

135508

E. Jakob/I. Arratibel/W. Stockhausen/G. Huber/J. Keul:

# Die Herzfrequenz als Kenngröße der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung \*

## 1. Einleitung

Die maximale Sauerstoffaufnahme ( $VO_{2max}$ ) als globale kardiozirkulatorische und metabolische Kenngröße gilt als Bruttokriterium der maximalen aeroben Leistungsfähigkeit (KEUL u.a. 1979). Hochtrainierte Athleten sind in der Lage, Leistungen im Bereich ihrer  $VO_{2max}$  längstens 15 bis 20 Minuten (DI PRAMPERO 1986) durchzuhalten.

In Ausdauerdisziplinen wurde die Bestimmung der Leistungsfähigkeit an der anaeroben Schwelle aus verschiedenen Gründen immer bedeutsamer. Mehrere Studien zeigen, daß sich die Leistungsfähigkeit an der anaeroben Schwelle im Verlaufe des Trainingsprozesses in größerem Maße verbessert als die maximale Leistungsfähigkeit ( $VO_{2max}$ ), darüber hinaus ist die Korrelation zur Wettkampfleistungsfähigkeit häufig enger (CONCONI u.a. 1986; HENRITZE u.a. 1985; HURLEY u.a. 1984; KARLSSON/JAKOBS 1982; KUMAGAI u.a. 1982; LEHMANN u.a. 1983; RUSKO u.a. 1983; SJÖDIN/JACOBS 1981; TANAHA u.a. 1983).

Die Bestimmung der anaeroben Schwelle setzt in Abhängigkeit vom Meßverfahren (CONCONI u.a. 1982; HECK u.a. 1985; KEUL u.a. 1981; MADER u.a. 1976; SCHMID u.a. 1984; SIMON 1986; WASSERMANN 1986) nicht unbedingt eine maximale Ausbelastung voraus. Dieses ist von großem praktischen Wert zur Kontrolle der Leistungsentwicklung bei Athleten während des Trainingsprozesses, aber auch bei Einsatz im Rahmen der Rehabilitation. Dort stellt die zugrunde liegende Erkrankung häufig eine Kontraindikation für eine maximale Ausbelastung dar.

So kann die Leistungsfähigkeit bei der anaeroben Schwelle in der Tat als besser zu bestimmende Kenngröße als die  $VO_{2max}$  angesehen werden, zumal es sich nicht um vollständig unabhängige Variablen handelt.

Die Bestimmung der anaeroben Schwelle erfolgt über die Laktatleistungskurve durch Messung von Blutlaktatkonzentrationen während körperlicher Arbeit, wobei in der Literatur verschiedene Berechnungsmodelle beschrieben sind (BEAVER u.a. 1985; HECK u.a. 1985; KEUL u.a. 1981; KINDERMANN u.a. 1979; MADER u.a. 1976; DI PRAMPERO 1986). Die Schwellenbestimmung über spirometrische Größen (BEAVER u.a. 1985; VAGO u.a. 1987) ist im wesentlichen auf Laboruntersuchungsverfahren angewiesen. Von CONCONI (1982) wurde ein weiteres Verfahren der nicht-invasiven Schwellenbestimmung über die Herzfrequenzleistungskurve veröffentlicht.

Für die sportpraktische Arbeit sind leistungsdiagnostische Beurteilungen im Feldtest neben Untersuchungen im Labor unerlässlich (HECK u.a. 1986; JAKOB u.a. 1986; KEUL u.a. 1979; SCHMID u.a. 1984; SIMON 1986). Sie bieten den Vorteil der sportartspezifischen Belastung. Es können relevante Fragestellungen, wie der Einfluß technischer Veränderungen am Sportgerät im Hinblick auf eine Ökonomisierung der Körperarbeit unter Belastung, beantwortet werden (KEUL u.a. 1979). Ein Nachteil des Feldtests kann der geringere Grad der Standardisierung sein. Konsequente Beschäftigung und Erfahrung mit einem Testablauf werden den möglichen Fehler gering halten.

