



Paul Haber

Leitfaden zur medizinischen Trainingsberatung

Rehabilitation
bis Leistungssport

4. Auflage

**Jetzt neu:
Übungen zur
medizinischen
Trainings-
therapie**



Springer

Leitfaden zur medizinischen Trainingsberatung

Paul Haber

Leitfaden zur medizinischen Trainingsberatung

Rehabilitation bis Leistungssport

4. Auflage

Mit 60 Abbildungen und 39 Tabellen

Paul Haber
Wien
Österreich

ISBN 978-3-662-54320-7 ISBN 978-3-662-54321-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-54321-4>

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, 2001, 2005, 2009, 2018

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber 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 oder die Herausgeber 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.

Umschlaggestaltung: deblik Berlin
Fotonachweis Umschlag: © ogergo / Getty Images / iStock

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur 4. Auflage

Erfreulicherweise hat das Interesse an medizinischer Trainingsberatung, sei es im Leistungssport oder im gesundheitsorientierten oder therapeutischen Training, in den letzten Jahren durchaus zugenommen, was auch an der unverändert guten Nachfrage nach dem „Leitfaden“ erkennbar ist. Dies hat nun zur Herausgabe einer 4. Auflage geführt. Sie ist auf Grund der technischen Entwicklung im Interesse der elektronischen Verfügbarkeit neu gestaltet. Inhaltlich wurde das bewährte Konzept der systematischen Aufbereitung beibehalten. Es wurden neue Erkenntnisse und Erfahrungen der letzten Jahre berücksichtigt und im ► [Kap. 10](#) Übungsbeispiele zum therapeutischen Krafttraining eingearbeitet. Ich hoffe, dass damit der Leitfaden auch in den nächsten Jahren dazu beiträgt, die qualifizierte medizinische Trainingsberatung auch im ärztlichen Alltag zu befördern.

Paul Haber,

Wien, im Jänner 2017

Inhaltsverzeichnis

I Leistungsphysiologische Grundlagen

1	Energiestoffwechsel	3
1.1	Physikalische und physiologische Grundbegriffe	4
1.1.1	Kraft	4
1.1.2	Arbeit	4
1.1.3	Energie	5
1.1.4	Leistung	5
1.1.5	Sauerstoffverbrauch	7
1.2	Biologische Energie	9
1.3	Energiebereitstellung	11
1.3.1	Energiebereitstellung aus Kohlenhydraten	11
1.3.2	Energiebereitstellung aus Fetten	13
1.3.3	Energiebereitstellung aus Protein	16
1.4	Energieumsatz	18
1.4.1	Grundumsatz	18
1.4.2	Energieumsatz unter Belastung	21
1.5	Anpassung des Energiestoffwechsels an Training	33
1.5.1	Kreatinphosphatspaltung	33
1.5.2	Glykolyse	34
1.5.3	Oxidative ATP-Resynthese	35
	Literatur	40
2	Muskulatur	43
2.1	Elektromechanische Koppelung	44
2.2	Arbeitsweise der Muskelzelle	46
2.3	Kontraktionsformen des Muskels	47
2.3.1	Isometrische Kontraktion	47
2.3.2	Isotonische Kontraktion	47
2.3.3	Unterstützungszuckung	47
2.3.4	Anschlagszuckung	48
2.3.5	Auxotonische Kontraktion	48
2.4	Rote und weiße Muskelfasern	49
2.4.1	Rote Muskelfasern	49
2.4.2	Weißer Muskelfasern	49
2.5	Anpassung an unterschiedlichen Kraftbedarf	52
2.5.1	Motorische Einheiten	52
2.5.2	Intramuskuläre Synchronisation	52
2.5.3	Intramuskuläre Koordination	53
2.6	Langfristige Anpassung der Muskelkraft an Training	54
2.6.1	Synchronisation	54
2.6.2	Hyperplasie	54
2.6.3	Die Hypertrophie	55
	Literatur	56

3	Kreislauf	57
3.1	Blut	58
3.1.1	Fließeigenschaften des Blutes (Hämo-Rheologie).....	59
3.1.2	Sauerstofftransport.....	61
3.1.3	Kohlendioxid (CO ₂)-Transport	62
3.1.4	Pufferung	62
3.1.5	Langfristige Anpassungen des Blutes.....	63
3.2	Das Gefäßsystem	64
3.2.1	Reaktion auf Muskeltätigkeit	64
3.2.2	Anpassung an Ausdauertraining	64
3.3	Das Herz	65
3.3.1	Reaktion auf Muskeltätigkeit	65
3.3.2	Langfristige Anpassung an Ausdauertraining	68
	Literatur	69
4	Was limitiert die aktuelle maximale O₂-Aufnahme (V̇O_{2max})?	71
	Literatur	74
5	Lunge	75
5.1	Ventilation	76
5.2	Diffusion	77
5.3	Perfusion	79
5.4	Langfristige Anpassung an Ausdauertraining	79
	Literatur	80
6	Weitere organische Effekte von Muskelaktivität	81
6.1	Leber	82
6.2	Nebenniere	82
6.3	Zentrales Nervensystem	82
6.4	Knochen	82
6.5	Endokrine Funktion der Muskelaktivität	83
	Literatur	83
II	Die medizinische Trainingslehre	
7	Stresstheorie des Trainings	89
7.1	Begriffsbestimmung	91
7.2	Was ist Stress?	93
7.3	Stressreaktion	94
7.4	Ablauf der Stressreaktion in vier Phasen	95
7.4.1	Alarmphase	95
7.4.2	Phase der Anpassung.....	97
7.4.3	Phase der Ermüdung und/oder Erschöpfung.....	98
7.4.4	Phase der Wiederherstellung und Erholung	100
7.5	Gesundheit und Leistungsfähigkeit als ausgewogenes Verhältnis von Gegensätzen	101

7.5.1	Gegensätze	101
7.5.2	Verhältnismäßigkeit	102
7.5.3	Missverhältnis	102
7.6	Zyklus als Grundmuster für die Gestaltung des Lebens	105
7.6.1	Zyklische Gestaltung der physischen Belastung	105
7.6.2	Zyklische Gestaltung der psycho-emotionellen Belastungen	105
7.6.3	Berücksichtigung der zirkadianen Rhythmik	106
7.6.4	Berücksichtigung des Monatszyklus der Frau	106
7.7	Exkurs: Stressmanagement	106
7.7.1	Verminderung der Belastung	107
7.7.2	Vermehrung der Erholung	108
7.7.3	Steigerung der Pauseneffizienz	108
7.7.4	Steigerung der Erholungsfähigkeit	109
7.8	Phase der Überkompensation	109
7.8.1	Einige Anmerkungen zum Überkompensationszyklus	110
7.8.2	Einige Anmerkungen zum Trainingsprozess	110
7.8.3	Einige Anmerkungen zur Trainingsbelastung	112
	Literatur	112
8	Motorische Grundfähigkeiten	115
8.1	Ausdauer	116
8.1.1	Aerobe Ausdauer	117
8.1.2	Anaerobe Ausdauer	120
8.2	Kraft	122
8.3	Koordination	125
8.4	Schnelligkeit	126
8.5	Flexibilität	126
	Literatur	127
9	Zehn allgemeine Grundregeln des Trainings	129
9.1	Quantifizierung der Trainingsbelastung	131
9.1.1	Intensität	132
9.1.2	Dauer	132
9.1.3	Häufigkeit	132
9.1.4	Wöchentliche Netto-Trainingsbelastung (WNTB)	132
9.2	Beachtung von Minimalbelastungen	134
9.2.1	Für das aerobe Ausdauertraining	135
9.2.2	Für das Krafttraining	138
9.3	Angemessenheit der Trainingsbelastung	141
9.3.1	Zu niedrige Trainingsbelastung	141
9.3.2	Zu hohe Trainingsbelastung	142
9.4	Ganzjährigkeit des Trainings	142
9.5	Systematische Steigerung der Trainingsbelastung	143
9.5.1	Systematische Steigerung im Ausdauertraining	144
9.5.2	Systematische Steigerung im Krafttraining	149
9.6	Zyklische Gestaltung des Trainings	150
9.6.1	Hierarchie der Zyklen	150

