

Laktat

Hermann Heck • Ulrich Bartmus • Volker Grabow

# Laktat

Stoffwechselgrundlagen, Leistungsdiagnostik,  
Trainingssteuerung

Mit 740 Abbildungen

Hermann Heck  
Köln, Deutschland

Ulrich Bartmus  
Bochum, Deutschland

Volker Grabow  
Witten, Deutschland

ISBN 978-3-662-59834-4      ISBN 978-3-662-59835-1 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59835-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag und die Autoren gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Fotonachweis Cover(C) Detlev Seyb

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

In dankbarer Erinnerung an  
Prof. Dr. Wildor Hollmann  
Prof. Dr. Horst de Marées

# Vorwort

---

Laktat – ein Begriff, der wie kaum ein anderer im Laufe der letzten 5 Jahrzehnte in Sportmedizin und Trainingswissenschaft eine dominante Rolle im Rahmen von Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung gespielt hat und immer noch spielt. In der leistungs- und Breitensportlichen Ausdauersportszene (Langstreckenlauf, Triathlon, Radsport etc.) mit ihren zahlreichen Magazinen und Internetforen gehören Begriffe wie „Laktatdiagnostik“ und „Laktattest“ schon lange zum Standardvokabular. Und durch die zunehmende Anwendung leistungsdiagnostischer Testverfahren auch im Fußballsport, der medien- und publikumswirksamen Sportart Nummer eins, ist dieser Begriff selbst bei sportinteressierten Laien quasi zum Allgemeingut geworden. Neuerdings finden laktatbezogene Testverfahren sogar schon im Bereich des eSports Erwähnung und Anwendung.

Über den Sport hinausgehend besitzt der Parameter Laktat in der muskelphysiologischen und stoffwechselbezogenen Grundlagenforschung, aber auch der klinischen Anwendungsforschung seinen Stellenwert. Das belegen einerseits die in der biomedizinischen Datenbank PubMed zu findenden reinen Publikationszahlen (in den vergangenen Jahren unter diesem Begriff im Mittel jeweils ca. 9000 neue Artikel pro Jahr mit steigender Tendenz), andererseits – inhaltsbezogen – die zahlreichen Arbeiten, in denen die Rolle des Biomarkers Laktat im klinischen Kontext und besonders in der Intensivmedizin (z. B. bei Gehirnverletzungen, einer Sepsis [Blutvergiftung] sowie bei verschiedenen Schockvarianten) thematisiert wird.

So einfach dieser Parameter zu erheben ist, so komplex stellt sich der damit verbundene biochemische Hintergrund im Rahmen des Energiestoffwechsels dar. Eine Fülle von internen und externen Faktoren ist bei der Interpretation von gemessenen Laktatwerten zu berücksichtigen, was entsprechende Kenntnisse voraussetzt.

In der vorliegenden Monografie wird versucht, ein umfassendes Verständnis für diesen Stoffwechselfaktor und speziell seinen Einsatz in der sportartspezifischen Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung zu vermitteln. Dabei ist die Hoffnung der Autoren, dass sowohl der grundlageninteressierte Leser als auch der, der eher den direkten Praxisbezug sucht, in den entsprechenden Kapiteln fündig wird. Inwiefern der nicht einfache Spagat zwischen wissenschaftlichem Tiefgang einerseits und anwendungsbezogenen Hinweisen andererseits gelungen ist, möge die Leserschaft entscheiden.

Die Autoren danken folgenden Kollegen für hilfreiche Kommentare: Prof. Dr. D. Böning, Dr. F. Hanakam, Prof. Dr. U. Hartmann, Prof. Dr. A. Mader, Prof. Dr. H. Schulz.

Für konstruktiv-kritische Rückmeldungen jeder Art sind die Autoren dankbar.

