

G. Neumann

Physiologische Grundlagen des Radsports

Basics physiology in cycling

Institut für Angewandte Trainingswissenschaft Leipzig

Zusammenfassung

Das Radfahren ist eine typische Ausdauersportart, in der im Hochleistungssport die größte Zahl an Trainingsstunden im Jahr erreicht wird. Die Geschwindigkeit beim Radfahren repräsentiert nicht direkt die Leistungsfähigkeit des Sportlers, da sie durch zahlreiche Widerstandskomponenten beeinflusst wird. Zu diesen zählen: Hangabtriebskomponente, Rollreibung und Luftwiderstand. Der Luftwiderstand hat auf die Fahrgeschwindigkeit den größten Einfluss. Das Fahren im Windschatten spart bis 40% an Energie. Die Glykogenspeicher in Muskulatur und Leber reichen nur für intensive Belastungen von 90 bis 120 min Dauer, so dass eine zusätzliche Nahrungs (Kohlenhydrat-) und Flüssigkeitsaufnahme bei längeren Belastungen notwendig wird. Die erforderliche Kohlenhydrataufnahme pro Stunde Belastung beträgt 40 bis 60g. Die in Muskulatur und Fettgewebe eingelagerten Freien Fettsäuren sichern bei mehrstündigen Belastungen über 70% des Energiebedarfs. Radfahren ist eine ideale Sportart für die Prävention. Die Belastungsintensität ist durch die individuelle Herzschlagfrequenz (Hf) am besten zu steuern. Bei einer Hf von 110 bis 150/min wird im Fitnesport mit Sicherheit die aerobe Stoffwechsellage eingehalten.

Schlüsselwörter: Radsport, Leistungsstruktur, Trainingsbelastung, Energieverbrauch, Prävention

Einleitung

Die Grundlage des Radsports bildete die geniale Erfindung des *Freiherrn Drais von Sauerbronn*, der 1818 seine Laufmaschine erfand. Nach technischen Weiterentwicklungen des Rades wurden bereits Mitte des 19. Jahrhunderts erste Rennen gefahren. Die Geburtsstunde der berühmten Tour de France geht auf das Jahr 1903 zurück. Aus dem anfänglich bevorzugten Straßenradrennfahren haben sich inzwischen viele Einzeldisziplinen etabliert, die auf dem Programm von Weltmeisterschaften oder Olympischen Spielen stehen (Tab. 1). Der traditionsreiche Radsport ist längst kein Privileg des Leistungssports, er wird über alle Altersklassen von beiden Geschlechtern betrieben. Inzwischen ist das Radfahren auch Bestandteil von Kombinationssportarten, wie z.B. Triathlon, Duathlon und Wintertriathlon. Das Fahrrad hat sich deshalb so rasant durchgesetzt, weil mit demselben Energieaufwand eine 4 mal schnellere Fortbewegung gegenüber dem Laufen erreicht wird. Veranschlagt man beim Gehen von 5 km/h (1,4 m/s) einen Leistungsaufwand von 50 W, so erreicht

Summary

Cycling is a typical endurance-based sport and among the elite sports with the highest number of annual training hours. Cycling speed does not always indicate the athlete's performance potential. Speed is influenced by several resistance components: slope resistance, rolling resistance and air resistance. Air resistance has the greatest influence. Drafting saves up to 40% of energy. The glycogen stores in muscles and liver are only sufficient for intensive efforts lasting 90 to 120 min. Additional food (carbohydrate) and fluid intake is required for longer exercise. The amount of carbohydrate intake needed during cycling is 40-60g per training or race hour. During long-term exercise about 70% of the free fatty acids are oxidised from local muscular energy stores and adipose tissues. Cycling is an ideal sport for prevention. Individual heart rate values are the best way to control load intensity. Aerobic metabolism is guaranteed in fitness sport with a heart rate of 110 to 150 b/min.

Key words: cycling, performance structure, load, energy consumption, prevention

man mit der gleichen Energie auf dem Rad eine Geschwindigkeit von 20 km/h (5,6 m/s).

Für die einzelnen Radwettbewerbe sind zahlreiche spezielle Radkonstruktionen entwickelt, die zur schnelleren Fortbewegung unter den jeweiligen Radfahrbedingungen dienen. Das typische Straßenrennrad wiegt heute weniger als 9 kg. Das gegenwärtige Trendrad ist das Mountainbike. Die Popularität erklärt sich gegenwärtig dadurch, dass der zunehmende Autoverkehr den Radfahrer auf der Straße gefährdet. Durch das Fahren im verkehrsarmen Gelände, mit teilweise hohem Erlebniswert, steigt die Beliebtheit dieser Art Radfahren im Fitnesport.

Das bevorzugte Vergleichsmaß der Leistungen ist die Geschwindigkeit, die in $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ angegeben wird. Die Radfahrgeschwindigkeit ist jedoch nicht repräsentativ für die aufzubringende Leistung bzw. den Energieverbrauch, da zahlreiche physikalische Gesetzmäßigkeiten diese beeinflussen (5). Auf die Leistung beim Radfahren haben mehrere Faktoren Einfluss. Die für das Radfahren verantwortlichen Widerstandskräfte sind vereinfacht dargestellt folgende:

- Hangabtriebskomponente: $F_0 (\sin \alpha)$, die abhängig von Körpergewicht und Radgewicht bei Anstieg und Abfahrt wirkt.
- Rollreibung: $F_1 (v)$, die von Fahrgeschwindigkeit, Reifenprofil und Straßenbelag abhängt.
- Luftwiderstand: $F_2 (v^2)$, repräsentiert den zu überwindenden Fahrtwind und wird von Einzel- und Gruppenfahrt sowie Sitzposition beeinflusst.