9.6.2	Terminplanung des Trainingsjahres.....	155
9.6.3	Typische Beispiele der Terminplanung bei Ein- und Mehrfachperiodisierung ...	156
9.7	Auswahl der richtigen Bewegungsform.....	160
9.8	Definieren von Trainingszielen	161
9.8.1	Leistungssportliche Ziele	161
9.8.2	Nicht-leistungssportliche Ziele.....	162
9.9	Individualisieren des Trainings	163
9.10	Information der Trainierenden	163
	Literatur.....	163
10	Trainingsmethoden.....	165
10.1	Trainingsmethoden der Ausdauer	166
10.1.1	Aerobe Ausdauer.....	166
10.1.2	Anaerobe Ausdauer	169
10.2	Trainingsmethoden der Kraft.....	171
10.2.1	Maximalkraft.....	171
10.2.2	Kraftausdauer.....	172
10.3	Übungen zum Krafttraining in der medizinischen Trainingstherapie (MTT).....	173
10.3.1	Auswahl der Trainingsgeräte	174
10.3.2	Einige ausgewählte Übungsbeispiele.....	175
	Literatur.....	192
11	Planung des mehrjährigen Trainings von Kraft und Ausdauer in Ausdauersportarten	193
11.1	Österreichischer Ruderlehrplan	195
11.1.1	Das 1. Trainingsjahr (14. Lebensjahr).....	196
11.1.2	Das 2. Trainingsjahr (15. Lebensjahr).....	197
11.1.3	Das 3. Trainingsjahr (16. Lebensjahr).....	199
11.1.4	Das 4. Trainingsjahr (17. Lebensjahr).....	201
11.1.5	Das 5. Trainingsjahr (18. Lebensjahr).....	204
11.1.6	Das 6. Trainingsjahr (19. Lebensjahr).....	206
11.1.7	Das 7. Trainingsjahr (20. Lebensjahr).....	206
11.1.8	Das 8. Trainingsjahr (21. Lebensjahr).....	209
11.2	Das 4-Jahres-Projekt „Susanne Pumper Sydney 2000“	212
11.2.1	Entwicklung der Jahres-Nettotrainingszeit (JNTZ)	212
11.2.2	Entwicklung der mittleren und schnellen Dauerläufe	214
11.2.3	Entwicklung des intensiven Trainings.....	215
11.2.4	Leistungsentwicklung	215
11.2.5	Kontrolle und Regelung des Trainings	217
12	Die Grenzen der menschlichen Leistungsfähigkeit	221
12.1	Kraft	222
12.2	Ausdauer.....	223
12.3	Passiver Bewegungsapparat.....	223
	Literatur.....	223

III Leistungsdiagnostik

13	Trainingsanamnese	229
13.1	Angaben zur Person.....	230
13.2	Allgemeine Angaben zum Training.....	230
13.2.1	Trainingsalter.....	230
13.2.2	Gegenwärtige Trainingsperiode.....	230
13.2.3	Summe aller Trainingseinheiten pro Woche.....	231
13.3	Angaben zum Ausdauertraining.....	231
13.3.1	Trainingsumfang des Vorjahres.....	231
13.3.2	Training vor 10 Wochen und vorher.....	231
13.3.3	Training der letzten 10 Wochen vor dem Test.....	231
13.3.4	Struktur des Trainings.....	232
13.4	Angaben zum Krafttraining.....	232
13.5	Sportliches Ziel.....	232
13.6	Momentane sportliche Leistung.....	232
13.7	Kurzfristige Einflussfaktoren.....	232
13.8	Persönlichkeit des Sportlers.....	233
	Literatur.....	233
14	Leistungsdiagnostische Untersuchung (Test)	235
14.1	Absolute Leistungsfähigkeit.....	236
14.2	Relative Leistungsfähigkeit.....	236
14.2.1	Körpermasse.....	236
14.2.2	Körperoberfläche.....	239
14.3	Der Bezug auf einen Referenzwert (Trainingszustand).....	239
14.4	Beurteilung des Trainingszustandes.....	240
14.4.1	Relation zum Trainingsaufwand.....	240
14.4.2	Relation zum angestrebten sportlichen Ziel.....	240
14.4.3	Trainingscontrolling.....	240
14.4.4	Trainingsmittelüberprüfung.....	241
	Literatur.....	241
15	Qualitätskriterien eines Tests	243
15.1	Gültigkeit, Validität.....	244
15.2	Zuverlässigkeit, Reliabilität.....	244
15.3	Objektivität.....	244
15.4	Standardisierung.....	244
16	Einige Leistungsdiagnostische Tests	247
16.1	Ruhepuls und Körpermasse.....	248
16.2	Sportartspezifisches Testsystem.....	248
16.3	Standardisiertes Testtraining.....	249
16.4	Feldtest.....	249
16.4.1	Annahme 1.....	250
16.4.2	Annahme 2.....	250

16.5	Maximalkrafttest	252
16.5.1	Sportarten für die Beine	253
16.5.2	Sportarten für die Arme	254
16.5.3	Krafttest in Prävention und Rehabilitation	255
16.6	Kraftausdauer test	255
	Literatur	257
17	Ergometrie	259
17.1	Ergometrieprinzip	260
17.2	Ergometrieformen	260
17.2.1	Sportartunspezifische Fahrradergometrie	261
17.2.2	Sportartspezifische Ergometrie	261
17.3	Belastungsverfahren (Ergometrieprotokolle)	262
17.3.1	Rektanguläre Rechteckbelastung, Einstufentest	262
17.3.2	Trianguläre, kontinuierlich ansteigende Belastung, Rampentest	262
17.3.3	Stufenförmig ansteigende, rektangulär-trianguläre Belastung, Stufentest	262
17.3.4	Steady-State-Belastung	262
17.3.5	Symptomlimitierte, maximale Ergometrie	263
17.3.6	Submaximale Ergometrie	264
17.4	Ergometrische leistungsdiagnostische Messwerte	265
17.4.1	Maximale, symptomlimitierte Leistungsfähigkeit	265
17.4.2	EKG, Herzfrequenz (HF)	267
17.4.3	Blutdruck (RR)	268
17.4.4	Maximale Laktatkonzentration	270
17.4.5	Anaerobe Schwelle	270
17.4.6	Herzgrößenleistungsquotient (HGLQ)	270
	Literatur	271

IV Leistungsmedizinische Trainingsberatung

18	Leistungsmedizinische Trainingsberatung in	
	Ausdauersportarten	275
18.1	Das Wesen der Trainingsberatung	277
18.2	Systematische Trainingsberatung	278
18.2.1	Gibt es eine Trainingsanamnese?	278
18.2.2	Sind die Angaben der Trainingsanamnese plausibel?	278
18.2.3	Prüfung auf Einhaltung der Grundregeln des Trainings	279
18.2.4	Beurteilung der Effektivität des gesamten aeroben Ausdauertrainings	280
18.2.5	Beurteilung der Erreichbarkeit des sportlichen Zieles auf Grund des Ausdauertrainingszustandes	285
18.2.6	Beurteilung der Effektivität des laktazid-anaeroben Ausdauertrainings (Wiederholungstraining)	285
18.2.7	Beurteilung der Effektivität des alaktazid-anaeroben Ausdauertrainings (= Schnelligkeit)	286
18.2.8	Beurteilung der Effektivität des Trainings der Maximalkraft	287