**Hermann Heck**

**Ulrich Bartmus**

**Volker Grabow**

Bochum

Juni 2021

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
	Literatur	4
<b>2</b>	<b>Die Bedeutung des Laktats im historischen Kontext</b>	<b>5</b>
2.1	Laktat versus Milchsäure – chemische Grundlagen	6
2.2	Entdeckung der Milchsäure	7
2.3	Milchsäure (Laktat) im 19. Jahrhundert	7
2.4	Milchsäure (Laktat) in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts	8
2.5	Laktat in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts bis heute	12
2.5.1	Leistungsmedizinisch orientierte Untersuchungsansätze	13
2.5.2	Laktatschwellenkonzepte im Rahmen von Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung	17
2.5.3	Grundlagenorientierte Untersuchungsansätze	18
2.5.4	Modellbildung	21
2.5.5	Laktat im klinischen Kontext	22
	Literatur	25
<b>3</b>	<b>Energiestoffwechsel des Muskels</b>	<b>29</b>
3.1	Adenosintriphosphat (ATP) als universelle Energiewährung des Organismus	30
3.2	ATP-Bildungswege	31
3.2.1	Anaerob-alkalazide ATP-Bildung	31
3.2.2	ATP-Bildung durch Oxidation der Nährstoffe	32
3.3	Kapazität, Leistungsfähigkeit und Erholungszeit der energieliefernden Teilsysteme	39
3.3.1	Kapazität des muskulären Energiestoffwechsels	39
3.3.2	Leistungsfähigkeit des muskulären Energiestoffwechsels	41
3.3.3	Erholungszeit der energieliefernden Teilsysteme	42
3.4	Energiestoffwechsel bei maximalen Laufbelastungen von 10 s bis 4 min	42
	Literatur	46
<b>4</b>	<b>Regulation des Energiestoffwechsels des Muskels</b>	<b>49</b>
4.1	ATP/PCr-System	54
4.1.1	Kreatinkinase-Reaktion	54
4.1.2	Adenylatkinase-Reaktion	54
4.1.3	Gleichgewichtsreaktion zwischen ATP, ADP, PCr und Cr bzw. $P_i$	54
4.1.4	Freie Enthalpie der ATP-Hydrolyse	55
4.2	Statische Kennlinien der oxidativen Phosphorylierung und der Glykolyseaktivierung	56
4.2.1	Kontrolle der oxidativen Phosphorylierung	57
4.2.2	Kontrolle der Glykogenolyse und Glykolyse	58
4.3	Bildung und Elimination des Pyruvats und des Laktats	60
4.3.1	Laktatbildung	60
4.3.2	Oxidative Decarboxylierung des Pyruvats	62
4.3.3	Berechnung der Bildungsrate des Pyruvats bzw. des Laktats ohne Kenntnis der ADP-Konzentration	63
4.3.4	Beziehung zwischen Laktatbildungsrate ( $v_{La,ss}$ ) und belastungsbezogener maximaler Laktatoxidationsrate	64
4.3.5	Berechnung der Netto-Laktatbildungsrate und der zeitabhängigen muskulären Laktatkonzentration	65
4.3.6	Grenz-Steady-State versus maximales Laktat-Steady-State	67
4.4	Einfluss der maximalen Sauerstoffaufnahme und der maximalen Laktatbildungsrate sowie von diversen Koeffizienten auf das Laktat-Zeit-Verhalten	69
4.4.1	Einfluss der maximalen Sauerstoffaufnahme auf das Laktat-Zeit-Verhalten bei Dauerbelastung	69