Bewährt hat sich die Beurteilung der Leistungsentwicklung an der anaeroben Schwelle durch Erstellung der Laktatleistungskurve im Feldstufentest, worüber wir bereits berichtet haben (SCHMID u.a. 1984). Das Verfahren ist sicher nicht für alle Trainingsgruppen praktikabel, da ein biochemi-

sches Labor zur Laktatbestimmung zur Hand sein muß. Im folgenden soll daher auf die nicht-invasive Bestimmung der anaeroben Schwelle anhand der Herzfrequenzleistungskurve eingegangen werden.

## 2. Untersuchungsgut und methodisches Vorgehen

Die eigenen bisherigen Untersuchungen mit dem Conconi-Test (JAKOB u.a. 1984) oder der Bestimmung der anaeroben Schwelle über die Herzfrequenzleistungskurve basieren auf Feldversuchen im Radsport (200m-Holradrennbahn, Öschelbronn) und Laborexperimenten mit dem drehzahlunabhängigen, elektrisch gebremsten Fahrradergometer und motorgetriebenen Laufbandergometer (Fa. Jäger, Würzburg).

In Abhängigkeit von der Testart wird die Leistung in kleinen Schritten wie bei einem Stufentest gesteigert und am Ende der jeweiligen Belastungsstufe die Herzfrequenz gemessen.

Stufenlänge: 400 m  
Stufenzuwachs: 0,2 km/h  
Durchmesser des Hinterrades: 27 Zoll

Stufe	v (km/h)	Stufendauer (min-s)	Trittfrequenz bei Übersetzung				
			49/16	50/16	49/15	50/15	51/15
1	30,0	48,0	76	75	72	70	69
2	31,2	1-43,2	79	78	75	73	72
3	32,4	2-18,6	83	81	77	76	74
4	33,6	3-01,4	86	84	80	79	77
5	34,8	3-42,8	89	87	83	82	80
6	36,0	4-22,8	92	90	86	84	83
7	37,2	5-01,4	95	93	89	87	85
8	38,4	5-38,8	98	96	92	90	88
9	39,6	6-15,2	101	99	95	93	91
10	40,8	6-50,4	104	102	98	96	94
11	42,0	7-24,6	107	105	100	98	96
12	43,2	7-58,0	110	108	103	101	99
13	44,0	8-30,4	112	111	106	103	101
14	45,6	9-02,0	116	114	109	107	105
15	46,8	9-32,8	119	117	112	110	107
16	48,0	10-02,8	122	120	115	112	110
17	49,2	10-32,0	125	123	118	115	113
18	50,4	11-00,6	128	126	121	118	116
19	51,6	11-28,6	131	129	123	121	118
20	52,8	11-55,8	135	132	126	124	121
21	54,0	12-22,4	138	135	129	126	124
22	55,2	12-48,4	141	138	132	129	127
23	56,4	13-14,0	144	141	135	132	129

Tab. 1: Trittfrequenz-Protokoll zum Feldtest auf einer 200m-Radrennbahn. Die Geschwindigkeitszunahme von Stufe zu Stufe nach 2 Runden/400 m beträgt 0,2 km/h. – Aus dem Durchmesser des Hinterrades (27 Zoll = 0,686 m) und dem Übersetzungsverhältnis von Kettenblatt und Zahnkranz (49/16 bis 51/15) läßt sich die pro Pedalumdrehung zurückgelegte Wegstrecke berechnen oder die Trittfrequenz für eine bestimmte Geschwindigkeit angeben. Über die Ansage der jeweiligen Stufen-Trittfrequenz durch einen Helfer und Kontrolle über eine Trittfrequenzanzeige am Rad durch den Athleten ist eine Steuerung der linearen Geschwindigkeitszunahme möglich.

\* Mit Unterstützung des Bundesinstituts für Sportwissenschaft, Köln.

Wir danken M. Berlis, B. Heitz und U. Köhler für die technische Assistenz.