18.2.9	Beurteilung der Effektivität des Trainings der Kraftausdauer	287
18.2.10	Beurteilung der Erreichbarkeit des sportlichen Zieles auf Basis der Kraftfähigkeiten	288
18.2.11	Beurteilung der Effektivität des gesamten Trainings	288
	Literatur	289
19	Beratung von Sporttreibenden mit erhöhtem Risiko und/oder chronischen Erkrankungen	291
19.1	Fünf allgemeine Regeln, die bei der sportärztlichen Beratung zu beachten sind	293
19.1.1	Chronische Erkrankung	293
19.1.2	Patientenschulung	293
19.1.3	Notfall	293
19.1.4	Planung	294
19.1.5	Körperliche Voraussetzungen	294
19.2	Ablauf der Beratung	294
19.2.1	Anamnese	294
19.2.2	Festlegen des Zielwertes für die LF%Ref	295
19.2.3	Feststellung des Ist-Zustandes	295
19.2.4	Abgleichung des Zielwertes mit dem Ist-Zustand	296
	Literatur	298
20	Medizinische Trainingstherapie (MTT)	299
20.1	Indikationen für die medizinische Trainingstherapie	300
20.1.1	Verminderte Leistungsfähigkeit	300
20.1.2	Hypertonie	303
20.1.3	Fettstoffwechselstörungen	303
20.1.4	Diabetes mellitus II	303
20.1.5	Adipositas	304
20.1.6	Arteriosklerose, koronare Herzkrankheit	305
20.1.7	Chronische Lungenerkrankungen	305
20.1.8	Neurologische Indikationen	306
20.1.9	Rheumatischer Formenkreis	307
20.2	Zur Sicherheit der Trainingstherapie	308
20.2.1	Verletzungsrisiko	308
20.2.2	Gefahr der Überforderung	308
20.3	Kontraindikationen	310
20.4	Kontrollen	310
20.5	Verschiedene Fragen	311
20.5.1	Sport und Spiel?	311
20.5.2	Wie viel und wie lange Trainingstherapie?	312
20.5.3	Wann soll trainiert werden?	312
20.5.4	Ist das Training bei verschiedenen Erkrankungen verschieden?	313
	Literatur	313
21	Training bei alten Menschen	317
21.1	Altersgang der körperlichen Leistungsfähigkeit	320

21.2	Altersgang der Trainierbarkeit	321
21.3	Einfluss von regelmäßigem Training auf die Lebenserwartung	322
21.4	Beachtenswertes beim Training alter Menschen	327
21.4.1	Wasserhaushalt	327
21.4.2	Motorische Lernfähigkeit	327
21.4.3	Abnahme der Konzentrations- und Reaktionsfähigkeit	327
	Literatur	328
22	Frauen betreiben Sport	329
22.1	Leistungsrelevante Unterschiede zwischen Mann und Frau	330
22.1.1	Körperzusammensetzung	331
22.1.2	Fettverteilungsmuster	332
22.2	Spezielle Probleme des Frauensports	332
22.2.1	Menstruation	332
22.2.2	Schwangerschaft	333
22.2.3	Anderes Training	334
	Literatur	334
23	Kinder betreiben Sport	335
23.1	Entwicklungsphasen	336
23.2	Drei Hauptentwicklungslinien	337
23.2.1	Wachstum des Gehirns	337
23.2.2	Längenwachstum	339
23.2.3	Trainierbarkeit	339
23.3	Talent	340

V Ernährung

24	Stellenwert der richtigen Ernährung	345
24.1	Stellenwert der Ernährung für Leistungssportler	346
24.2	Stellenwert der Ernährung für Hobbysportler und alle, die etwas leisten müssen	346
24.3	Was ist eine richtige Ernährung?	346
24.4	Was ist eine Ernährungsbilanz?	347
24.4.1	Positive Bilanz	347
24.4.2	Negative Bilanz	348
24.4.3	Ausgeglichene Bilanz	348
	Literatur	348
25	Ernährungsbilanzen für eine ausgewogene Ernährung	349
25.1	Energiebilanz	350
25.1.1	Grundumsatz (GU)	350
25.1.2	Leistungsumsatz (LU)	352
25.1.3	Zunehmen und Abnehmen	354
25.1.4	Trainingsumsatz (TRU)	361

25.1.5	Gesamter Tagesumsatz (TEU) des Sportlers	363
25.2	Die Bilanzen der energietragenden Nährstoffe	364
25.2.1	Proteine	364
25.2.2	Fette	369
25.2.3	Kohlenhydrate (KH)	371
25.3	Bilanz der nicht energietragenden Nährstoffe	375
25.3.1	Wasser	375
25.3.2	Elektrolyte	377
25.3.3	Bilanz der Vitamine und Spurenelemente	379
	Literatur	379
26	Nahrungsergänzungsstoffe	381
26.1	Kreatin	382
26.2	L-Karnitin	382
26.3	Koffein	383
	Literatur	383
	Serviceteil	385
	Stichwortverzeichnis	386

Leistungsphysiologische Grundlagen

- Kapitel 1 Energiestoffwechsel – 3
- Kapitel 2 Muskulatur – 43
- Kapitel 3 Kreislauf – 57
- Kapitel 4 Was limitiert die aktuelle maximale O₂-Aufnahme? – 71
- Kapitel 5 Lunge – 75
- Kapitel 6 Weitere organische Effekte von Muskelaktivität – 81

Die Physiologie und auch die Leistungsphysiologie ist eine Naturwissenschaft und die einschlägige Forschung ist primär auf Erkenntnisgewinn ausgerichtet. Das schließt nicht aus, dass eine Erkenntnis auch von Bedeutung für die praktische Anwendung z. B. von Training ist. Dass dies der Fall ist, kann sich auch durchaus erst längere Zeit nach der Entdeckung des wissenschaftlichen Zusammenhangs ergeben. Auf jeden Fall kann die Kenntnis von leistungsphysiologischen Grundlagen in manchen Fällen helfen, sinnvolle von nicht sinnvollen Trainingsmaßnahmen zu unterscheiden. Generell kann man davon ausgehen, dass Behauptungen oder auch Trainingsmaßnahmen, die im Widerspruch zu physiologischen Grundlagen stehen, wahrscheinlich falsch sind. Da der Schwerpunkt dieses Leitfadens die Anwendung von Training ist, werden im Folgenden nur jene Organe und Organsysteme besprochen, die an der Erbringung von körperlicher Leistung unmittelbar beteiligt sind und die durch Training morphologisch und funktionell verändert werden.

In diesem Sinne hoffe ich, dass die folgende Sektion nicht nur mit Vergnügen, sondern auch mit Gewinn gelesen wird.

