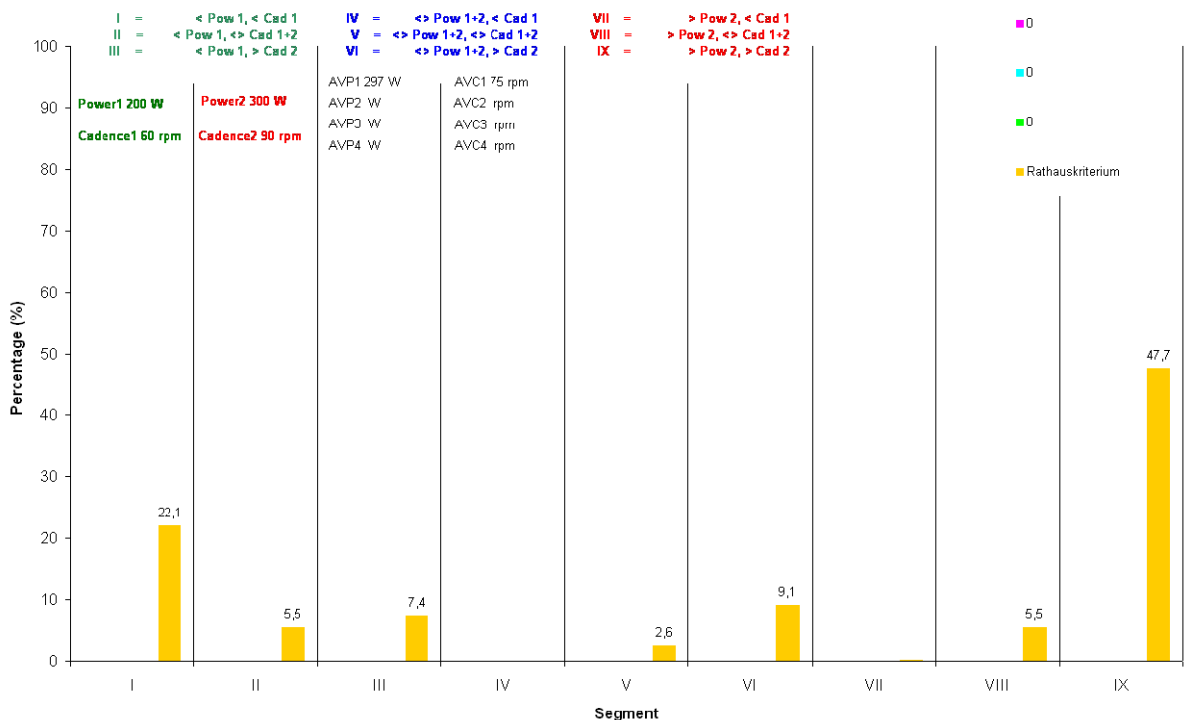


Abbildung 33: Segmentanalyse bei einem Kriterium

Bei der Analyse eines Kriteriums, sind die beiden Randsegmente am häufigsten vertreten. Besonders der Scatterplot zeigt hier, dass die Leistung häufig zwischen 400 und 600 Watt, zeitweise auch deutlich darüber liegt. In Segment I sind trotz 22% Anteils kaum Werte ersichtlich (Nullwerte).