Aus diesen Faktoren setzt sich die Radleistung zusammen. Wird der Begriff der Leistung (P) verwandt, dann muss jede einwirkende Widerstandskraft (F_0 , F_1 und F_2) mit der Geschwindigkeit multipliziert werden.

$$P = F_{\text{gesamt}} \cdot v \text{ bzw. } P = F_0 (v) + F_1 (v^2) + F_2 (v^3)$$

Mit der Zunahme der Radfahrgeschwindigkeit wird der Luftwiderstand zum entscheidenden Bremsfaktor und damit auch für den Energieverbrauch (3). Demnach erhöht sich der Energieverbrauch mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit auf dem Rennrad mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit (Abb. 1). Durch die Anpassung der Haltung an ein aerodynamisch konstruiertes Rad ist mit einer Geschwindigkeitserhöhung von 3% zu rechnen (3). Durch das Fahren in der

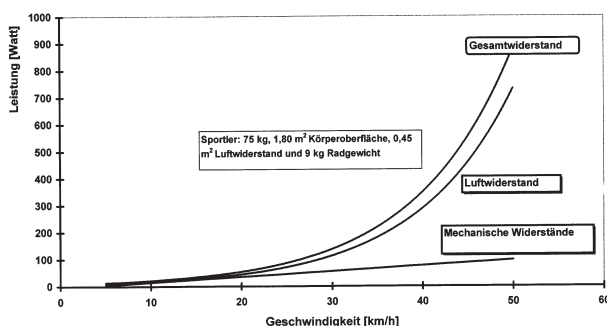


Abbildung 1: Abhängigkeit der zu überwindenden Widerstände beim Radfahren mit zunehmender Geschwindigkeit. Der größte Bremswiderstand geht vom Luftwiderstand aus. Rollwiderstand und Hangabtriebskomponente sind auf der Ebene von untergeordneter Bedeutung (modif. nach 6).

Gruppe und Abwechslung in der Führungsarbeit kann die aufzubringende Leistung bzw. der Energiebedarf beim Radfahren deutlich vermindert werden (Abb. 2). Ähnlich wirkt die Sitzhaltung auf den Luftwiderstand beim Radfahren. Die Windauffangfläche, die in aufrechter Sitzposition etwa 0,6 m² beträgt, kann sich bei stark gebeugter Haltung auf 0,38 m² vermindern (5). Da die Luftdichte temperaturabhängig ist, ergibt sich, dass bei ansteigender Außentemperatur die Luftdichte sinkt. Bei einer Lufttemperatur von 20°C ist der Luftwiderstand um 8 % niedriger als bei 0°C (5). Die Radfahrleistung wird auch von der Körpermasse beeinflusst. Bei einem vergleichbaren aeroben Leistungsniveau haben leichtgewichtige Radrennfahrer (unter 65 kg) bei Bergetappen Vorteile gegenüber den schwereren Fahrern (über 75 kg). Hingegen haben schwerere Athleten beim Zeitfahren auf flachen Strecken Vorteile (28). Bei Gruppenfahrten überwiegen taktische Gegebenheiten und Erfahrungen der Sportler, so dass die Einflüsse der Körpermasse weniger zur Geltung kommen.

Die ständige Leistungszunahme im Radsport ist an der Entwicklung des Stundenweltrekords erkennbar, der seit 1996 bei 56,4 km·h⁻¹ liegt (Abb. 3). Der Radsport gehört zu den Sportarten mit der höchsten sportartspezifischen Trainingsbelastung. Nur die Triathleten überbieten die Radsportler in der Gesamtbelastung, was durch den ständigen Sportartenwechsel (Laufen, Radfahren und Schwimmen) möglich ist. Top-Radsportler trainieren wöchentlich 800 bis 1.500 km und kommen bei 30 Stunden Training/Woche auf über 35.000 Kilometer im Jahr. Allein im Wettkampf werden jährlich 10.000 bis 15.000 km gefahren (10).

Struktur von Radsportleistungen

Die trainingsmethodischen, technologischen und biologischen Faktoren, die für das Zustandekommen der sportartspezifischen Wettkampfleistung notwendig sind, werden als Leistungsstruktur bezeichnet (Tab. 1). Der Radsport erfordert aus physiologischer Sicht eine breite Palette von organischen und funktionellen Voraussetzungen, die soweit gefährdet sind, dass eine Person nur noch in einem engen Sektor des Radsports sich spezialisieren und trainieren kann, um herausragende Erfolge zu erreichen. Die Inhalte des Trainings werden aus den Anforderungen der Leistungsstruktur abgeleitet. Die Unterschätzung der Anforderungen der Leistungsstruktur und ihrer prognostischen Entwicklung ist oft die Ursache für ein fehlorientiertes und erfolgloses Radtraining. Die Herausbildung der Leistungsstruktur für eine Spitzenleistung macht ein mehrjähriges Training notwendig. Die Anpassung in den leistungsbestimmenden Funktionssystemen und das Erlernen technisch-taktischer Voraussetzungen für Spitzenleistungen erfordert bei Sporttalenten einen Zeitraum von 8 bis 12 Jahre Leistungstraining. Das bedeutet praktisch, dass Spitzenleistungen im Straßenradrennsport

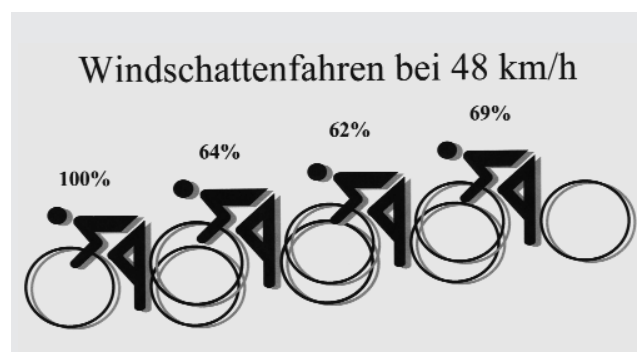


Abbildung 2: Windschattenfahren einer Vierer-Mannschaft auf der Straße. Durch das Fahren im Windschatten vermindert sich die aufzubringende Leistung deutlich und demnach der Energieverbrauch. Der Führungswechsel erfolgte alle 25 s. Daten nach Petermann (1998).

erst nach dem 25. Lebensjahr möglich sind. Der Zeitbereich, in dem eine sportartspezifische Leistung erbracht werden soll, hat sich als wesentliches Orientierungsmaß für die Inhalte des Trainings herausgestellt. Die kardiopulmonalen, metabolen und neuromuskulären Regulationsmuster unterscheiden sich in ihrer zeitlichen Beanspruchungsmöglichkeit deutlicher als in der Spezifik einer Sportart. Anders ausgedrückt, die Belastungsdauer (Wettkampf) beeinflusst die Regu-