Energiestoffwechsel

- 1.1 Physikalische und physiologische Grundbegriffe – 4**
 - 1.1.1 Kraft – 4
 - 1.1.2 Arbeit – 4
 - 1.1.3 Energie – 5
 - 1.1.4 Leistung – 5
 - 1.1.5 Sauerstoffverbrauch – 7
- 1.2 Biologische Energie – 9**
- 1.3 Energiebereitstellung – 11**
 - 1.3.1 Energiebereitstellung aus Kohlenhydraten – 11
 - 1.3.2 Energiebereitstellung aus Fetten – 13
 - 1.3.3 Energiebereitstellung aus Protein – 16
- 1.4 Energieumsatz – 18**
 - 1.4.1 Grundumsatz – 18
 - 1.4.2 Energieumsatz unter Belastung – 21
- 1.5 Anpassung des Energiestoffwechsels an Training – 33**
 - 1.5.1 Kreatinphosphatspaltung – 33
 - 1.5.2 Glykolyse – 34
 - 1.5.3 Oxidative ATP-Resynthese – 35
- Literatur 40**

1.1 Physikalische und physiologische Grundbegriffe

Bevor umfassend auf leistungsphysiologische und -medizinische Zusammenhänge eingegangen wird, ist es sinnvoll, einige häufig gebrauchte physikalische und physiologische Grundbegriffe genau zu definieren.

1.1.1 Kraft

Physikalische Definition von Kraft

Kraft ist die Fähigkeit, eine Masse, die in Kilogramm (kg) angegeben wird, zu beschleunigen.

Beschleunigung ist die Zunahme von Geschwindigkeit (Meter/Sekunde: m/sec) pro sec: msec^{-2} .

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}$$

Gl. 1.1

Die klassische Einheit der Kraft ist das **Kilopond (kp)**. Das ist jene Kraft, die 1 kg Masse eine Beschleunigung von $9,81 \text{ msec}^{-2}$ verleiht (im Schwerfeld der Erde).

Diese Kraft übt 1 kg nur auf der Erde aus; am Mond würde 1 kg, auf Grund der geringeren Schwerkraft, nur 1/6 dieser Kraft ausüben. Die **SI-Einheit** (system international d'unités) für die Kraft ist das **Newton (N)**, dessen Definition von Schwerfeldern unabhängig ist. Es ist die Kraft, die 1 kg Masse die Beschleunigung von 1 msec^{-2} verleiht:

Umrechnung von kp auf N

$$1 \text{ kp} = 9,81 \text{ N (näherungsweise: 10)}$$

1.1.2 Arbeit

Physikalische Definition von Arbeit

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \times \text{Weg}$$

Gl. 1.2

Die Einheit ist daher das **Kilopondmeter (kpm)**. Das ist jene Arbeit die erbracht wird, wenn 1 kp um einen Meter gehoben wird (im Schwerfeld der Erde). Die gleiche Arbeit von 1 kpm ist es aber auch, wenn 0,5 kp 2 m gehoben werden. Dabei spielt die Zeit, in der die Arbeit erbracht wird, keine Rolle. Die Arbeit ist immer gleich, egal ob das Kilopond in einer Sekunde oder in einer Minute (min) um einen Meter gehoben wird.

Die SI-Einheit der Arbeit ist das **Newtonmeter (Nm)**, das **Joule (J)** genannt wird und natürlich in kpm umgerechnet werden kann:

Umrechnung von kpm in J

$$1 \text{ kpm} = 9,81 \text{ J}$$

1.1.3 Energie

Energie bedeutet so viel wie **gespeicherte Arbeit** oder **Arbeitsfähigkeit**. Daraus geht hervor, dass Energie und Arbeit physikalisch gleich sind, obwohl sie in verschiedenen Maßeinheiten angegeben werden können und auch verschieden definiert worden sind. Die traditionelle Einheit der Energie ist die **Kalorie (cal)**, die als Wärmeenergie definiert ist.

Einheit der Wärmeenergie

1 cal ist jene Wärmemenge, die 1 cm³ Wasser von 14,5°C auf 15,5°C erwärmt.

In der Physiologie wird die vom Organismus umgesetzte Energie, ebenso wie die in den Nährstoffen enthaltene, üblicherweise in Kilokalorien angegeben (kcal). In SI-Einheiten wird die Energie konsequenterweise ebenfalls in Joule bzw. **Kilojoule (kJ)** angegeben. Da Energie und Arbeit im Wesen das Gleiche sind, können sie auch über das **mechanische Wärmeäquivalent** ineinander umgerechnet werden:

$$1 \text{ cal} = 0,426 \text{ kpm}$$

Die Umrechnung von kpm auf J ergibt dann den Umrechnungsfaktor von Kalorien auf Joule:

Umrechnung von cal auf kpm

$$1 \text{ cal} = 0,426 \text{ kpm}$$

$$0,426 \times 9,81 = 4,189 \text{ J}$$

1.1.4 Leistung

Ein weiterer wesentlicher Begriff aus der Physik, der in der Leistungsphysiologie häufig verwendet wird, ist die **Leistung**. Sie ist ebenfalls physikalisch definiert:

Definition von Leistung

$$\text{Leistung} = \text{Arbeit} / \text{Zeit}$$

Gl. 1.3

Beispiel: ein Kilopondmeter pro Minute (kpm/min)

Das bedeutet, dass das Heben von einem Kilopond um einen Meter während einer Minute erfolgt. Meter pro Minute, also Weg durch Zeit, ist die Definition der **Geschwindigkeit**. Während also die Arbeit als Kraft mal Weg definiert ist, ist die Leistung Kraft mal Geschwindigkeit. Im Gegensatz zur Arbeit ist also für die Leistung nicht nur das gehobene Gewicht von Bedeutung, sondern auch die Geschwindigkeit, mit der das Gewicht gehoben wird. Daher kann durchaus beim raschen Heben eines kleinen Gewichtes in sehr kurzer Zeit eine größere Leistung erbracht werden als

beim langsamen Bewegen eines größeren Gewichtes. Werden z. B. 0,25 kp in 1 Sekunde um einen Meter gehoben, so sind das:

$$1 \text{ m} \times 0,25 \text{ kp/l sek} = 0,25 \text{ kpm/sec}$$

$$0,25 \text{ kpm/sec} = 15 \text{ kpm/min}$$

Eine bekannte technische Einheit der Leistung sind übrigens 75 kpm/sec, das ist die **Pferdestärke** (1 PS). Die SI-Einheit der Leistung ist das **Watt (W)**, das heute, unter anderem, auch zur Angabe der mechanischen Leistung bei der Fahrradergometrie verwendet wird:

Definition der Einheit der Leistung Watt

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ J/sec}$$

Natürlich können kpm/min und kpm/sec in Watt umgerechnet werden und umgekehrt:

$$\text{kpm/min} \times 0,163 [9,81/60] = \text{Watt}$$

$$\text{Watt}/0,163 = \text{kpm/min}$$

$$\text{kpm/sec} \times 9,81 = \text{Watt}$$

$$\text{Watt}/9,81 = \text{kpm/sec}$$

$$\text{Daher ist 1 PS: } 75 \times 9,81 = 736 \text{ W (0,736 kW)}$$

Physiologische Definition von Leistung

In der Leistungsphysiologie spielt nicht nur die mechanische Leistung eine Rolle, sondern auch die im Organismus umgesetzte Energie. Daher kann Leistung physiologisch auch folgendermaßen angegeben werden:

$$\text{Leistung} = \text{Energieumsatz/Zeit (kcal/min oder kJ/min)}$$

Gl. 1.4

Aus der erwähnten Definition der Leistung als Kraft \times Geschwindigkeit ergibt sich, dass bei gleicher Leistung das Produkt aus Kraft mal Geschwindigkeit konstant ist. Dieses reziproke Verhältnis von Kraft und Geschwindigkeit bei gleicher Leistung ist z. B. wesentlich für das Verständnis eines Aspektes der Fahrradergometrie, nämlich der optimalen **Trittfrequenz** (= Umdrehungszahl/min), die die Geschwindigkeit repräsentiert. In vielen einschlägigen Lehrbüchern zur Ergometrie wird als Trittfrequenz 50–60/min empfohlen. Die Begründung ist unklar, insbesondere da bekannt ist, dass Radrennfahrer, die sicherlich besonders wirkungsvoll fahren, erheblich höhere Trittfrequenzen, nämlich 90–120/min, anwenden. Möglicherweise beruht diese Empfehlung auf dem Umstand, dass bei einer Trittfrequenz von ca. 50/min der biologische Wirkungsgrad der eingesetzten Energie am größten ist. Das heißt, dass von allen möglichen Varianten von Trittfrequenz und Bremskraft für die gleiche Leistung bei einer Trittfrequenz von ca. 50/min die Herzfrequenz und die O₂-Aufnahme am geringsten sind und beide sowohl bei geringerer als auch vor allem bei höherer Drehzahl in nicht linearer Weise zunehmen (Mellerowicz 1979; Londree, Moffitt-Gerstenberger et al. 1997).