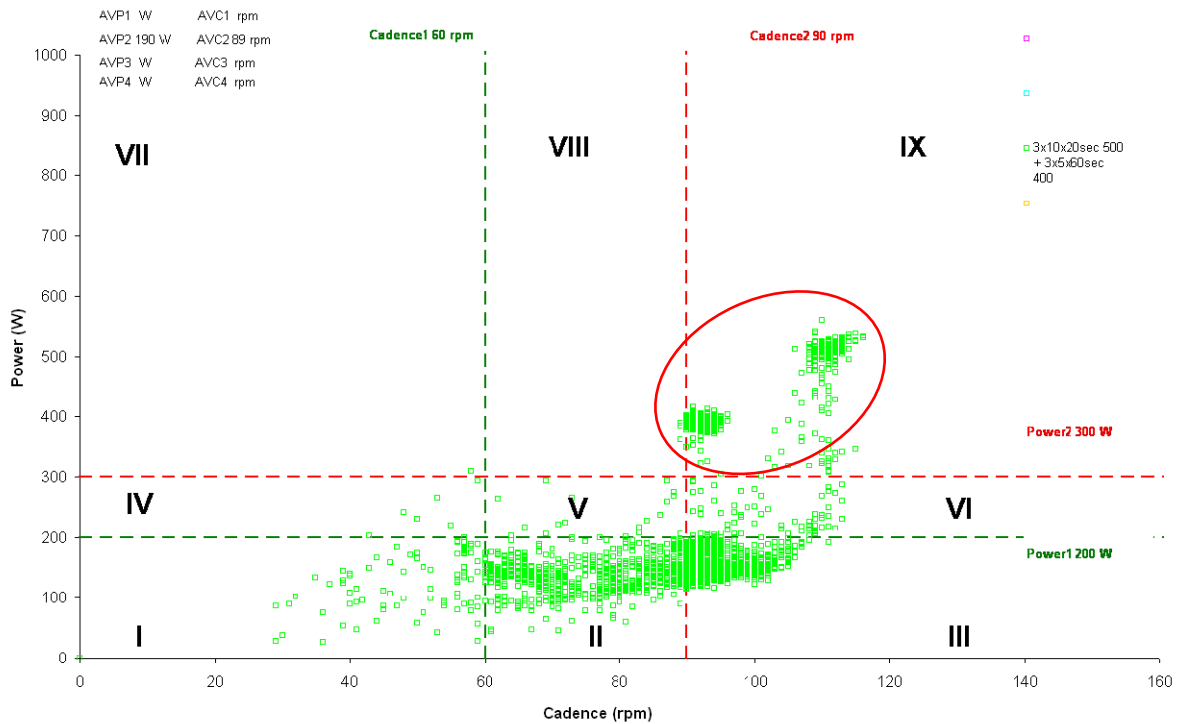


Abbildung 34: Leistungs – Tretfrequenzbeziehung bei einem Intervalltraining

Das Streudiagramm in Abbildung 34 zeigt ein Intervalltraining mit 500 Watt und 110rpm bzw. 400 Watt und 90rpm. Die beiden Punktwolken belegen die korrekte Umsetzung der Vorgaben. In Abbildung 35 ist die grafische Darstellung je einer Serie in der SRM ® Software dargestellt.