4.4.2	Einfluss der maximalen Laktatbildungsrate auf das Laktat-Zeit-Verhalten bei Dauerbelastung .....	71
4.4.3	Einfluss einer „variablen“ oxidativen Eliminationskonstanten $K_{el,ox}$ auf das Grenz-Steady-State .....	73
4.4.4	Wirkung des Austritts von Laktat aus dem Muskel in den Laktatverteilungsraum des Gesamtkörpers auf das Grenz-Steady-State .....	74
4.4.5	Pyruvatdefizit in Abhängigkeit von der maximalen Sauerstoffaufnahme und der maximalen Laktatbildungsrate .....	76
4.4.6	Laktatoxidationsrate in Abhängigkeit von der maximalen Sauerstoffaufnahme sowie der maximalen Laktatbildungsrate bei gleichen muskulären Steady-State-Laktatkonzentrationen .....	78
4.5	<b>Vergleich der Simulationswerte mit ausgewählten Beispielen aus der Untersuchungspraxis</b> .....	79
4.5.1	Einfluss des Belastungsschemas auf die Laktatleistungskurve .....	79
4.5.2	Laktat-Zeit-Kurven bei unterschiedlichen Ausgangswerten des Laktats verbunden mit aktiver Erholung .....	80
4.5.3	Simulation des Senkentests .....	81
4.6	<b>Laktatbildung und Laktatelimination in einem Zwei-Kompartiment-System</b> .....	82
4.6.1	Erweitertes Mader-Modell des Energiestoffwechsels .....	82
4.6.2	Laktat als $H^+$ -Ionen-Puffer? .....	85
4.6.3	Laktatbildung, Laktatverteilung und Laktatelimination in einem Zwei-Kompartiment-System .....	87
4.6.4	Laktattransporter .....	89
4.6.5	Anwendung des mathematischen Modells zur Simulation des muskulären Energiestoffwechsels im Zwei-Kompartiment-System .....	89
4.6.6	Derzeitige Limitierungen des Zwei-Kompartiment-Modells .....	101
4.7	<b>Anhang</b> .....	103
4.7.1	Lösung einer nicht linearen Differentialgleichung 1. Ordnung .....	103
4.7.2	Berechnung der zeitabhängigen Laktatkonzentration des Grenz-Steady-State .....	105
4.7.3	Berechnung der $\dot{V}O_{2,ss}$ des Grenz-Steady-State (Crossing Point) .....	105
	Literatur .....	107
5	<b>Laktatanalysemethoden</b> .....	109
5.1	<b>Analyseverfahren</b> .....	110
5.1.1	Laktatbestimmung mithilfe der Laktatdehydrogenase (LDH) .....	110
5.1.2	Laktatbestimmung mithilfe der Laktatoxidase (LOD) .....	110
5.1.3	Richtigkeit, Reliabilität und Präzision der Laktatanalyse .....	111
5.2	<b>Laktatkonzentration in den einzelnen Blutkompartimenten</b> .....	116
5.3	<b>Blutabnahme- und Behandlungsmethodik</b> .....	117
5.3.1	Blutabnahmeort .....	117
5.3.2	Blutabnahmetechnik .....	117
5.3.3	Selbstmessung des Laktats aus der Fingerbeere .....	118
5.3.4	Stabilität der Blutproben .....	119
5.4	<b>Auswertungssoftware</b> .....	119
	Literatur .....	120
6	<b>Laktat bei sportlichen Aktivitäten</b> .....	121
6.1	<b>Grundlagen</b> .....	123
6.2	<b>Laktatwerte in den leichtathletischen Laufdisziplinen</b> .....	125
6.3	<b>Laktatwerte beim Schwimmen</b> .....	128
6.4	<b>Laktatwerte beim Radsport</b> .....	130
6.5	<b>Laktatwerte beim Triathlon</b> .....	132
6.6	<b>Laktatwerte beim Rudern</b> .....	134
6.7	<b>Laktatwerte beim Kanurensport</b> .....	134
6.8	<b>Laktatwerte beim Eisschnelllaufen</b> .....	135
6.9	<b>Laktatwerte beim Skilanglauf</b> .....	137