Eingegangen: 3. 2. 1988

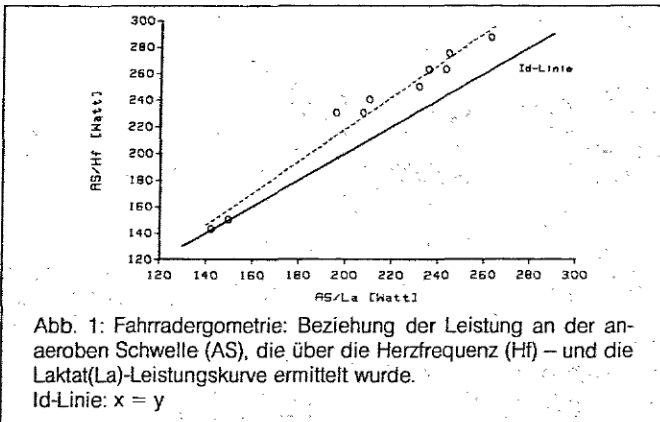


Abb. 1: Fahrradergometrie: Beziehung der Leistung an der anaeroben Schwelle (AS), die über die Herzfrequenz (Hf) – und die Laktat(La)-Leistungskurve ermittelt wurde. Id-Linie:  $x = y$

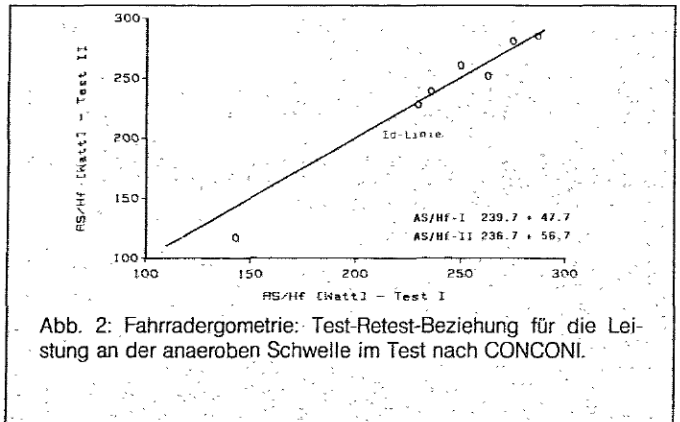


Abb. 2: Fahrradergometrie: Test-Retest-Beziehung für die Leistung an der anaeroben Schwelle im Test nach CONCONI.

Dabei wird beim Fahrradergometertest die Leistung in Watt, beim Laufbandtest die Geschwindigkeit in km/h und im Feldtest in m/s angegeben. Die Leistungssteigerung beträgt auf dem Fahrradergometer 20 Watt, die Stufendauer 1 Minute, auf dem Laufbandergometer wird um 0,5 km/h gesteigert, die Stufendauer wird entsprechend einem Feldtest auf der 400m-Bahn auf 400 m festgelegt. Die Herzfrequenz wird im Labor mittels konventionellem EKG (Fa. Hellige, Freiburg), im Feldtest mittels Telemetrie und analoger Aufzeichnung als instantane Herzfrequenz auf einen Cardiotokographen (Fa. Hewlett Packard) oder mittels Sporttester PE 3000 (Fa. Electro Oy, Finnland) gemessen.

Wichtig ist, daß der eigentlichen Testphase eine ausreichend lange Aufwärmphase vorausgeht. Im Feldtest ist es von Vorteil, wenn die Geschwindigkeitssteigerung als Ausdruck der Leistungssteigerung mittels eines Steuersystems standardisiert werden kann. So wurde in unserem Fall am Fahrrad ein Trittfrequenzmesser angebracht. Über die Beziehung Übersetzung und Trittfrequenz kann die Geschwindigkeit berechnet werden. Eine Steuerung der Geschwindigkeitszunahme über die Ansage der Trittfrequenz durch einen Helfer und Kontrolle durch den Athleten ist also möglich (Tab. 1).

Die Meßpunkte für Leistung und Herzfrequenz der jeweiligen Belastungsstufen werden in einem Diagramm mit der Herzfrequenz auf der Ordinate und der Leistung auf der Abszisse aufgetragen (CONCONI u.a. 1982; PROBST/NONELLA 1986; PROBST 1986). Bei niedriger und mittlerer Leistung besteht zur Herzfrequenz ein linearer Zusammenhang, bei hoher Leistung bricht der Zusammenhang ab (TIEDT u.a. 1973). Dieser Deflektionspunkt kann visuell bestimmt werden, er markiert die anaerobe Schwelle (CELLINI u.a. 1986; CONCONI u.a. 1982 u.1986; DROGHETTI u.a. 1985; JAKOB u.a. 1987; RIBEIRO u.a. 1985).