Ist die Bremskraft eine Konstante, wie das bei den meisten mechanisch gebremsten Fahrradergometern der Fall ist, dann ist die erbrachte Leistung **drehzahlabhängig**. Das heißt, die Leistung nimmt mit der Trittfrequenz (das ist die Geschwindigkeit) linear zu. Eine bestimmte Leistung, also z. B. 100 W, kann aber sehr variabel erbracht werden. Entsprechend der Formel: „Kraft \times Geschwindigkeit“ kann dies entweder mit niedriger (Brems)kraft und hoher Trittfrequenz oder, umgekehrt, mit hoher Bremskraft und niedriger Trittfrequenz geschehen. Wie die Erfahrungen der Radrennfahrer zeigen, ist es für das Erbringen einer hohen Leistung vorteilhafter, eine hohe Trittfrequenz mit geringerem Krafteinsatz zu wählen, da dabei die Leistung weniger durch lokale muskuläre Komponenten, sondern mehr durch die allgemeine Kapazität von Kreislauf und Stoffwechsel limitiert ist. Für die ergometrische Leistungsprüfung sollte daher immer eine hohe Trittfrequenz, etwa um 80/min, gewählt werden. Bei einem modernen elektrischen Ergometer geschieht die entsprechende Regelung der Bremskraft, in Abhängigkeit von der Umdrehungszahl, automatisch (**drehzahlunabhängig**). Da sich aber, wie erwähnt, sowohl Herzfrequenz als auch die O_2 -Aufnahme mit der Drehzahl ändern, sollte auch bei drehzahlunabhängigen Ergometern immer die gleiche Trittfrequenz gewählt werden.

1.1.5 Sauerstoffverbrauch

Im menschlichen Organismus wird die für die Lebensvorgänge und die Muskeltätigkeit erforderliche Energie durch die biologische Verbrennung der Nährstoffe Fett, Kohlenhydrat und Eiweiß (Protein) mit Sauerstoff bereitgestellt (**Oxidation**). Je nach dem verwendeten Nährstoff wird dabei pro Liter Sauerstoff eine ganz bestimmte Energiemenge gewonnen, das **energetische Äquivalent**:

- bei Eiweiß 4,5 kcal/Liter O_2 ,
- bei Fetten 4,7 kcal/Liter O_2 ,
- bei Kohlenhydraten 5,0 kcal/Liter O_2 .

Leistungsphysiologisch kann Leistung daher auch so angegeben werden:

Leistungsphysiologische Definition von Leistung

$$\text{Leistung} = O_2 - \text{Verbrauch} / \text{Zeit}$$

Gl. 1.5

Das physiologische Kürzel ist $\dot{V}O_2$ und wird in Liter (l) oder Milliliter (ml)/min angegeben. Man kann daher durch Messung der mit der Atmung aufgenommenen O_2 -Menge (mit der spirometrischen Atemgasanalyse) exakt auf die im Körper umgesetzte Energiemenge und somit auf die erbrachte Leistung schließen (**indirekte Kalorimetrie**). Bei sportlichen Belastungen kann zur Berechnung von Energieumsätzen mit guter Näherung das kalorische Äquivalent für Kohlenhydrat angenommen werden.

Da mit einem Teil der oxidativ bereitgestellten Energie auch die mechanische Leistung erbracht wird, besteht eine enge Beziehung zwischen der jeweiligen Leistung, z. B. Lauftempo (km/h oder m/sec) oder Leistung am Ergometer (W), und der $\dot{V}O_2$ die, für die fahrradergometrische Belastung, mit folgender Regressionsgleichung beschrieben werden kann, unabhängig von Alter und Geschlecht, aber, wie erwähnt, nicht unabhängig von der Trittfrequenz (Wasserman, Hansen et al. 2012):

Schätzung der $\dot{V}O_2$ nach fahrradergometrischer Leistung (W)

$$\dot{V}O_2 = 6,3 \times KM + 10,2 \times W \quad (KM = \text{Körpermasse [kg]}) \quad \text{Gl. 1.6}$$

Wie hoch ist daher die geschätzte $\dot{V}O_2$ bei einem Menschen mit 80 kg bei einer Belastung von 100 W?

$$\dot{V}O_2 = 6,3 \times 80 + 10,2 \times 100 = 1524 \text{ ml/min}$$

Diese Formel liefert die Schätzung eines statistischen Mittelwertes für die $\dot{V}O_2$ mit einer Streuung um den Schätzwert von ca. $\pm 10\%$. Diese Streuung beruht vor allem auf der unterschiedlichen Geschicklichkeit des Radfahrens und auf den Messfehlern der Messung des Atemminutenvolumens und der O_2 -Konzentration. Es ist eine Vielzahl ähnlicher Formeln publiziert worden, die im Detail leicht unterschiedliche Werte, insbesondere bei sehr niedriger und bei sehr hoher Leistung, ergeben. In diesem Buch wird durchgehend diese zitierte Formel verwendet.

Aufmerksame Rechner werden anhand dieser Formel feststellen, dass eine zusätzliche $\dot{V}O_2$ von 1 l eine zusätzliche Leistung von 98 W ermöglicht. Andererseits entspricht eine $\dot{V}O_2$ von 1 l/min rein physikalisch einer Leistung von 349 W ($= 1 \times 5 \times 4,19 \times 1000/60$). Die erhebliche Differenz erklärt sich damit, dass, wie später noch besprochen wird, ca. 60% der aus der Oxidation bereitgestellten Energie als Wärme frei wird, und von der verbleibenden, chemisch als ATP gebundenen Energie noch einmal fast die Hälfte für vitale Basisfunktionen, wie zelluläre Ionenpumpen, Herz- und Atemtätigkeit, aufgewendet wird, somit also für die mechanische Leistungserbringung nicht zur Verfügung steht.

Mit diesen Kenntnissen können wir bereits jetzt die für viele Gesundheitssportler so wichtige Frage beantworten:

Wie viele Kalorien verbrauche ich bei einer Stunde Joggen?

Dazu brauchen wir eine individuelle Angabe, nämlich die maximale O_2 -Aufnahmefähigkeit in Litern pro Minute ($= \dot{V}O_{2\text{max}}$), wie sie bei der Spiroergometrie gemessen wird. Nehmen wir an, dies wären 3 l/min (das ist ein Durchschnittswert für einen 20–30-jährigen Mann) und nehmen wir weiter an, dass beim Joggen davon 60% genutzt werden (das ist ein eher gemütliches Joggen), dann können wir folgende kleine Rechnung anstellen (der Einfachheit halber nehmen wir das energetische Äquivalent für Kohlenhydrate):

$$3 \text{ l/min} \times 0,6 \times 5 \times 60 \text{ (min)} = 540 \text{ kcal/Stunde}$$

Von diesem Gesamtumsatz muss noch der Grundumsatz für eine Stunde abgezogen werden (ca. 70 kcal), da dieser ja auf jeden Fall, auch bei körperlicher Ruhe, umgesetzt wird. Es verbleiben „netto“ 470 kcal. Das ist leider nicht mehr als der Nährwert von einem 3/4 Liter Fruchtsaft (der vielleicht nach dem Joggen konsumiert wird) und zeigt, dass der Energieumsatz beim Joggen, und damit die Möglichkeit damit Gewicht abzunehmen, in der Regel überschätzt wird.