6.10	<b>Laktatwerte in den Sportspielen</b>	138
6.10.1	Laktatwerte beim Fußball	139
6.10.2	Laktatwerte beim Handball	141
6.10.3	Laktatwerte beim Basketball	142
6.10.4	Laktatwerte beim Hockey	143
6.10.5	Laktatwerte beim Eishockey	143
6.10.6	Laktatwerte beim Wasserball	144
6.10.7	Laktatwerte beim Volleyball	144
6.10.8	Laktatwerte beim Tennis	145
6.10.9	Laktatwerte beim Badminton	146
6.10.10	Laktatwerte beim Squash	147
6.10.11	Laktatwerte beim Tischtennis	148
6.10.12	Laktatwerte beim Golf	148
6.11	<b>Laktatwerte in den Kampfsportarten</b>	149
6.11.1	Laktatwerte beim Boxen	149
6.11.2	Laktatwerte beim Judo	149
6.11.3	Laktatwerte beim Ringen	149
6.11.4	Laktatwerte beim Taekwondo	150
6.11.5	Laktatwerte beim Karate	151
6.11.6	Laktatwerte beim Fechten	151
6.12	<b>Laktatwerte in den kompositorischen Sportarten</b>	152
6.12.1	Laktatwerte beim Gerätturnen	152
6.12.2	Laktatwerte beim Trampolinturnen	153
6.12.3	Laktatwerte bei der Rhythmischen Sportgymnastik	154
6.12.4	Laktatwerte beim Eiskunstlaufen	154
6.12.5	Laktatwerte beim Synchronschwimmen	155
6.12.6	Laktatwerte beim Tanzen	155
6.13	<b>Laktatwerte in weiteren Sportarten</b>	156
6.13.1	Laktatwerte beim alpinen Skilauf	156
6.13.2	Laktatwerte beim Klettern	157
6.13.3	Laktatwerte beim Windsurfen	158
6.13.4	Laktatwerte beim Apnoetauchen	159
6.13.5	Laktatwerte beim Bobfahren	159
6.13.6	Laktatwerte beim Motorradrennsport	160
6.13.7	Laktatwerte beim Automobilrennsport	160
6.13.8	Laktatwerte beim Fallschirmspringen	161
6.14	<b>Laktatwerte im Pferdesport</b>	161
6.15	<b>Vergleichende Abschlussbetrachtung</b>	162
	Literatur	164
7	<b>Diagnostik der allgemeinen aeroben dynamischen Ausdauer</b>	169
7.1	<b>Grundlagen</b>	170
7.2	<b>Testverfahren zur Beurteilung der allgemeinen aeroben dynamischen Ausdauer</b>	171
7.3	<b>Belastungsschemata zur Beurteilung der allgemeinen aeroben dynamischen Ausdauer</b>	172
7.3.1	Belastungsmodus	172
7.3.2	Belastungssteigerung	175
7.3.3	Anfangsbelastung	175
7.3.4	Stufenhöhe	175
7.3.5	Stufendauer	176
7.3.6	Belastungsanstiegsgeschwindigkeit	176
7.3.7	Pausendauer	176
7.4	<b>Umfrage bezüglich laktatbasierter Belastungsschemata</b>	176
7.5	<b>Standardisierungsvorschläge</b>	179
7.6	<b>Wesentliche Messgrößen</b>	179
	Literatur	181



8	<b>Laktat vor, während und nach ergometrischer Belastung</b>	183
8.1	Ruheausgangswerte	184
8.2	<b>Laktat während ergometrischer Belastung</b>	186
8.2.1	Konstante Belastung (Dauerbelastung)	186
8.2.2	Stufenförmig ansteigende Belastung	190
8.2.3	Rampenförmig ansteigende Belastung	191
8.3	<b>Laktat nach ergometrischer (und sportartbezogener) Belastung</b>	192
8.3.1	Beispiele für Nachbelastungslaktatkurven	192
8.3.2	Simultane Invasion und Elimination 1. Ordnung in einem Kompartiment (Bateman-Funktion)	194
8.3.3	Kompartimentmodell von Freund et al. (1986)	197
8.3.4	Halbwertszeit des Laktats in der Erholungsphase	200
8.3.5	Laktatverhalten bei aktiver Erholung	201
8.3.6	Atypische Nachbelastungslaktatkurven	202
	Literatur	203
9	<b>Laktatschwellenkonzepte</b>	205
9.1	Wie alles begann	207
9.2	<b>Übersicht über Laktatschwellenkonzepte</b>	209
9.2.1	Aerob-anaerobe Schwelle nach Mader et al. (1976)	210
9.2.2	„Anaerobic threshold“ nach Davis et al. (1976)	211
9.2.3	Aerobe Schwelle, anaerobe Schwelle und aerob-anaerober Übergang nach Kindermann et al. (1978)	211
9.2.4	Individuelle anaerobe Schwelle nach Keul et al. (1979) und Simon et al. (1981)	212
9.2.5	„Onset of plasma lactate accumulation“ (OPLA) nach Farrell et al. (1979)	212
9.2.6	„Anaerobic threshold“ (AT1 und AT2) nach Davis und Gass (1979, 1981)	212
9.2.7	Minimaler Laktat-Sauerstoff-Quotient oder minimales Laktatäquivalent nach Berg et al. (1980)	213
9.2.8	„Lactate threshold“ nach Ivy et al. (1980)	214
9.2.9	„Onset of blood lactate accumulation“ (OBLA) nach Sjödén und Jacobs (1981)	214
9.2.10	Individueller aerob-anaerober Übergang nach Pessenhofer et al. (1981)	214
9.2.11	Individuelle anaerobe Schwelle (iaS) nach Stegmann und Kindermann (1981)	216
9.2.12	„Maximal steady state“ (MSS) nach LaFontaine et al. (1981)	218
9.2.13	„Individual anaerobic threshold“ (IAT) nach Bunc et al. (1982)	218
9.2.14	„Anaerobic threshold“ (AT) und „lactate turnpoint“ (LTP) nach Davis et al. (1983)	218
9.2.15	„Lactate threshold“ (LT) nach Coyle et al. (1983)	219
9.2.16	Maximales Laktatgleichgewicht nach Heck et al. (1982), maximales Laktat-Steady-State (maxLass) nach Heck et al. (1985b)	219
9.2.17	„Lactate threshold“ (LT) nach Beaver et al. (1985)	220
9.2.18	Crossing Point nach Mader und Heck (1986)	221
9.2.19	Individuelle anaerobe Schwelle nach Simon (1986) und Dickhuth et al. (1988)	221
9.2.20	Senkentest nach Griess et al. (1989) und Tegtbur et al. (1989)	222
9.2.21	Dmax-Methode nach Cheng et al. (1992)	223
9.2.22	Punkt der maximalen Krümmung der Laktatleistungskurve nach Hille und Geiger (1993)	224
9.2.23	„Maximal steady-state workload“ (MSSW) nach Borch et al. (1993)	224
9.2.24	Modifizierte Dmax-Methode nach Bishop et al. (1998)	225
9.2.25	„Individual anaerobic threshold“ (IAT) nach Baldari und Guidetti (2000)	225
9.2.26	„Reverse lactate threshold“ (RLT) nach Dotan (2012)	225
9.2.27	Modifizierter Laktat-Minimum-Test (mLMT) nach Wahl et al. (2017)	226
9.2.28	Modifizierter „Reverse lactate threshold“-Test (mRLT) nach Wahl et al. (2017)	226
9.2.29	Vergleichende exemplarische Betrachtung ausgewählter Schwellenkonzepte	226
9.3	<b>Maximales Laktat-Steady-State und Crossing Point</b>	227
9.3.1	Weitere Methoden zur Bestimmung des maximalen Laktat-Steady-State	227
9.3.2	Der maxLass-Laktatwert	228
9.3.3	Bestimmung des Crossing Point nach Mader und Heck (1986)	228
9.3.4	Reliabilität der Crossing-Point-Methode	233