Tabelle 1: Leistungsstruktur Rad (Wettkampf) KZA = Kurzzeit-, MZA = Mittelzeit-, LZA= Langzeitausdauer (nach 15)

Meßgrößen:	KZA 35 s-2 min 1000 m Bahn, Radsprint	MZA >2 min-10 min 3000 m Frauen, 4000 m Männer (Einzel, Mannschaft) Keirin, MB-Downhill	LZA >10 min-30 min Bergzeitfahren, Punktefahren	LZA II >30 min-90 min 30-60 km Zeitfahren, 40 km Triathlon, 30-50 km MB	LZA III >90 min-360 min 60-80 km Zeitfahren 80-250 km Straße, 180 km Lang-Triath- lon, 55-70 km MB	LZA IV >360 min >250 km Straße Mehrfachtriathlon Extremrennen >500 km
Herzfrequenz (Schläge/min)	185-205	190-210	180-195	175-190	140-180	110-150
Sauerstoffaufnahme (% VO ₂ max)	95-100	97-100	90-95	80-95	60-85	40-55
Energiegewinnung % aerob % anaerob	50 50	80 20	85 15	95 5	98 2	99 (1)
Energieverbrauch** kcal/min kcal gesamt	55-60 60-70	40-45 150-230	22-28 280-660	20-25 750-1800	12-20 1800-9900	8-12 8600-12000 (24 Std. und mehr)
Laktat (mmol/l)	14-18	16-22	12-14	8-12	1,5-4	1,0-2,0
Freie Fettsäuren (mmol/l)	0,50*	0,50*	0,80	0,90-1,0	1,2-2,0	1,5-3,0
Serumharnstoff (mmol/l)	6	6	7	7-9	8-10	9-15
Cortisol (nmol/l)	200-400*	200-400*	200-450	400-800	500-900	600-1200

*Stresslipolyse (Adrenalinstress) ** abhängig von Geschwindigkeit und Körpergewicht

lationsumstellungen der Funktionssysteme stärker als die aus- geübte Sportart. Die Radsportleistung erstreckt sich über alle Zeitbereiche der funktionellen Beanspruchung, d.h. vom 200 m-Sprint auf der Bahn bis zum Dauerradfahren über 3.600 km (20facher Langtriathlon!) oder lange Etappenradrennen.

Leistungsverbesserung in den einzelnen Radsportdisziplinen wurde sowohl durch die ständige Zunahme der kondi-

Kraftausdauerfähigkeit. Im Training der aeroben Kraftausdauer Rad liegt eine entscheidende physiologische Leistungsreserve. Kennzeichen dieser Trainingsform ist ein langsames Bergauffahren über Stunden (Abb. 4). Die muskelzellulären Leistungsgrundlagen unterschieden sich zwischen den Bahn- und Straßenradrennfahrern in der genetisch vorgegebenen Verteilung der langsam kontrahierenden

Tabelle 2: Muskelfaserverteilung, Muskelfaserfläche (M. vastus lateralis) und maximale Sauerstoffaufnahme von Eliteradsportlern der DDR (nach 15).

Sporart	Anzahl	Muskelfasertyp			Muskelfaserfläche (µm ²)		VO ₂ max (ml/min·kg)
		STF (Typ I)	FTF (Typ II)	FTG (Typ IIa)	STF	FTF	
Bahnsprinter	5	66,0±5,7	34,0±5,7	32,7±4,9	9010±1600	13470±2370	65,5±3
1000 m-Zeitfahrer Bahn	5	71,6±4,8	28,4±4,8	24,9±3,3	8540±1790	12000±2170	65,7±9
4000 m-Mann- schaftsfahrer Bahn	10	78,6±4,0	21,4±4,1	23,2±3,3	7800±1500	9790±1410	75,7±4
Straßenrennenfahrer	19	79,0±5,9	21,0±5,9	20,0±4,8	6112±416	6336±256	78,9±5

tionellen Leistungsfähigkeit (sportartspezifische Leistungsgrundlagen) als auch durch die technische Weiterentwicklung des Rennrades erreicht. Zunehmend wird nach Belastungsformen zur Erhöhung der konditionellen Leistungsvoraussetzungen gesucht, die aus leistungsphysiologischer Sicht bislang nicht für möglich oder sinnvoll gehalten wurden. Ein markantes Beispiel hierfür ist die Vorbereitung auf den 4000 m-Weltrekord auf der Radrennbahn 1996 (4:11:11 min), für dessen Vorbereitung C. Boardman (UK) die Tour de France (etwa 37.000 km) absolvierte. Der leistungsphysiologische Hintergrund seiner Vorbereitung war die Entwicklung einer sehr hohen Anpassung in der aeroben

Muskelfasern (STF) und der schnell kontrahierenden Muskelfasern (FTF) in der Beinmuskulatur deutlich (Tab. 2). Die sportartspezifischen Kraftanforderungen im Straßen- und Bahnradtraining führten zur unterschiedlichen Hypertrophie in den STF und den FTF. Die Anpassungen in den Enzymaktivitäten der Muskulatur wiesen aus, dass die Straßenfahrer in der Regel einen höheren aeroben Energiedurchsatz aufweisen. Ein Indiz dafür ist das hohe Aktivitätsniveau der Citratsynthetase, einem Schlüsselenzym im Citratzyklus (Tab. 3). Der größere glykolytische Energiedurchsatz der Bahnradfahrer gegenüber den Straßenradfahrern ist am höheren Aktivitätsniveau, wesentlicher Regulatorenzyme der Glykolyse, so der Phosphoglyceratkinase (PGK), ersichtlich. Die bei der sportartspezifischen Leistungsdiagnostik messbaren Veränderungen in der aeroben Leistungsfähigkeit, wie maximale Sauerstoffaufnahme, korrelierten eng mit den Veränderungen im Aktivitätsniveau der Schlüsselenzyme des aeroben Energiestoffwechsels (8). Daraus ist ableitbar, dass die maximale Sauerstoffaufnahme