Eine andere Frage aus der praktischen Beratung, die wir bereits jetzt beantworten können, betrifft das folgende alpinistische Beratungsproblem:

Eine von einem Reisebüro organisierte Fernfahrt nach Afrika enthält die Besteigung eines 5000 m hohen Gipfels ausgehend von einem Basislager in 3000 m Höhe. Allerdings müssen die Gipfelbesteigung und die Rückkehr ins Lager an einem Tag bewältigt werden, da es in der Wildnis

zwischen Basislager und Gipfel keinerlei sichere Übernachtungsmöglichkeiten gibt. Die Frage des etwa 55-jährigen Mannes war: Kann ich mir diese Tour zutrauen? Dazu noch einige nähere Angaben:

- Der Tag dauert in Äquatornähe ziemlich genau 12 Stunden, von denen zwei Stunden für Rasten verbraucht werden, so dass 10 Stunden, das sind 36.000 Sekunden, für den Auf- und Abstieg zur Verfügung stehen.
- Der Höhenunterschied ist 2-mal 2000 m; allerdings wird beim bergab Gehen 1/3 weniger Energie verbraucht als beim gleich schnellen bergauf Gehen. Deshalb rechnen wir für die Rückkehr nur 1300 m Höhenunterschied. In summa: 3300 m.
- Der Mann wiegt 75 kg, inklusive Kleidung und leichtem Gepäck 85 kg. Die normale, altersentsprechende Leistungsfähigkeit ist 2,4 W/kg Körpermasse.
- Der über 10 Stunden nutzbare Anteil der maximalen Leistungsfähigkeit ist höchstens 40%.
- In 3000–5000 m Höhe ist die Leistungsfähigkeit, wegen des schon deutlich niedrigeren O₂-Drucks, etwa 15% niedriger als auf Meeresebene.

Jetzt können wir folgende Rechnung ansetzen:

$$3300 \times 85 \times 9,81 / 36.000 = 76 \text{ Watt, das sind } 40\% \text{ von } 190 \text{ Watt.}$$

Wegen des höhenbedingten Leistungsabfalls: $190 \times 1,18 = 223 \text{ Watt.}$

$$223 / 75 = 2,98 \text{ Watt/kg}$$

Die leistungsmäßige Voraussetzung, um diese Tour bewältigen zu können, sind 223 W bzw. 2,98 Watt/kg. Das ist übrigens vom Alter unabhängig und entspricht der normalen Leistungsfähigkeit eines ca. 30-jährigen Mannes. Für unseren Mann mit 55 Jahren bedeutet das allerdings eine Leistungsfähigkeit, die 24% über dem altersentsprechenden Durchschnitt untrainierter Männer liegt und nur durch entsprechendes Training erworben werden kann. Je mehr diese Leistungsfähigkeit unterschritten wird, desto größer wird das Risiko eines erschöpfungsbedingten Zusammenbruchs (bei dieser speziellen Tour heißt das: mitten im Urwald). Das ist eine etwas grobe Kalkulation, die z. B. nicht berücksichtigt, dass zwischen dem Basislager und dem Gipfel auch eine horizontale Entfernung liegt. Das Ergebnis entspricht also eher einem unteren Grenzwert.

1.2 Biologische Energie

Der Ursprung aller biologisch verwertbaren Energie sowohl im Tier- als auch im Pflanzenreich ist zunächst die Sonne. Allerdings kann diese in Form von elektromagnetischen Wellen vorliegende **Strahlungsenergie** von Pflanzen nur teilweise und vom tierischen und damit auch dem menschlichen Organismus überhaupt nicht direkt genutzt werden. Pflanzen können die Sonnenenergie verwenden, um eine ganz bestimmte chemische Verbindung aufzubauen, wobei die Strahlungsenergie in den Atombindungen als **Bindungsenergie** gespeichert wird. Die chemische Substanz, die dabei durch Bindung von Phosphorsäureresten an Adenosin entsteht, ist das **Adenosin-Tri-Phosphat (ATP)**, wobei als Zwischenstufen Adenosin-Mono-Phosphat und Adenosin-Di-Phosphat (AMP und ADP) entstehen. Dieser Vorgang ist als **Photosynthese** bekannt und findet mit Hilfe des grünen Blattfarbstoffs **Chlorophyll** in den **Chloroplasten** in den Zellen

der Blätter der grünen Pflanzen statt. Das ATP ist also ein chemischer Energiespeicher, so wie eine gespannte Feder ein physikalischer Energiespeicher ist. Das ATP seinerseits stellt die Energie für ausnahmslos alle zellspezifischen Funktionen und Syntheseleistungen zur Verfügung, indem Phosphorsäure wieder hydrolytisch abgespalten wird. Die dabei freiwerdende Bindungsenergie wird für die eigentlichen Lebensvorgänge genutzt. Das bei der Spaltung von ATP entstehende ADP und die freie Phosphorsäure werden in den Chloroplasten wieder zu ATP resynthetisiert. Die Pflanze nutzt diese Energien, um aus Kohlendioxid (CO_2 aus der Luft) und Wasser (aus dem Boden) **Kohlenhydrate** (Zucker, Stärke, Zellulose), **Fette** und, zusätzlich mit Stickstoff, **Aminosäuren** und **Proteine** zu synthetisieren. Dabei wird der für die Synthese überflüssige Sauerstoff aus dem Wasser an die Luft abgegeben. Grundsätzlich besteht die Synthese im Aufbau von Ketten oder Ringen aus Kohlenstoffatomen, die das chemische Grundgerüst aller dieser Verbindungen bilden, und dem zusätzlichen Einbau von substanzspezifischen Molekülgruppen, wie z. B. der Aminogruppe bei der Synthese von Aminosäuren. In diesen Stoffen ist daher ebenfalls sehr viel Bindungsenergie gespeichert, die indirekt, nämlich auf dem Umweg über die ATP-Synthese in den Chloroplasten, von der Sonne stammt.