Es ist für den Radtest auf der Bahn von Vorteil, die Herzfrequenz gegen die zweite oder dritte Potenz der Geschwindigkeit aufzutragen, weil der nicht-lineare Kurventeil stärker abflacht und die anaerobe Schwelle exakter bestimmt werden kann (CONCONI u. a. 1986). Dabei wird berücksichtigt, daß zwischen Luftwiderstand und Geschwindigkeit sowie Energieaufwand und Geschwindigkeit beim Radfahren ebenfalls kein linearer Zusammenhang vorliegt (DI PRAMPERO 1986).

Im Laborexperiment wurde am Ende jeder Belastungsstufe Ohrkapillarblut (Fahrradergometrie) und venöses Blut über einen Katheder aus einer Handrückenvene (Laufbandergometrie) zur Laktatbestimmung entnommen (CELLINI u. a. 1986, BERGMAYER, H. U. 1970). Die anaerobe Schwelle wurde als fixe Schwelle nach der von SIMON (1986) beschriebenen Methode visuell festgelegt. Für die statistische Bearbeitung wurden arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung berechnet, Unterschiede wurden mit dem t-Test für gepaarte Daten berechnet.

### 3. Ergebnisse

Eine Fahrradergometrie erfolgte bei 14 als Breitensportler trainierten Probanden und war in zehn Fällen auswertbar (71,4 Prozent), in vier Fällen lag bei Abbruch immer noch ein linearer Frequenzanstieg vor. Die Wattleistung der anaeroben Schwelle der Herzfrequenzleistungskurve war in jedem Fall höher als die aus der Laktatleistungskurve ermittelte (Abb. 1). Im Mittelwertvergleich betrug die Leistung an AS/Hf  $230,6 \pm 54,3$  Watt, an AS/La  $212,5 \pm 40,4$  Watt.

In sieben Fällen war eine Test-Retest-Überprüfung möglich, wobei die Untersuchungen im Abstand von fünf bis acht Tagen durchgeführt wurden. Die Herzfrequenz am Deflektionspunkt unterschied sich im Mittel um 7,2 Schläge/Minute und schwankte zwischen 0 und 11 Schlägen/Minute. Die Wattleistung unterschied sich im Mittel um 3,0 Watt und schwankte zwischen 2 und 26 Watt (Abb. 2, 3). Eine Laufbandergometrie wurde bei zehn als Breitensportler trainierten Probanden durchgeführt und konnte in drei Fällen (30 Prozent) aus oben genannten Gründen nicht ausgewertet werden. Bei sieben Probanden war eine anaerobe Schwelle aus der Herzfrequenzleistungskurve zu ermitteln, die individuellen Werte für die Laufgeschwindigkeit waren in jedem Fall niedriger als die aus der Laktatleistungskurve ermittelten. Im Mittelvergleich waren die Geschwindigkeiten an AS/Hf mit  $14,3 \pm 1,0$  km/h signifikant niedriger ( $p < 0,01$ ) als an AS/La mit  $15,1 \pm 1,0$  km/h (Abb. 4).

Im Feldtest auf der Radrennbahn fanden 39 Untersuchungen statt, von welchen vier (10,3 Prozent) nicht ausgewertet werden konnten (Abb. 5). In einem Einzelfall liegen telemetrische Herzfrequenzaufzeichnungen während eines Straßenrennens über 150 km vor, nach-

dem eine Woche zuvor vom Athleten der Concini-Test absolviert wurde. Der Athlet fuhr während des Wettkampfes sehr aktiv und lag mit seiner Herzfrequenz jeweils nur über kurze Zeitspannen über der ermittelten Schwellenherzfrequenz.

### 4. Diskussion

Grundsätzlich haben TIEDT u. a. (1973) für die statische Kennlinie der Belastungsherzfrequenz bei Stufenbelastung eine s-förmige Charakteristik mit einem größeren, mittleren linearen Abschnitt aufgezeigt und den Bereich des oberen, nicht linearen Abschnitts oberhalb 170/Minute angenommen.