den Adaptationszustand wesentlicher Regulatorenzyeme des aeroben Energiestoffwechsels repräsentiert. Der enge Zusammenhang zwischen dem Aktivitätsniveau der PGK und der Laktatmobilisation ermöglicht, dass aus der Höhe der Laktatkonzentration bei intensiven Radbelastungen auf das

gleich. Die Höhe der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) hat für Spitzenleistungen eine Voraussetzungsfunction, denn Spitzenleistungen werden im Straßenradsport in einer Bandbreite von 75 bis 85 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ VO_{2max} erbracht. Bei Frauen im Straßenradsport liegen die Anforderungen an die VO_{2max} bei 65 bis 75 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ (16). Die VO_{2max} ist zwar ein zuverlässiges Maß für den maximal möglichen aeroben Energiedurchsatz, sie sagt aber wenig über die aerobe Basisleistungsfähigkeit des Radsportlers aus. Die im Radsport üblichen ansteigenden Stufentests mit einer Belastungsdauer von 40 bis 50 min sind repräsentativ für die Bestimmung der sportartspezifischen VO_{2max} (7). Frühere Annahmen, dass beim Radtest nur 89–93% der VO_{2max} im Vergleich zum Laufbandstufentest aufgenommen werden, sind praktisch gegenstandslos, weil für die Bestimmung der Leistungsfähigkeit nur die Belastung der sportartspezifisch trainierten Muskulatur entscheidend ist. Zudem ergaben Untersuchungen an Eliteradsportlern, dass die VO_{2max} kein guter Predictor für die aerobe Leistungsfähigkeit ist (1)

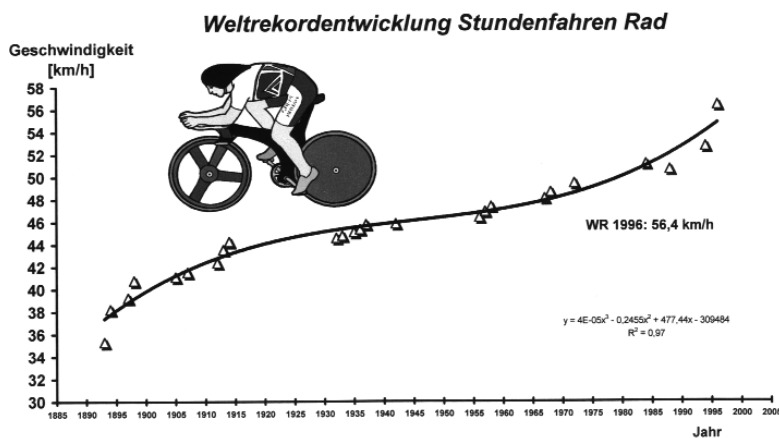


Abbildung 3: Entwicklung des Stundenweltrekordes im Radsport ab 1893. Seit 1996 steht der Weltrekord bei 56,4 km/h (Chris Boardman, England).

Anpassungsniveau von Enzymen im glycolytischen Stoffwechsel in der Muskulatur geschlossen werden kann (15).

Voraussetzungen für Spitzenleistungen im Radsport

Für stabile Radsportleistungen hat das Niveau der aeroben Leistungsfähigkeit eine entscheidende Bedeutung. Die aerobe Leistungsfähigkeit im Radsport kann zuverlässig mit zwei Messgrößen charakterisiert werden. Zum einen ist es die maximale Sauerstoffaufnahme und zum andern die Leistung auf submaximalen Belastungsstufen bei einem definierten Stoffwechselwert (Laktat) oder Herzfrequenz (Hf). Das Test-

Tabelle 3: Enzymaktivitäten im M. vastus lateralis im Bahn- und Straßenradsportlern im Hochleistungssport der DDR (nach 15).

Enzymaktivität (μmol/g FM)	Straßenradsportler (n=19)	Bahnradspportler (n=12)	Signifikanz p<
Glykogensynthetase	7,62±1,38	4,10±2,10	0,002
Phosphoglyceratkinase	174±48	274±60	0,001
Pyruvatkinase	103±22	450±48	0,001
Laktatdehydrogenase	229±72	390±114	0,001
Citratsynthetase	43,0±11,3	29,3±10,1	0,005

protokoll für Leistungssportler (BDR, Sportmedizin Freiburg) geht von Fahrradergometerbelastungen ab 100 W und Steigerungen alle 3 min um 20 W bis zum subjektiven Abbruch aus (27). Alle im Labor gebräuchlichen Fahrradergometer sind leistungsgeregelt. Profis erreichen Leistungen über 440 W beim Stufentest. Je nach Leistungszustand der Athleten und Tradition der Einrichtungen gibt es abweichende Varianten in der Testgestaltung. Die diagnostische Aussage ist aber

Belastungssteuerung

In der sportartspezifischen Leistungsdiagnostik Rad ist das wesentlichste Kriterium für die Ausdauerleistungsfähigkeit nach unseren Erfahrungen die erreichte Leistung ($W \cdot kg^{-1}$) bei 2 oder 3 mmol Laktat. Top-Radsportler erreichen in der Stoffwechsellage von 2 mmol Laktat eine Leistung von 5 $W \cdot kg^{-1}$. Aus diesem Leistungsniveau bei 2 mmol Laktat kann auch auf die aerobe Kraftausdauerfähigkeit geschlossen werden. Auf submaximalen Belastungsstufen, z.B. bei 250 W oder 3 bis 4 $W \cdot kg^{-1}$, ist die Entwicklung der Ökonomie des Ausdauertrainings, beurteilt über die Hf und/oder Sauerstoffaufnahme zuverlässig bestimmbar (1). Messungen der Kraftausdauerfähigkeit bei internationalen Radrundfahrten ergaben, dass über Bergstrecken (14,5 km, 8% Anstieg bei 1140 Höhenmetern) Leistungen von 6,2 $W \cdot kg^{-1}$ (Marco Pantani, Italien) oder 6,05 $W \cdot kg^{-1}$ (Jan Ullrich, Deutschland) erbracht wurden (22).