9.4	<b>Anmerkungen zu Laktatschwellen</b> .....	233
9.4.1	Bezeichnungen von Laktatschwellen .....	233
9.4.2	Kategorien von Laktatschwellen .....	235
9.4.3	Kritische Anmerkungen zu einzelnen Schwellenkonzepten .....	240
9.5	<b>Welches Schwellenprinzip ist das „richtige“ und welches Schwellenkonzept ist das „beste“?</b> .....	249
9.5.1	Das „richtige“ Schwellenprinzip? .....	249
9.5.2	Das „beste“ Schwellenkonzept? .....	253
9.6	<b>Anhang</b> .....	254
9.6.1	Berechnung von Dmax .....	254
9.6.2	Berechnung der individuellen anaeroben Schwelle nach Stegmann und Kindermann (iaS) .....	258
9.6.3	Berechnung des Punktes der maximalen Krümmung der Laktatleistungskurve (PmK) .....	260
	Literatur .....	261
10	<b>Beziehung zwischen Laktat- und anderen Schwellenkonzepten</b> .....	265
10.1	<b>Laktat- und spirografische Schwellen</b> .....	266
10.1.1	Punkt des optimalen Wirkungsgrades der Atmung (PoW) .....	266
10.1.2	Minimaler Atemäquivalentwert .....	267
10.1.3	Respiratorischer Quotient (RQ) .....	267
10.1.4	Weitere respiratorische Schwellen .....	267
10.1.5	Vergleiche zwischen Laktatschwellen und ventilatorischen Schwellen .....	270
10.1.6	Lassen sich die ventilatorischen Schwellen kausal mit der Laktatbildung begründen? .....	277
10.2	<b>Herzfrequenzbasiertes Schwellenkonzept nach Conconi</b> .....	280
10.2.1	Bestimmungsmethode der Conconi-Schwelle .....	280
10.2.2	Bestimmbarkeit der Conconi-Schwelle .....	280
10.2.3	Validität der Conconi-Schwelle bezogen auf das Validitätskriterium Laktatschwelle .....	282
10.2.4	Laktatwerte bei Dauerbelastungen mit Conconi-Schwellenintensität .....	285
10.2.5	Kritische Anmerkungen zur Conconi-Schwelle .....	287
10.3	<b>Indirekte Bestimmung von Laktatschwellen mithilfe von Wearable Devices</b> .....	288
10.3.1	Vergleich zwischen NIRS-Schwelle und maximalem Laktat-Steady-State .....	288
10.3.2	Vergleich zwischen NIRS-Schwellen und verschiedenen Laktatschwellen .....	289
	Literatur .....	291
11	<b>Darstellungsverfahren der Laktat-Leistungs-Beziehung</b> .....	295
11.1	<b>Grundlagen</b> .....	296
11.2	<b>Praktische Anwendungen</b> .....	299
11.2.1	Verfahren zur Darstellung der Laktat-Leistungs-Werte .....	300
11.2.2	Beziehungen zwischen den Darstellungsverfahren .....	320
11.2.3	Vergleich von ausgewählten Schwellenkonzepten .....	339
11.2.4	Beziehung zwischen Leistung bzw. Geschwindigkeit und Laktat für ausgewählte Schwellenkonzepte und Darstellungsverfahren .....	351
	Literatur .....	362
12	<b>Einflussfaktoren auf die Laktatleistungskurve</b> .....	363
12.1	<b>Belastungsschema</b> .....	365
12.1.1	Belastungsanstiegsgeschwindigkeit .....	366
12.1.2	Pausendauer .....	372
12.1.3	Steigung des Laufbandes .....	373
12.1.4	Laktatsenke .....	375
12.1.5	Tretkurbelfrequenz bei der Fahrradergometrie .....	375
12.2	<b>Laufbänderfahrgang</b> .....	379
12.3	<b>Untersuchungen auf dem Laufband mit und ohne Spirograf</b> .....	380
12.4	<b>Laufflächeneigenschaften</b> .....	381
12.4.1	Unterschiedliche Laufbänder .....	381