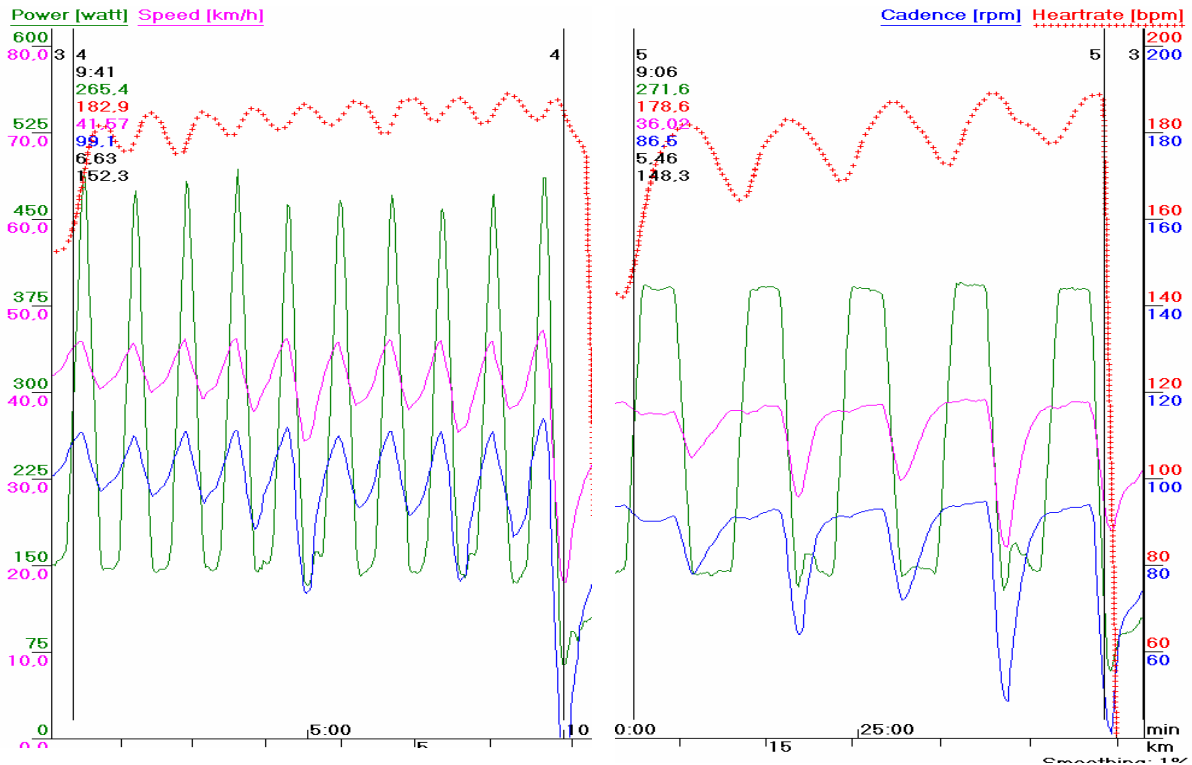


Abbildung 35: Zwei Serien eines Intervalltrainings mit 500W/110rpm bzw, 400W/90rpm

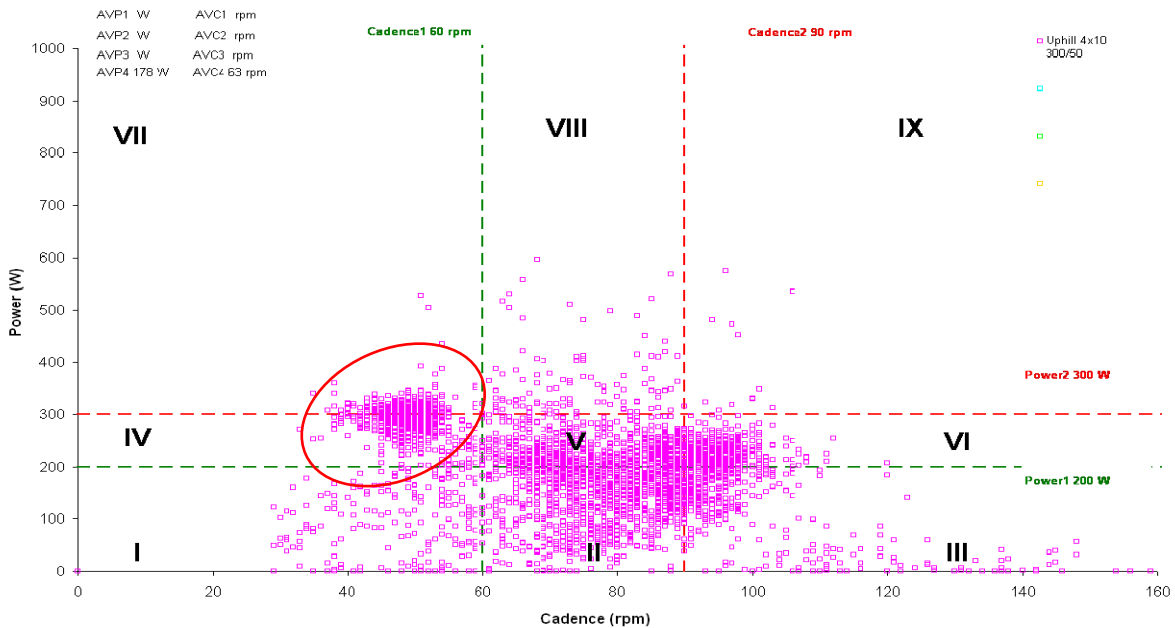


Abbildung 36: Leistung – Tretfrequenzbeziehung bei einem Bergtraining

Die Abbildung 36 zeigt ein Kraftorientiertes Bergtraining mit 4x10 Minuten 300 Watt und 50rpm. In der Segmentanalyse ist nur ein kleiner Anteil in Segment VII zu sehen, weil die Trainingseinheit insgesamt 4,5h dauerte und die Leistung im Scatterplot um 300 Watt streut. Damit weist auch der Anteil in Segment IV eine vermehrte Häufigkeit auf.