Interessanterweise werden die besten Bergfahrleistungen mit höherer Tretfrequenz erreicht. Das konnte auch im Experiment bestätigt werden (29). Der Zusammenhang zwischen der Radleistung und der maximalen Sauerstoffaufnahme wurde bei zunehmender Tretfrequenz besser (4). Das Erreichen einer VO_{2max} über 80 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ ist nur bei Tretfrequenzen über 100 U/min möglich. Für die weltbesten Radprofis ist die Bewältigung von 6 $W \cdot kg^{-1}$ über eine Dauer von 40 min eine reale Leistungsanforderung. Diese kennzeichnet die Anforderung der Leistungsstruktur beim Bergzeitfahren für Siege. Top Radsportler wiesen eine Kraftausdauerfähigkeit (Leistung) am Belastungsende einer ansteigenden Ergometerbelastung von > 5 $W \cdot kg^{-1}$ bei Frauen und von > 6 $W \cdot kg^{-1}$ bei Männern auf. Spitzenprofis erreichten Leistungen von über 7 $W \cdot kg^{-1}$ im Ergometerstufentest (21).

Die reale Messung der Kraftfähigkeiten beim Radfahren ist mit dem SRM-System nach *Schoberer* möglich (27). Dieses System erfasst das Drehmoment an der Tretkurbel, die Fahrgeschwindigkeit, die Tretfrequenz, die Streckenlänge, die Herzfrequenz, die Fahrzeit sowie die Leistung (W). Aus

fall bei 100 und 200 m angezeigt. Die maximale Leistung wird zwischen 30 bis 60 m erreicht. Bei 100 m beträgt der Leistungsabfall 20-30% und bei 200 m bereits 40-50%.

Sinusbelastungstest

Der Sinusbelastungstest ist ein leistungsgeregelter Test, bei dem die Belastung von einem Ausgangswert von 100 W sinusförmig auf ein vorgegebenes Maximum gesteigert wird und wieder auf die 100 W Basisleistung zurückgeht. Die Amplituden der Sinusfunktion (Leistung) können in Sprüngen von 25-100 W bis maximal 2.500 W gesteigert werden. Die Periodendauer des sinusförmigen Belastungszyklus ist zwischen 35 s bis 5 min veränderbar. Mit dieser Belastungsform werden zwei- bis zehnfach höhere Leistungen als bei üblichen Stufentests erreicht.

Linearer (rampenförmiger) Belastungstest

Mit einem linearen (stufenlos ansteigend) oder rampenförmigen (kleinstufig ansteigend) Belastungsanstieg (z.B. nach 100 W Startleistung) kann der Sportler in kurzer Zeit zum Leistungsende geführt werden. Mit diesem Testprotokoll kann der Sportler z.B. in 5 min 600 W oder in 10 min 1.000 W erreichen. Am Belastungsende können maximale Sauerstoffaufnahme oder maximale Laktatmobilisation sicherer

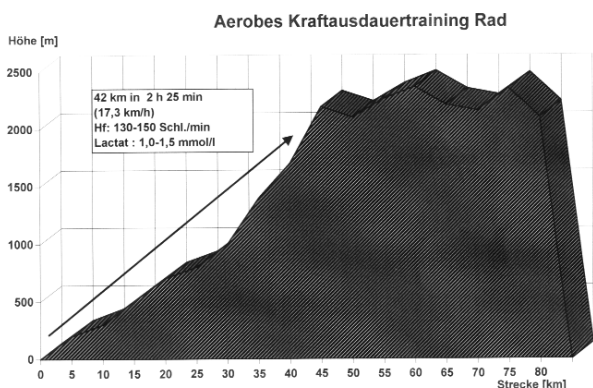


Abbildung 4: Gestaltung des Kraftausdauertrainings Rad beim Bergzeitfahren - lange Distanzen in aerober Stoffwechsellage. Durchschnittswerte der Nationalmannschaft Männer Triathlon (ach 21).

der vollbrachten Leistung und aufgewandten Tretkraft, kann das reale Leistungsvermögen des Athleten unter Feldbedingungen individuell bestimmt werden. Neben dieser Schoberer-System Komplettversion gibt es eine preiswerte Amateurversion. Neu ist ein preisgünstiges Trainings-System CYCLUS 2 nach *Richter*, welches dieselben Parameter wie das Schoberer-System und noch weitere unter stationären Laborbedingungen messen kann (21). Der Sportler benutzt sein eigenes Rennrad und kann zusätzlich alle gewünschten natürlichen Belastungsprofile, einschließlich eines vorgegebenen Luftwiderstandes, im Raum fahren. Neben Stufentestvarianten sind der isokinetische Maximalkrafttest, der Sprinttest und der Sinusbelastungstest möglich.

Isokinetischer Maximalkrafttest

Beim isokinetischen Maximalkrafttest, früher auch als Zugkrafttest bezeichnet, werden dem Sportler auf dem Ergometer (CYCLUS 2 oder Schoberer-Ergometer) 4-5 festgelegte und vergleichbare Tretfrequenzen von 50 bis 200 U/min vorgegeben. Er muss bei jeder Stufe (Tretfrequenz) seine maximale Tretkraft entfalten. Die Maximalkraft beträgt bei Spitzensportlern über 1000 N. Die maximale Testleistung beträgt > 2000 W.

Sprinttest

Der wegbezogene Sprinttest mit CYCLUS 2 orientiert sich am 200 m-Bahnsprint. Dem Sportler wird eine 200 m-Strecke vorgegeben, die er bei elektronisch verändertem Luftwiderstand maximal schnell zurücklegen muss. Zur Überwindung des Luftwiderstandes muss der Sportler eine maximale Leistung (800 bis über 2.000 W) bei Trittfrequenzen von 110 - 200 U/min erbringen. Darüber hinaus wird der Leistungsab-

Tabelle 4: Stoffwechselmeßgrößen bei unterschiedlich langen Wettkampfbelastungen im Straßenradsport (nach 20, 21)

Streckenlänge (km)	Anzahl (n)	Durchschnitts- geschwindigkeit (km/h)	Serumharnstoff (mmol/l)	Freie Fettsäuren (mmol/l)	Ketonkörper/ Betahydroxybutirat (µmol/l)
40*	12	40	7,0±2,2	7,0±2,2	50±20
100	12	37	7,8±1,3	7,8±1,3	210±30
210	6	32	9,8±2,0	9,8±2,0	450±80
300	6	27	8,8±1,4	8,8±1,4	-
540**	9	20	11,0±2,6	11,0±2,6	642±522

* Zeitfahren, ** bei einem Dreifachlangtriathlon

erfasst werden als mit dem üblichen zeitlich längeren Stufentest. Auf den klassischen Fahrradergometern (z.B. Lode-Ergometer mit hyperbolischer Leistungsregelung) werden die normalen Stufentests gefahren.