Der lineare Abschnitt sollte im Frequenzbereich oberhalb 120/Minute beurteilt werden. Aufgrund der Untersuchungen von CONCONI u. a. (1982, 1985, 1986) und RIBEIRO u. a. (1985) fällt der obere Deflektionspunkt mit der anaeroben Schwelle zusammen.

Unsere Untersuchungen auf dem Fahrrad- und Laufbandergometer bestätigen diesen Befund weitgehend. Dabei liegt die Leistungsfähigkeit der anaeroben Schwelle im Vergleich zur Laktatleistungskurve während der Fahrradergometrie im Mittel um 8,5 Prozent höher, bei der Laufbandergometrie im Mittel um 5,6 Prozent niedriger. Es ist anzunehmen, daß dieser systematische Unterschied durch die Methodik der Schwellenbestimmung bedingt ist, da zwischen einer fixen und individuell bestimmten Schwelle verglichen wird und eine biologische Eichung oder Bezug auf einen absoluten Standard nicht erfolgt ist.

Im Test-Retest-Verhalten weicht die Leistung der anaeroben Schwelle weniger als die Schwellenherzfrequenz vom Identitätsverhalten ab. Wie RIBEIRO u. a. (1985) fanden auch wir nur in 50 Prozent der Fälle zwei auswertbare Tests. CELLINI u. a. (1986) finden hier deutlich bessere Korrelationen. Es kann spekuliert werden, daß Probanden mit größerer spezieller Testerfahrung (RIBEIRO u. a. 1985) diese Diskrepanz erklären. In diesem Zusammenhang ist auffällig, daß die Quote nicht verwertbarer Feldtests mit Leistungssportlern deutlich niedriger lag als die der Labortests mit Breitensportlern.

Unserer Ansicht nach resultiert ein Hauptfehler für eine falsche oder unmögliche Auswertung aus einer mangelnden oder fehlenden linearen Leistungssteigerung. Vermutlich wirkt sich die stufenweise Steigerung auf

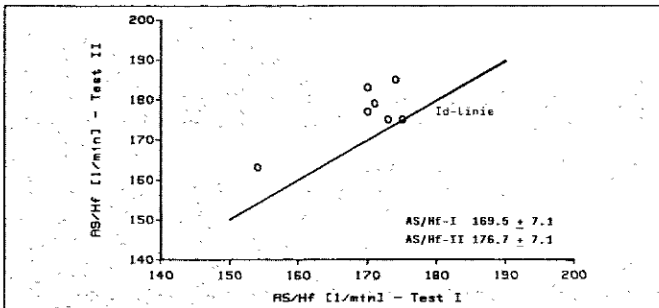


Abb. 3: Fahrradergometrie: Test-Retest-Beziehung für die Schwellenfrequenz im Test nach CONCONI.

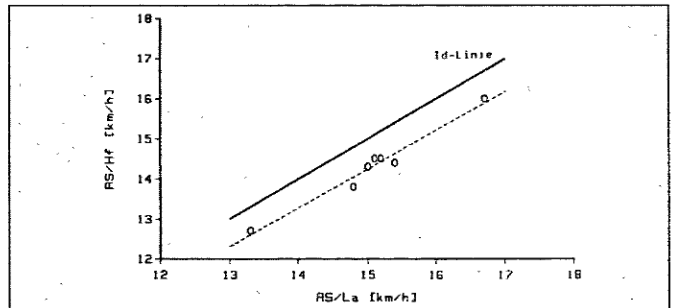


Abb. 4: Laufbandergometrie: Beziehung der Laufgeschwindigkeit an der anaeroben Schwelle, die über die Herzfrequenz- und die Laktatleistungskurve ermittelt wurde.