12.4.2	Unterschiedliche Laufböden .....	382
12.4.3	„Biologische Kalibrierung“ von Laufbändern in Relation zu Feldbedingungen .....	382
12.4.4	Laufböden in trockenem und nassem Zustand .....	383
12.4.5	Untersuchungen auf Anti-Schwerkraft-Laufbändern .....	384
12.5	<b>Vorbelastung.</b> .....	385
12.5.1	Kurze intensive Vorbelastung .....	385
12.5.2	Langdauernde extensive Vorbelastung .....	386
12.6	<b>Aktive versus passive Nachbelastung</b> .....	387
12.7	<b>Umgebungsbedingungen</b> .....	388
12.7.1	Temperatur .....	388
12.7.2	Bekleidung .....	391
12.7.3	Sauerstoffpartialdruck der Atemluft (Höhe, Laktatparadox) .....	391
12.8	<b>Blutentnahmeort</b> .....	399
12.8.1	Vergleich der Laktatwerte aus Arterie und Fingerkuppe .....	400
12.8.2	Vergleich der Laktatwerte zwischen arteriellem und venösem Blut .....	400
12.8.3	Vergleich der Laktatwerte zwischen arteriellem und venösem Blut sowie Blut aus der Fingerkuppe .....	401
12.8.4	Vergleich von Blutlaktat aus dem Ohrläppchen, der Fingerkuppe und aus der Vene .....	401
12.8.5	Vergleich von Blutlaktat aus dem Ohrläppchen und aus der Vene .....	402
12.8.6	Vergleich von Blutlaktat aus der Fingerkuppe und aus der Vene .....	402
12.8.7	Vergleich von Blutlaktat aus dem Ohrläppchen und aus der Fingerkuppe .....	404
12.8.8	Vergleich von Blutlaktat aus dem Ohrläppchen, der Zehenkuppe und aus der Fingerkuppe .....	404
12.8.9	Vergleich von Blutlaktat aus dem Ohrläppchen und aus der Zehenkuppe .....	406
12.8.10	Unterschiedliche Blutentnahmeorte – eine zusammenfassende Betrachtung .....	406
12.9	<b>Ernährungszustand.</b> .....	408
12.9.1	Stufenförmig ansteigende Belastung .....	408
12.9.2	Dauerbelastung .....	412
12.10	<b>Zustand der muskulären Glykogenspeicher.</b> .....	415
12.11	<b>Nahrungsergänzungsmittel.</b> .....	418
12.11.1	Kreatin .....	418
12.11.2	Koffein .....	421
12.11.3	L-Carnitin .....	426
12.12	<b>Medikamente</b> .....	429
12.12.1	Beta-Rezeptorenblocker .....	429
12.12.2	Sympathomimetika .....	436
12.13	<b>pH-Wert.</b> .....	437
12.14	<b>Menstruationszyklus</b> .....	438
12.15	<b>Zirkardianer Rhythmus</b> .....	438
	Literatur .....	439
13	<b>Laktatleistungskurve und Testgütekriterien</b> .....	447
13.1	<b>Objektivität</b> .....	448
13.2	<b>Reliabilität</b> .....	449
13.3	<b>Validität.</b> .....	452
13.3.1	Validierung von Laktatschwellen anhand von Wettkampfwerten in Ausdauersportarten .....	452
13.3.2	Validierung von Laktatschwellen anhand der Kriteriumsvariablen maximales Laktat-Steady-State .....	458
13.4	<b>Beziehung zwischen den Hauptgütekriterien</b> .....	463
13.5	<b>Bewertung der Änderung von Schwellenwerten bei Längsschnittuntersuchungen</b> .....	463
13.6	<b>Testökonomie</b> .....	472
	Literatur .....	474