Leistung bei 2 mmol Laktat (PL2)

Ein leistungsdiagnostisch zuverlässiger Indikator für die Erfassung des Entwicklungsniveaus der Ausdauerleistungsfähigkeit ist die erreichte Leistung bei 2 oder 3 mmol Laktat (PL2, PL3) im Ergometer-Stufentest. Für die Beurteilung des Niveaus und der Stabilität der submaximalen Radleistungsfähigkeit haben PL2 oder PL3 eine große diagnostische Bedeutung für die Steuerung der Trainingsbelastung. Zusätzlich werden Hf, VO_2 und % der $VO_{2,max}$ bei PL2 als Orientierungsgrößen für das Training genutzt. Die Hf-Messung ist für die Belastungssteuerung mit dem EKG-genauen Polar-System (oder weitere Fabrikate) unentbehrlich, weil, wie bereits erwähnt, die Fahrgeschwindigkeit nicht repräsentativ für den biologischen Aufwand ist. Die Hf als unmittelbare Kontrollgröße der Beanspruchung ist die am häufigsten genutzte biologische Steuergröße im Radsport. Über die Entwicklung der trainingsinduzierten Bradykardie kann die Anpassung an die Belastungsvorgabe sicher abgeschätzt werden.

Die zentralnervale Kontrolle der Kreislauffunktion bzw. der Hf-Regulation bei Belastung wird allgemein akzeptiert (14). Mit der Hf werden die trainingsbedingten Veränderungen mehrerer physiologischer Mechanismen erfasst, die insgesamt die Auswirkungen der zentralnervalen, kardialen und metabolischen Einflussgrößen repräsentieren. Die Veränderungen in der Herz-Kreislauf-Funktion bei hohen summierenden Trainingsbelastungen können auch einen möglichen Übergang zum Übertraining darstellen (9). In der Hf repräsentieren sich die Einflüsse des vegetativen Nervensystems, der neuromuskulären Erregbarkeit, der veränderten Sensitivität der Adrenorezeptoren gegenüber den Katecholaminen, die Abnahme der intrinsischen Herzaktivität und weitere Einflüsse. Beim Radtraining wird der aerobe Stoffwechsel ($2 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ Laktat) mit Sicherheit eingehalten, wenn die Hf 110 bis 150 Schläge/min beträgt. Erst bei Überschreiten der Hf von 170/min ist mit einem Laktatanstieg über $2 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ zu rechnen.

Maximalkraft im Radsport

In speziellen Rennsituationen sind im Radsport für kurze Zeit hohe Kraftspitzen aufzubringen. Das betrifft z.B. die Beschleunigung aus dem Stand oder den Antritt beim Endspurt im Bahnrad-sport. Hierbei sind innerhalb von 10 bis 15 Sekunden kurzzeitige Leistungsspitzen von über 2000 W freizusetzen. Die offiziell maximal gemessene Kraft bei Radtests beträgt 2375 W (3,3 PS) über 5 s auf einem Fahrradergometer (Nüscheler, 1995). Die Maximalkraft ist auch Gegenstand spezieller Tests. Im isokinetischen Maximalkrafttest (z.B. bei 100 U/min) wird die maximal mögliche Tretkraft des Radsportlers gemessen. Diese Tests sind nur mit dem SRM-Ergometer und CYCLUS 2 möglich. Im Sprinttest ist die Freisetzung der Maximalkraft von der Tretfrequenz abhängig. Während Bahnrad-sprinter bei der antrainierten hohen Tretfrequenz die größte Kraft aufbringen (z.B. 2.100 W über 200 m bei 140 U/min), können die Straßenradfahrer im vergleichbaren Test nur etwa 1.200 W bei 105 U/min freisetzen (21). Der Maximal-Tretfrequenz-Weltrekord liegt seit 1990 bei 271 U/min, gehalten von M. Nüscheler (CH). Beim Vierermannschaftsfahren auf der Bahn ist in der Führungsposition eine Leistung von durchschnittlich 700 W aufzubringen. Das Fahren in der 2. bis 4. Position (Windschatten) erfordert eine Leistung von 450 W für 2,5 min, bei Geschwindigkeiten über $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (11).

Energetische Sicherung der Radfahrleistung

Die verfügbaren Glykogenvorräte leistungsfähiger Radsportler betragen in Muskulatur und Leber insgesamt 400 bis 500 g (17). Beim Umsatz von 400 g Glykogen können 1.640 kcal an Energie freigesetzt werden, die nur für maximal 50 km Radfahren mit hoher Geschwindigkeit ausreichen würden. Da praktisch auch höhere Anteile von Freien Fettsäuren (FFS) verstoffwechselt werden, ergeben sich längere Belastungszeiten. Bei allen Radsportbelastungen über 2 min Dauer überwiegt der aerobe Energiestoffwechsel (s. Tab. 1). Dieser setzt

sich bei Ausdauerbelastungen immer aus einem Mischungsverhältnis des Kohlenhydrat- und Fettumsatzes zusammen. Die Anteile werden von der Belastungsintensität (Geschwindigkeit) und Belastungsdauer entscheidend beeinflusst. Bei einer Laktatkonzentration bis $5 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ erfolgt die Energiegewinnung sowohl aus dem Kohlenhydrat- als auch Fettstoffwechsel. Bei dieser Stoffwechselsituation sind Radleistungen von 90 bis 120 min Dauer ohne zusätzliche Nahrungsaufnahme möglich. Im Radrennsport sind nach 2 Stunden die Glykogenspeicher erschöpft und die angelaufene Gluconeogenese sichert nur einen Teil des Glukosebedarfs. Um die Homöostase der Blutglukose aufrechtzuerhalten sind die Sportler gezwungen, zusätzlich Kohlenhydrate (Glukose) aufzunehmen (17, 25). Kommt es zur Hypoglykämie, dann wird die Geschwindigkeit stark vermindert oder der Sportler legt eine kurze Pause ein. Der Umsatz der FFS ist stark vom