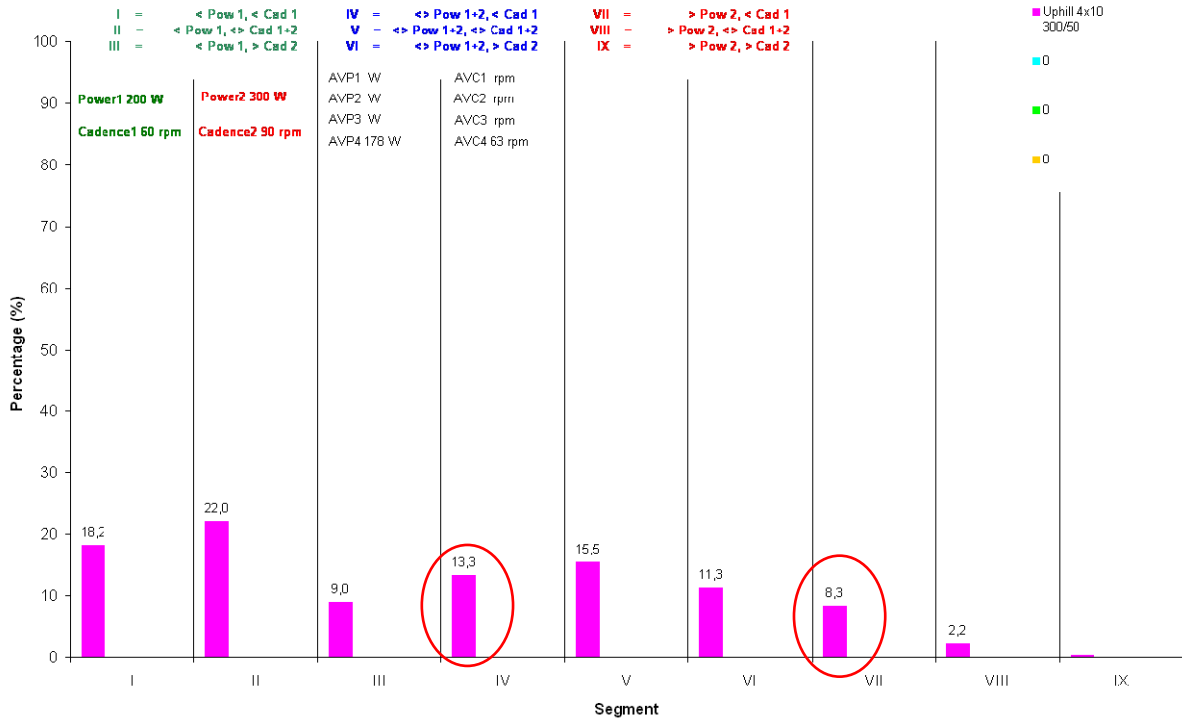


Abbildung 37: Segmentanalyse bei einem Bergtraining

Mit dieser Form der Analyse ist auch der direkte Vergleich mehrerer Dateien möglich um deren unterschiedliche Auswirkung darzustellen.