14	<b>Laktatschwellenwerte in ausgewählten Sportarten</b>	477
14.1	<b>Sportartübergreifende Betrachtung</b>	478
14.2	<b>Laktatschwellenwerte in Ausdauersportarten</b>	479
14.2.1	Leichtathletische Laufdisziplinen	479
14.2.2	Schwimmsport	485
14.2.3	Radrennsport	486
14.3	<b>Laktatschwellenwerte in Sportsportarten</b>	487
14.3.1	Fußball	488
14.3.2	Hockey	491
14.3.3	Zusammenfassende Betrachtung zu den Sportsportarten	494
	Literatur	496
15	<b>Laktat im Rahmen der Trainingssteuerung</b>	499
15.1	<b>Grundlagen</b>	501
15.2	<b>Trainingswirkungsmodelle</b>	502
15.2.1	Superkompensationsmodell nach Jakowlew	503
15.2.2	Regulationsmodell der Proteinsynthese nach Mader	504
15.2.3	Signaltransduktionsmodell	507
15.3	<b>Trainingsinduzierte Anpassungen aerob bedeutsamer Strukturen und Funktionen</b>	507
15.3.1	Atmungssystem	508
15.3.2	Herz-Kreislauf-System	509
15.3.3	Gesamthämoglobin	509
15.3.4	Muskuläre Mitochondrienmasse	509
15.3.5	Mitochondriale und glykolytische Enzyme	509
15.3.6	Glykogenkonzentration der Muskulatur	510
15.4	<b>Simulation der Wirkung von Ausdauertraining auf das Laktatverhalten während Belastung</b>	510
15.4.1	Zunahme der maximalen Sauerstoffaufnahme bei Konstanz der maximalen Laktatbildungsrate	510
15.4.2	Abnahme der maximalen Laktatbildungsrate bei Konstanz der maximalen Sauerstoffaufnahme	512
15.5	<b>Steuerung der ausdauerbezogenen Trainingsintensität mithilfe von Laktat</b>	513
15.5.1	Anfänge der schwellenbezogenen Trainingssteuerung	513
15.5.2	Schwellenbezogenes Training – Beginn eines Umdenkens	515
15.5.3	Skalierung laktatbezogener Trainingsintensitätsbereiche	521
15.5.4	Erstellung von Trainingsplänen auf der Basis von Laktatleistungskurven	525
15.5.5	Probleme bei der Erstellung von Trainingsplänen auf der Basis von Laktatleistungskurven	531
15.5.6	Glykogenverbrauch als limitierender Faktor des Trainings	535
15.5.7	Steuerung der Trainingsintensität bei Untrainierten	540
15.6	<b>Laktat in der kardialen Rehabilitation und bei Beta-Blocker-Medikation</b>	542
15.7	<b>Laktat im Rahmen von Krafttraining</b>	544
15.7.1	Grundlagen	544
15.7.2	Metabolische Reaktionen bei Kraftbelastungen	544
15.7.3	Krafttraining mit Blutflussrestriktion (Okklusionstraining)	548
15.7.4	Krafttraining und Laktatschwellen	550
15.7.5	Fazit zum Einsatz des Parameters Laktat im Rahmen von Krafttraining	550
	Literatur	552
16	<b>Die Bedeutung des Laktats im Rudersport</b>	557
16.1	<b>Anforderungsprofil Rudern</b>	558
16.2	<b>Laktatbasierte Leistungsdiagnostik im Rudern</b>	561
16.2.1	Ruderspezifische Testgeräte	562