Tabelle 5: Energieverbrauch beim Radfahren im Fitnesssport. Bezugspunkt ist eine Körpermasse von 70 kg. Bei Zunahme der Körpermasse um 10 kg erhöht sich der Energiebedarf um 2 kcal (8,4 kJ) pro Minute Belastung (aus 18)

Radfahren Geschwindigkeit von 3 min/km oder 20 km/h	kcal/h	kJ/h
1 Stunde	400	1680
2 Stunden	800	3360
3 Stunden	1200	5040
4 Stunden	1600	6720
8 Stunden	3200	13440
10 Stunden	4000	16800

Aktivierungsniveau der Glykolyse abhängig, d.h. von der Laktatkonzentration. Bei einer Laktatkonzentration über $8,4 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ wurde die Lipolyse völlig unterdrückt (2). Synchrone Bestimmungen von Laktat und FFS bei Leistungssportlern im Training und Wettkampf ergaben, dass die Grenze bei der Unterdrückung der Lipolyse durch Laktat bei Blutlaktatkonzentrationen zwischen 6 bis $7 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ liegt (21). Die Eliminationsgeschwindigkeit des bei intensiven Belastungen gebildeten Laktats kann nur durch die entsprechende Verdrängung der FFS aus der mitochondrialen Verbrennung gesteigert werden (12). Modellberechnungen ergaben, dass bereits bei $4 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ Laktat die Aktivität des Enzymkomplexes Pyruvatdehydrogenase (PDH) um 80 % vermindert wurde und die Fettverbrennung nur noch 20% beträgt (13). Die Bildung von $1 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ Laktat ersetzt energetisch während der Belastung ein Sauerstoffdefizit von $2,7 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ (12). Alle über 2 Stunden hinausgehenden Radsportbelastungen sind durch den zunehmenden Umsatz der FFS gekennzeichnet. Die für die Aufrechterhaltung der Glukosehomöostase notwendige Glukoseaufnahme wird überwiegend aus dem Umbau der während der Belastung aufgenommenen Kohlenhydrate kompensiert. Über die Glukoneogenese aus Proteinen (Aminosäuren) und Glycerol wird nur ein kleinerer Teil Glukose gewonnen. Mehrstündige Straßenradbelastungen werden energetisch zu über 70 % aus dem Umsatz der FFS abgesichert. Der erhöhte Umsatz von FFS ist aus dem erniedrigten Respiratorischen Quotienten (RQ), der dann 0,80 bis 0,73 beträgt, abschätzbar. Zum anderen kommt es mit zunehmender

Belastungsdauer zu einem Anstieg der FFS Konzentration im Blut (s. Tab. 1, 4). Während der Belastung kann die Konzentration der FFS um den Faktor 10 bis 15 zunehmen und dieses wird als Ausdruck der erhöhten Fettsäurenverbrennung gewertet (24). Trotz der Kohlenhydrataufnahme während der Belastung und der körpereigenen Glukoneogenese, nimmt die Verfügbarkeit der Kohlenhydrate bei Langzeitbelastungen ständig ab; der Kohlenhydratmangel führt zum Anstieg der Ketonkörper, besonders des Betahydroxybutyrats (BHB). Der BHB Anstieg ist immer Ausdruck unzureichender Glukoseverfügbarkeit bei der Energiewandlung. Unter diesen Bedingungen wird auch der Proteinkatabolismus drastisch gesteigert (Tab. 4). Wenn das bei der Betaoxidation der FFS entstandene Überangebot an Acetyl-CoA im Citratzyklus der Leber bei Kohlenhydratmangel nicht mehr ausreichend umgesetzt wird, dann steigt das BHB enorm an, begleitet von der Zunahme des Serumharnstoffkonzentration. Dieser Stoffwechselzustand ist um so ausgeprägter, je länger die energetische Mangelsituation andauert (s. Tab. 4). Während mehrstündiger Radsportbelastungen ist die Aufnahme von 40 bis 60 g Glukose pro Stunde zur Aufrechterhaltung der Glucosehomöostase notwendig.

Im Hochleistungsrad sport erfolgt ein großer Teil der Energieaufnahme während der Belastung. Bei längeren Etappenradrennen wird etwa die Hälfte der täglichen Energieaufnahme auf dem Rennrad fahrend aufgenommen (25, 26). Der Gesamtenergieverbrauch ist entscheidend von der Belastungsdauer und dem Streckenprofil abhängig. Bei einer durchschnittlichen Renngeschwindigkeit von 40 km·h⁻¹ in der Gruppe werden 800 bis 1.200 kcal·h⁻¹ benötigt. Ein 4 Stunden Radrennen erfordert einen Energieaufwand von etwa 4.000 kcal (6). Bei hochrangigen Etappenradrennen (z.B. Tour de France) ist ein täglicher Energiebedarf von 6.000 bis 7.000 kcal/Tag notwendig. Der Energieverbrauch kann sich bei Bergetappen (Alpenpässe) bis auf 9.000 kcal/Tag erhöhen und ist durch die mögliche Energieaufnahme während des Rennens nicht vollständig abzudecken (26).

Das Radfahren ist in seinen verschiedenen Teildisziplinen eine ideale Ausgleichssportart, die zum Anstieg des Energieumsatzes durch Bewegung führt. Im Freizeitsport ist der Energieverbrauch beim moderaten Radfahren relativ gering (Tab. 5). Um präventiv einen ausreichenden Energieumsatz durch körperliche Aktivität zu erreichen, müssten wöchentlich über 5 Stunden Rad bei 20 km·h⁻¹ gefahren werden. Durch die schonende Belastung des Stütz- und Bewegungssystems ist das Radfahren eine zu favorisierende Sportart für die Prävention und auch Rehabilitation. Die Herz-Kreislauf Belastung ist beim Radfahren moderat und erreicht niedrigere Werte als beim Lauf. Durch Nutzung der Gangschaltung kann die fehlende Kraft auf profilierten Fahrstrecken ausgeglichen werden.