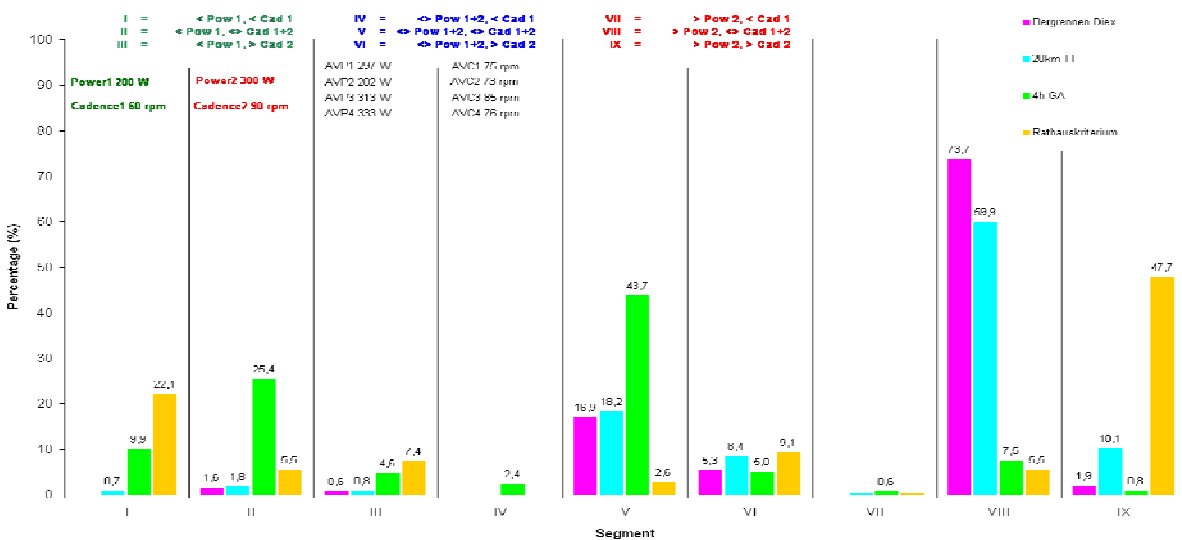


Abbildung 38: Segmentanalyse im direkten Vergleich: Bergrennen, Zeitfahren, Kriterium und Grundlagentraining

4. Schlussfolgerungen

Die physikalische Leistung hat sich als ein Parameter heraus kristallisiert, der die aktuelle Belastung sehr deutlich wiedergibt. Er gibt sowohl Auskunft über die aktuelle Leistungsfähigkeit, als auch über den Trainingsbedingten Verlauf des körperlichen Zustandes. Seitdem mobile Leistungsmesssysteme im Handel erhältlich sind, beschränkt sich die Messung nicht mehr auf Laboruntersuchungen, sondern kann im täglichen Training zum Einsatz kommen. Die mobile Leistungsmessung hat sich nicht nur zur Steuerung im Training, sondern auch im Wettkampf als taktisches Hilfsmittel und als „Pacing tool“ bewährt. Durch die synchrone Aufzeichnung mehrerer Parameter, ist eine umfangreiche Datenanalyse nach Trainingseinheiten und Wettkämpfen möglich. Im wissenschaftlichen Bereich können Untersuchungen zur Aerodynamik oder zu physiologischen Anforderungen direkt im Feld vorgenommen werden.

Einer der Nachteile der Leistungssteuerung im Training ist die hohe Variabilität, wodurch die exakte Einhaltung von Bereichen, wie sie aus der Herzfrequenzsteuerung bekannt ist, erschwert wird. Der hohe Anschaffungspreis und der zu hohe Aufwand der Datenanalyse, kann für manchen Sportler und Trainer ebenfalls ein Argument gegen Leistungsmessung sein.