Diese von den Pflanzen synthetisierten Stoffe mit ihrer gespeicherten Energie sind die Grundlage des Energiestoffwechsels der tierischen Organismen, inklusive des aus dem Tierreich stammenden Menschen. Die Pflanzenfresser nutzen die von den Pflanzen zur Verfügung gestellten Stoffe direkt als Nährstoffe. Dabei wird der Synthesevorgang der Pflanzen umgekehrt: Die Kohlenstoffketten werden aufgespalten. Die Endprodukte sind wieder CO_2 und Wasser, die an die Umgebung (Luft oder Wasser) abgegeben werden. Dafür müssen tierische Organismen zur Bildung des Wassers jene Menge an O_2 aufnehmen, die zuvor von den Pflanzen abgegeben wurde. Dieser Vorgang, der chemisch eine **Oxidation** ist, läuft in jeder tierischen Zelle in den **Mitochondrien** ab und wird als **Gewebeatmung** bezeichnet. Da die Oxidation nur bei ausreichender Verfügbarkeit von O_2 ablaufen kann, wird sie **aerob** genannt. Die dabei freiwerdende Bindungsenergie wird auch von den tierischen Zellen zur Bildung von ATP verwendet, das dann der eigentliche universelle Energielieferant für alle energieumsetzenden Prozesse ist (darunter auch so exotische wie das Leuchten eines Glühwürmchens). Der menschliche Körper enthält insgesamt ca. 85 g ATP, das entspricht einer Energiemenge von maximal 2 kcal, die aber keinesfalls total aufgebraucht werden kann. Ein Mensch, der pro Tag 2500 kcal umsetzt, produziert und verbraucht rund 100 kg ATP. Das Leben ist unmittelbar von der ausreichenden Verfügbarkeit von ATP abhängig. Dabei wird bei aktiver Muskeltätigkeit nur etwa die Hälfte des ATP-Umsatzes für die Erbringung der mechanischen Leistung verbraucht. Die andere Hälfte dient der Erhaltung der Zellstrukturen, der Aktivität von Ionenpumpen und anderen vitalen Lebensvorgängen. Bereits ein Mangel an ATP, das heißt ein Abfall der Konzentration unter 40% des Ruhewertes, würde zum Zusammenbruch dieser Funktionen und damit zum Tod der Zelle führen. Um nun bei raschem Anstieg des Energiebedarfs ein kritisches Absinken des ATP-Gehaltes zu verhindern, gibt es in der Zelle noch einen weiteren Energiespeicher auf der Basis einer energiereichen Phosphatverbindung, das **Kreatinphosphat (KP)**. Der Gehalt an KP in den Zellen beträgt das 3- bis 5-Fache des Gehaltes an ATP und repräsentiert damit einen Energievorrat von ca. 8 kcal. Es kann, ebenfalls durch Abspaltung von Phosphorsäure, augenblicklich und mit annähernd gleicher Geschwindigkeit Energie freisetzen und ATP resynthetisieren, wie Letzteres zu ADP abgebaut wird. Damit wird bei einer raschen Steigerung des Energieumsatzes und damit des ATP-Verbrauchs ein kritischer Abfall verhindert. Nach der Belastung wird dann das KP, unter ATP-Verbrauch, das dann aber aus der Oxidation von Nährstoffen stammt, wieder aufgebaut. Da diese Form der ATP-Resynthese unmittelbar ohne Mitwirkung von Sauerstoff erfolgt, wird sie **anaerob** genannt.

1.3 Energiebereitstellung

Die Quellen der Energie für tierische Organismen sind die schon erwähnten Nährstoffe, Kohlenhydrate, Fette und Proteine. Sie werden, in Umkehrung des die Sonnenenergie nutzenden Assimilationsprozesses in den Pflanzenzellen, mittels der **biologischen Oxidation** wieder zu CO_2 und Wasser abgebaut. Für den Bedarf der Energiebereitstellung werden ganz überwiegend Kohlenhydrate und Fette herangezogen. Die Aminosäuren dienen vorwiegend zur Synthese körpereigener Proteine, die das beständig im Strukturstoffwechsel abgebaute Eiweiß ersetzen.

1.3.1 Energiebereitstellung aus Kohlenhydraten

Kohlenhydrate werden in Form von Zucker oder Stärke aufgenommen. Von den Körperzellen kann von allen Zuckerarten nur **Glukose** (Traubenzucker) verarbeitet werden. Daher werden alle anderen Zuckerarten, z. B. Fruktose oder Sorbit, in der Leber in Glukose umgewandelt. Auf dem Blutweg gelangt die Glukose dann weiter in die Muskelzellen, wo sie entweder direkt zur Energiebereitstellung herangezogen wird oder, mit Hilfe der **Glykogensynthetase** (und ATP), zu **Glykogen** synthetisiert und gespeichert wird. Dabei muss für jedes Molekül Glukose, das an die Glykogenkette angehängt wird, ein ATP für die Bindungsenergie investiert werden. Normalerweise enthält 1 kg Muskel etwa 15 g Glykogen. Zur unmittelbaren Energiebereitstellung werden vom Glykogen wieder die einzelnen Glukosemoleküle abgespalten (**Glykogenolyse**). Dabei wird auf jedes Glukosemolekül, mit Hilfe des Enzyms **Phosphorylase**, eine Phosphatgruppe (vom ATP) übertragen, so dass die Glukose phosphoryliert als **Glukose-6-Phosphat** vorliegt. Insgesamt sind die Synthese und der Abbau von Glykogen energetisch neutral. Das Glukose-6-Phosphat kann nicht durch die Muskelzellmembran transportiert werden und kann daher die Muskelzelle nicht verlassen. Erst nach Entfernung der Phosphatgruppe könnte die Glukose wieder die Zellmembran passieren. Das Enzym Phosphatase, das die Phosphatgruppe entfernen kann, kommt aber in der Muskelzelle nicht vor. Es ist daher nicht möglich, dass die nicht verbrauchten Glykogenvorräte aus der nicht arbeitenden Muskulatur via Kreislauf an die möglicherweise schon unter Glukosemangel leidende arbeitende Muskulatur transferiert werden. Allerdings ist die Phosphatase in den Leberzellen vorhanden. Daher kann die Leber durchaus aus ihren Glykogenvorräten Glukose ins Blut abgeben und so den Blutzuckerspiegel aufrechterhalten und die Basisversorgung der Gehirn- und Nervenzellen sicherstellen, die für ihren Energiestoffwechsel ausschließlich auf Glukose angewiesen sind. Neuere Untersuchungen zeigen, dass jedoch auf der Ebene der Laktatbildung ein Transfer von der nicht arbeitenden zur arbeitenden Muskulatur möglich ist. Auch in den nicht arbeitenden Muskelzellen wird kontinuierlich Laktat gebildet, das mit Hilfe von Monocarboxylat-Transportproteinen (MCT) die Muskelzelle verlassen kann und dann an benachbarte Muskelzellen oder via Kreislauf auch an Herz oder Leber gehen kann. Wenn in den arbeitenden Muskelzellen die Kohlenhydratdepots erschöpft sind, dann können sie direkt oder aus dem Blut Laktat aufnehmen, ebenfalls mit Hilfe von MCT. Das Laktat kann dann, mit Hilfe der Laktatdehydrogenase, in Pyruvat umgewandelt werden, das dann, wie unten geschildert, weiter verarbeitet wird (Brooks, Brooks et al. 2008). Je besser die oxidative Kapazität von Muskelzellen ausgebildet ist, desto besser ist auch diese Fähigkeit der Muskelzelle (Juel und Halestrap 1999). Bei gut trainierten Muskelzellen kann diese Quelle bis zu 30% der gesamten Kohlenhydratoxidation ausmachen (Van Hall, Jensen-Urstad et al. 2003). Die Glukose hat unter den Nährstoffen insofern eine Sonderstellung, als sie als einziger der drei Nährstoffe nicht nur durch Oxidation mit O_2 , also aerob, Energie liefern kann, sondern, in einem ersten Schritt, auch ohne Mitwirkung von O_2 , also anaerob.

■ Glykolyse

Dieser erste Schritt ist die **Glykolyse**. Sie besteht im Prinzip darin, dass das phosphorylierte Glukosemolekül, das auf einer Kette aus 6 Kohlenstoffatomen (C) basiert, in zwei Moleküle mit je 3 C-Atomen gespalten wird. Als Zwischenprodukte fallen dabei **glyzerinähnliche** Substanzen an, als Endprodukt **Pyruvat (Brenztraubensäure)**. Netto werden bei der Glykolyse 2 Moleküle ATP (aus ADP und Phosphorsäure) pro Molekül Glukose gebildet. Netto deswegen, weil bei der Glykolyse eigentlich 4 Moleküle ATP gebildet, durch Phosphorylierung aber zunächst 2 Moleküle ATP verbraucht werden. Die Glykolyse läuft im Sarkoplasma, also außerhalb der Mitochondrien ab. Die anaerobe Glykolyse läuft immer ohne O_2 ab, unabhängig davon, ob O_2 vorhanden ist oder nicht. Die Aktivität der anaeroben Glykolyse ist also kein Hinweis oder gar Beweis für einen O_2 -Mangel.