16.2.2	Ruderspezifische Testverfahren .....	565
16.3	<b>Laktatverhalten bei ruderspezifischen Belastungen im Labor und im Feld</b> .....	568
16.3.1	Maximales Laktat-Steady-State und $P_4$ beim Rudern .....	568
16.3.2	Laktatverhalten bei ruderspezifischen Tests im Labor .....	570
16.3.3	Laktatverhalten bei ruderspezifischen Belastungen im Feld .....	583
16.4	<b>Nutzung des Parameters Laktat im Rahmen der Intensitätssteuerung in Training und Wettkampf</b> .....	587
16.4.1	Kategorisierung von Trainingsintensitäten .....	588
16.4.2	Zum Zusammenhang zwischen Bootsgeschwindigkeit und Mannschaftsleistung .....	592
16.4.3	Zum Zusammenhang zwischen Sauerstoffaufnahme und Laktatverhalten .....	594
16.4.4	Zum Zusammenhang zwischen Laktatwerten und Glykogenverbrauch beim Rudertraining .....	597
16.4.5	Bestimmung der Belastungsintensität oberhalb des maxLass mithilfe von Laktatanalysen ..	598
16.4.6	Bestimmung der individuellen Ausbelastung in 2000-m-Ruderrennen .....	601
16.4.7	Prognose von Wettkampfgeschwindigkeiten .....	603
	Literatur .....	606
17	<b>Methoden zur Beurteilung der anaeroben Leistungsfähigkeit und Kapazität</b> .....	607
17.1	<b>Dynamik der ATP-Resynthesesysteme</b> .....	608
17.2	<b>Testverfahren zur Beurteilung der anaeroben Leistungsfähigkeit und Kapazität</b> .....	612
17.2.1	Diagnostik der alaktaziden Leistungsfähigkeit .....	612
17.2.2	Diagnostik der alaktaziden Kapazität .....	612
17.2.3	Diagnostik der laktaziden Leistungsfähigkeit .....	613
17.2.4	Diagnostik der laktaziden Kapazität .....	618
17.2.5	Diagnostik der gesamten anaeroben Kapazität .....	619
	Literatur .....	625
18	<b>Diverse Aspekte</b> .....	627
18.1	<b>Laktat im Speichel</b> .....	628
18.1.1	Gewinnung der Speichelproben .....	628
18.1.2	Befunde .....	628
18.1.3	Zur Problematik der Speichelprobengewinnung .....	631
18.1.4	Zwischenfazit .....	632
18.2	<b>Laktat im Schweiß</b> .....	633
18.2.1	Schweißlaktat bei ansteigender Belastung .....	633
18.2.2	Schweißlaktat bei Dauerbelastung .....	633
18.2.3	Schweißlaktat bei hohen und niedrigen Blutlaktatkonzentrationen .....	635
18.2.4	Geschlechtsspezifische Unterschiede der Laktatkonzentration im Schweiß .....	635
18.2.5	Einfluss der aeroben Leistungsfähigkeit auf die Laktatkonzentration im Schweiß .....	636
18.2.6	Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Laktatkonzentration im Schweiß .....	636
18.2.7	Zwischenfazit .....	637
18.3	<b>Laktat und Ammoniak</b> .....	637
18.3.1	Biochemie des Ammoniaks .....	637
18.3.2	Ammoniak- und Laktatverhalten beim Stufentest .....	638
18.3.3	Ammoniak- und Laktatverhalten bei Dauerbelastung .....	640
18.3.4	Ammoniak- und Laktatverhalten im Zustand der Glykogenverarmung .....	642
18.3.5	Zwischenfazit .....	645
	Literatur .....	646
19	<b>Zusammenfassende Abschlussbetrachtung</b> .....	647
	Literatur .....	652
	<b>Serviceeteil</b>	
	Stichwortverzeichnis .....	655