2. Boyd, A.E., Giamber, S.R., Mager, M. Lebovitz, H.E. : Lactate inhibition of lipolysis in exercising man. *Metabolism* 23 (1974) 531-542
3. Capelli, C., Rosa, G., Butti F., Ferretti G., Veicsteinas, A. di Prampero, P.E. Energy cost and efficiency of riding aerodynamics. *Eur. J. Appl. Physiol.* 67 (1993) 144 149
4. Francescato, M.P., Girardis, M., di Prampero, P.E. : Oxygen cost of internal work during cycling. *J. Appl. Physiol.* 72 (1995) 51-57
5. Gressmann, M.: *Fahrradphysik und Biomechanik*. 4.Aufl. Moby Dick Verlag, Kiel 1990.
6. Hagberg J., McCole, S. : Energy expenditure during cycling. In: Burke, E.R. (ed.): *High-tech Cycling*. pp. 167-184. Human Kinetics, Champaign 1996
7. Howley, E.T., Basset JR, D.R., Welch, I-I.G. : Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27 (1995) 1292-1301
8. Ivy, LL, Costill, D.L. Maxwell, B.D. : Skeletal muscle determinants of maximum aerobic power in man. *Eur. J. Appl. Physiol.* 44 (1980) 1-8
9. Lehmann, M.J., Lormes, W., Opitz-Gress, A., Steinacker, J.M., Netzer, N., Forster, C. Gastmann, U. : Training and overtraining- an overview and experimental results in endurance sports. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 37 (1997) 7-17
10. Lindner, W.: *Erfolgreiches Radsporttraining*. BLV-Verlag, München 1993
11. Lychatz, S. (1997): *Persönliche Information*.
12. Mader, A. : Die Komponenten der Stoffwechselleistung in den leichtathletischen Ausdauerdisziplinen - Bedeutung für die Wettkampfleistung und Möglichkeiten zu ihrer Bestimmung. In: Tschiene, P. (Hrsg.): *Neue Tendenzen im Ausdauertraining. Informationen zum Leistungssport Bd. 12. Bundesausschuß Leistungssport, Frankfurt/M.* 1994
13. Mader, A. Heck, H. : A theorie of the metabolic origin of anaerobic threshold. *Int. J. Sports Med.* 7 (1986) Suppl. 1, 45-65
14. Mitchell, J.H.: Cardiovascular control during exercise: central and reflex neural mechanisms. *Am. J. Cardiol.* 55 (1985) D34-D41
15. Neumann, G. : Der Einfluss sportlicher Beanspruchung auf den Stoffwechsel, die Temperaturregulation und den Wasser- und Elektrolytgehalt. In: Strauzenberg, S.E., Gürtler, H., Hannemann, D. Tittel, K. (Hrsg.). *Sportmedizin*. S. 89-142. J. A. Barth, Leipzig 1990.
16. Neumann, G.: Cycling. In: *Endurance in sport*. Shephard, R.J., Åstrand, P.-O. (eds). pp. 582-596. Blackwell Scientific Publications, Oxford 1992
17. Neumann, G. : Dosierung und Nutzen von Kohlenhydrataufnahmen bei Ausdauerbelastungen. In: Engelhardt, M., Franz, B., Neumann, G., Pfützner, A. (Hrsg.). 10. Internationales Triathlon-Symposium Bad Endorf 1995. S. 7-22. Czwalina, Hamburg 1996
18. Neumann, G. : *Ausdauerbelastung*. J.A. Barth, Leipzig 1991
19. Neumann, G., Pfützner, A. Hottenrott, K. : *Alles unter Kontrolle*. 6. Aufl. Meyer Meyer, Aachen 2000
20. Neumann G, Volk O: Metabole und hormonelle Auswirkungen eines Dreifachlangtriathlons. In: Engelhardt, M., Franz, B., Neumann, G., Pfützner, A. (Hrsg.): 13. Internationales Triathlon - Symposium Erbach 1998, S.21-42. Czwalina, Hamburg 1999
21. Neumann, G., Pfützner, A. *Berbalk, A. : Optimierte Ausdauertraining*. 2. Aufl. Meyer & Meyer, Aachen 1999
22. Nüscheler, M.: *Der Rollensprinter (CH)*. Nr. 149, H. 11, 1999,
23. Petermann, A. *Persönliche Information*. Daten ehemaliges FKS Leipzig.
24. Paul, P. : Effects on long lasting physical exercise and training lipid metabolism. In: Howald, H. Portmans, J.R. (ed.). *Metabolic adaptation to prolonged physical exercise*. pp. 156-193. Birkhäuser, Basel 1975
25. Saris, W. H. M. : Nutrition and Top Sport. *Int. J. Sports Med.* 10 (1989) S1-S76
26. Saris, W. H. M., Erp Baart, M. A., Brouns, F., Westertep, K.P. *Ten Hoor, F.* Study on food intake and energy expenditure during extreme sustained exercise: The Tour de France. *Int. J. Sports Med.* 10 (1989), Suppl. S25-S31
27. Stockhausen, W.: *Medizin*. In: *Handbuch Radsport*. Weiß, Ch. (Hrsg.). S. 429-479. BLV-Verlag, München 1996
28. Swain, D.P. : The influence of body mass in endurance bicycling. *Med. Sci Sports Exercise* 26 (1994) 58-63
29. Swain, D.P. Wilcox, J.P. : Effect of cadence on the economy of uphill cycling. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24 (1992) 1123-1127

Literatur

1. Barbeau, P., Serresse, O. Boulay, M.R. : Using maximal and submaximal aerobic variables to monitor elite cyclists during a season. *Med. Sci. Sports Exerc.* 25 (1993) 1062-1069

Anschritt des Autoren
Prof. Dr. G. Neumann
Institut für Angewandte Trainingswissenschaft,
Fachgruppe Sportmedizin
Marschnerstr. 29, 04109 Leipzig