dem Ergometer, das innerhalb von 10 bis 15 Sekunden die angesteuerte Leistung erreicht, negativ aus, weil die Intensitätszunahme am Beginn einer Leistungsstufe und nicht kontinuierlich über sie hinweg erfolgt. Im Radfeldtest war die gleichmäßige Intensitätszunahme allerdings möglich, und eine Optimierung stellt ein Meßsystem zur Überprüfung der Leistungssteigerung dar, wie der von uns benutzte Trittfrequenzmesser. Der „biologische Fehler“ der submaximalen Herzfrequenz jedenfalls, d. i. ihre Abhängigkeit von verschiedenen äußeren Einflüssen, wird von ISRAEL u. a. (1973) als gering bezeichnet, und Änderungen von +/- vier Schlägen/Minute erscheinen ihm bereits interpretationswürdig. So schätzt er den Ein-

fluß der Körperkerntemperatur, die sich unter Belastung erhöht, bei Erwärmung um 1 Grad Celsius auf drei bis acht Schläge/Minute im Frequenzbereich zwischen 170 und 120 Schlägen ein. Diese Überlegungen weisen nochmals auf die Notwendigkeit hin, daß es seitens der Testpersonen (Athleten oder Probanden) und der Tester (Arzt und Trainer) einer eingehenden und konsequenten Beschäftigung mit dem Testablauf bedarf, um das Verfahren korrekt einzusetzen und zu bewerten. Die geschilderte Einzelbeobachtung liefert den Hinweis, daß die ermittelte Schwellenherzfrequenz in der Tat auch biologisch relevant ist, da es in einem mehrstündigen Straßenrennen nicht möglich ist, für längere Zeit

in Intensitätsbereichen jenseits der anaeroben Schwelle zu fahren. Es ist unsere Auffassung, daß das Testverfahren zumindest für den Radsport, sicherlich aber auch für leichtathletische Disziplinen, im Rahmen von Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung angewandt werden kann und somit der Herzfrequenz als Steuergröße wieder größere Bedeutung beizumessen ist; dies gilt insbesondere im intraindividuellen Vergleich. Außerdem scheint die Herzfrequenz im Schüler- und Jugendbereich eine geeignetere Kenngröße für die Trainingssteuerung darzustellen als biochemische Parameter (GAIL/WIESSPEINER 1987).

\*

Literaturliste beim Verlag erhältlich.

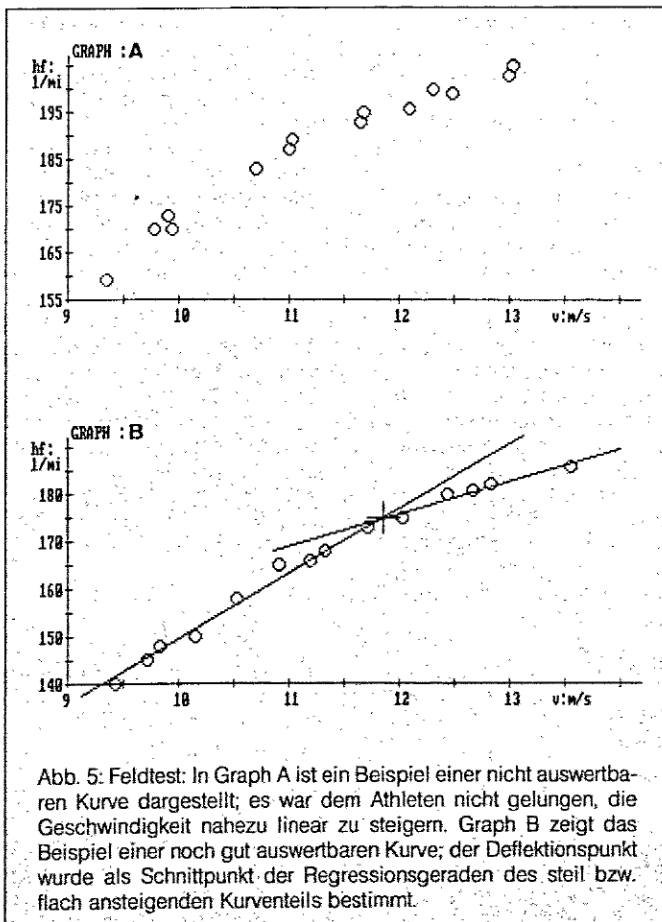


Abb. 5: Feldtest: In Graph A ist ein Beispiel einer nicht auswertbaren Kurve dargestellt; es war dem Athleten nicht gelungen, die Geschwindigkeit nahezu linear zu steigern. Graph B zeigt das Beispiel einer noch gut auswertbaren Kurve; der Deflektionspunkt wurde als Schnittpunkt der Regressionsgeraden des steil bzw. flach ansteigenden Kurventeils bestimmt.