Literaturverzeichnis

1. KYLE C.R. (1986), Mechanical factors affecting the speed of a cycle. In: BURKE R.E. (ed) Science of cycling. Human Kinetics, Champaign, Illinois, pp 133-135
2. GRAPPE F., CANDAU R., BARBIER B., HOFFMANN M.D., BELLI A., ROUILLON J.D. (1999), Influence of tyre pressure and vertical load on coefficient of rolling resistance and simulated cycling performance. *Ergonomics* Vol. 10: 1361-1371
3. KYLE C.R. (1996), Selecting cycling equipment. In: BURKE R.E. (ed) High – Tech cycling. Human Kinetics, Champaign, Illinois, pp 6-17
4. GRESSMANN M. (2002), Rollwiderstand. In: GRESSMANN M. *Fahrradphysik und Biomechanik*. Delius Klasing Verlag, Bielefeld, pp 47-65
5. MOGNOGNI P., PRAMPERO P.E. (2003), Gear, inertial work and road slopes as determinants of biomechanics in cycling. *Eur J Appl Physiol* 90: 372-376
6. FARIA E.W., PARKER D.L., FARIA I.E. (2005), The science of cycling, factors affecting performance – part 2. *Sports med* 35: 313-337
7. HEIL D.P. (2002), Body mass scaling of frontal area in competitive cyclists not using aero-handlebars. *Eur J Appl Physiol* 87: 520-528
8. DU BOIS D., DU BOIS EF. (1916), A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch Intern Medicine* 17:863-871.
9. SHUTER B., ASLANI A. (2000), Body surface area: Du Bois and Du Bois revisited. *Eur J Appl Physiol* 82: 250-254
10. HEIL D.P. (2001), Body mass scaling of projected frontal area in competitive cyclists. *Eur J Appl Physiol* 85: 358-366
11. GRAPPE F., CANDAU R., BELLI A., ROUILLON J.D. (1997), Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics* Vol. 40, No. 12: 1299-1311
12. BASSETT D.R., KYLE C.R., PASSFIELD L., BROKER J.P., BURKE E.R. (1999), Comparing cycling world hour records, 1967-1996: modeling with empirical data. *Med Sci Sports Exerc* 31: 1665-1676
13. MADER A., LIESEN H., HECK H., PHILIPP H., ROST R., SCHÜRCH P., HOLLMANN W. (1976), Zur Beurteilung der sportspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. *Sportarzt Sportmed*. 27: 80-88 / 109-112
14. COYLE E.F., FELTNER M.E., KAUTZ S.A. (1991), Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 23: 93-107
15. LUCIA A., PARDO J., DURANTEZ A., et.al. (1998), Physiological differences between professional and elite road cyclists. *Int J Sports Med* 19: 342-348
16. LUCIA A., HOYOS J., CHICHARRO J.L. (2001), Physiology of professional cycling. *Sports med* 31: 325-337
17. WILBER R.L., ZAWADZKI K.M., KEARNEY J.T., SHANNON M.P., DISALVO D. (1997), Physiological profiles of elite off-road and road cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1090-1094
18. BENTLEY D.J., WILSON G.J., DAVIE A.J. (1998), Correlations between peak power output, muscular strength, and cycle time trial performance in triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 38: 201-207
19. HAWLEY J.A., NOAKES T.D. (1992), Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol* 65: 79-83
20. HEIL D.P., MURPHY O.F., MATTINGLY A.R., HIGGINSON B.K. (2001), Prediction of uphill time-trial bicycling performance in humans with a scaling-derived protocol. *Eur J Appl Physiol* 85: 374-382
21. RICHARD DAVISON R.C., SWAN D., COLEMAN D., BIRD S. (2000), Correlates of simulated hill climb cycling performance. *J Sports Sci* 18: 105-110
22. BALMER J., RICHARD DAVISON R.C., BIRD S. (2000), Peak power predicts performance power during an outdoor 16.1-km cycling time trial. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1485-1490
23. NEVILL A.M., JOBSON S.A., RICHARD DAVISON R.C., JEUKENDRUP A.E. (2006), Optimal power-to-mass ratios when predicting flat and hill-climbing time-trial cycling. *Eur J Appl Physiol* 97: 424-431
24. PADILLA S., MUJIKA I., ORBANANOS J., ANGULO F. (2000), Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 32: 850-856
25. PADILLA S., MUJIKA I., ORBANANOS J., SANTISTEBAN J., ANGULO F., GOIRIENA J.J. (2001), Exercise intensity and load during mass-start stage races in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 33: 796-802

26. IMPELLIZZERI F., SASSI A., RODRIGUEZ-ALONSO M., MOGNONI P., MARCORA S. (2002), Exercise intensity during off-road cycling competitions. *Med Sci Sports Exerc* 34: 1808-1813
27. FERNANDEZ-GARCIA B., PEREZ-LANDALUCE J., RODRIGUEZ-ALONSO M., TERRADOS N. (2000), Intensity of exercise during road race pro-cycling competition. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1002-1006
28. HAGBERG J.M., COYLE E.F. (1983), Physiological determinants of endurance performance as studied in competitive racewalkers. *Med Sci Sports Exerc* 15: 287-289
29. SJODIN B., JACOBS I. (1981), Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med* 2: 23-36
30. MATTERN C.O., KENEFICK R.W., KERTZER R., QUINN T.J. (2001), Impact of starting strategy on cycling performance. *Int J Sports Med* 22: 350-355
31. JEUKENDRUP A., VAN DIEMEN A. (1998), Heart rate monitoring during training and competition in cyclists. *J Sports Sci* 16: 91-99
32. VOGT S., HEINRICH L., SCHUHMACHER Y.O., BLUM A., ROECKER K., DICKHUT H.H., SCHMID A. (2006), Power output during stage racing in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 38: 147-151