Für das Pyruvat gibt es drei weitere Verwertungsmöglichkeiten. Davon laufen die beiden ersten in den Mitochondrien ab, nachdem Pyruvat vom Sarkoplasma in die Mitochondrien diffundiert ist.

Drei Verarbeitungswege für das Pyruvat

- Der Regelfall ist, dass Pyruvat durch Abspaltung eines Moleküls CO_2 (mit Hilfe des Enzyms Pyruvat-Dehydrogenase) in aktivierte Essigsäure (Azetyl-Coenzym A) mit 2 C-Atomen, umgewandelt wird, die dann im Zitratzyklus weiter verarbeitet wird (Azetyl-CoA ist aber auch ein metabolisches Ausgangsprodukt für viele Synthesevorgänge, z. B. Fettsäuren oder Cholesterin),
- oder Pyruvat wird in Oxalessigsäure (Oxalazetat) umgewandelt, die eine Schlüsselsubstanz für den Zitratzyklus darstellt,
- und schließlich kann es durch Aufnahme von Wasserstoffionen (H^+) mit Hilfe des Enzyms Laktatdehydrogenase (LDH) in Milchsäure (Laktat) umgewandelt werden, die dann mit MCT aus der Zelle gebracht und mit dem Blut abtransportiert wird.

Die Phosphorylase, und damit auch die Glykogenolyse und die Glykolyse, werden durch die Substanzen des Zitratzyklus gehemmt. Dieser Effekt wird nach seinem Entdecker **Pasteur-Effekt** genannt. Sowohl durch Adrenalin als auch durch freies ADP, die beide bei zunehmender Belastung vermehrt auftreten, werden hingegen die Phosphorylase und damit die Glykolyse stimuliert.

■ Zitratzyklus und Atmungskette

Aus Azetyl-CoA und Oxalazetat wird Zitronensäure gebildet, die für den Zitratzyklus Namen gebende Substanz, der auch nach seinem Entdecker, dem Nobelpreisträger Krebs, **Krebszyklus** genannt wird. Zyklus deswegen, weil nach vielen chemischen Umwandlungen und Zwischensubstanzen ein Molekül Essigsäure vollständig zu 2 Molekülen CO_2 abgebaut worden ist und wieder Oxalazetat für einen weiteren Zyklus zur Verfügung steht. Im Verlauf des Zitratzyklus werden auch H^+ -Ionen freigesetzt, die über die **Atmungskette**, eine Kaskade von speziellen **Atmungs-enzymen**, an O_2 zur Bildung von Wasser weiter gegeben werden. Die Atmungskette ist jene biochemische Reaktionskette, wo die oxidative Energiefreisetzung und die damit gekoppelte Bildung von ATP bewerkstelligt werden. Die Enzymsysteme des Zitratzyklus sind in der Matrix und die der Atmungskette an den inneren Membranen der Mitochondrien lokalisiert.

Bei vollständiger Oxidation von Kohlenhydraten wird für jedes Molekül O_2 , das mit der Atmung aufgenommen wird, ein Molekül CO_2 gebildet und über die Lunge ausgeschieden.

Energetische Eigenschaften von Glukose

- Der respiratorische Quotient (RQ = ausgeatmetes CO₂/eingeatmetes O₂) beträgt für Kohlenhydrate daher 1.
- 1 g Glukose ergibt bei vollständiger Verbrennung 4,1 kcal.
- 1 Mol Glukose, das sind 180 g, ergibt bei vollständiger Verbrennung 774 kcal.
- Mit 1 l O₂ werden 5 kcal (20,9 kJ) bereitgestellt.
- Davon können 38% chemisch als ATP gebunden werden.

Da die Synthese von 1 Mol ATP (= 507 g) 7,3 kcal erfordert, ergibt dies eine theoretische Gesamtmenge von 40 Mol ATP pro Mol Glukose, davon zwei Mol durch die Glykolyse ($774 \times 0,38 / 7,3 = 40,3$). Tatsächlich, unter biologischen Realbedingungen, ist die Atmungskette nicht ganz so effizient und liefert netto nur 33 Mol ATP statt der theoretisch zu erwartenden 38, da einige Moleküle ATP verbraucht werden, um die restlichen aus dem Mitochondrieninneren durch die Membranen ins Sarkoplasma zu transportieren (Weibel 2000). Die restlichen 62% der in der Glukose enthaltenen Energie werden als Wärme freigesetzt.

Die Gesamtmenge des im Körper eines untrainierten, 70 kg schweren Mannes gespeicherten Glykogens lässt sich berechnen, wenn man weiß, dass die gesamte Muskelmasse etwa 40% der Körpermasse ausmacht und, wie erwähnt, 1 kg Muskel 15 g Glykogen enthält:

$$70 \times 0,4 \times 15 = 420 \text{ g Muskelglykogen}$$

Dazu kommen etwa 80 g Leberglykogen, somit insgesamt ca. 500 g Glykogen. Dies entspricht einem energetischen Potenzial von 2150 kcal. Unter normalen Umständen steht aber nicht diese gesamte Menge für körperliche Tätigkeit zur Verfügung, da, wie erwähnt, überwiegend das in der arbeitenden Muskulatur vorhandene Glykogen genutzt werden kann. Das Leberglykogen bildet eine autonom geschützte Reserve, die nur unter abnormen Bedingungen mobilisiert werden kann, wie z. B. besondere emotionelle Stimulierung oder die Aufhebung des Müdigkeitsgefühles durch Doping.

1.3.2 Energiebereitstellung aus Fetten

Der Fettabbau beginnt in den Fettzellen, den **Adipozyten**, die das gespeicherte Neutralfett enthalten. Das Enzym **Lipase** spaltet durch Hydrolyse ein Fettmolekül in je drei **Fettsäuren** und **Glycerin** auf. Dieser Vorgang wird **Lipolyse** genannt und wird durch Adrenalin stimuliert. Das Glycerin wird in die Glykolyse eingeschleust, wo ja, wie erwähnt, durch die Spaltung des Glukosemoleküls zunächst glyzerinähnliche Substanzen anfallen. Der weitere Abbau erfolgt dann über Pyruvat und den Zitratzyklus. Die Gesamtausbeute eines Moleküls Glycerin ergibt 19 Moleküle ATP.

Die Fettsäuren gelangen auf dem Blutweg zu den Muskelzellen, werden durch die Zellmembran ins Sarkoplasma aufgenommen und von dort mit Hilfe von **L-Karnitin** durch die Mitochondrienmembran in die Mitochondrien transportiert. Dort werden sie in einer biochemischen Reaktionskette, der **Betaoxidation**, jeweils sukzessive in mehrere Moleküle Azetyl-CoA aufgespalten. Azetyl-CoA bildet mit Oxalazetat Zitrat und wird anschließend im Zitratzyklus und in der Atmungskette weiterverarbeitet. Das Oxalazetat stammt vom Pyruvat und somit aus dem glykolytischen Kohlenhydratabbau. Dies bedeutet, dass ohne Kohlenhydratabbau auch

der Fettabbau auf der Stufe des Azetyl-CoA blockiert ist, ein Umstand, der z. B. bei der Zuckerkrankheit, dem Diabetes mellitus, aber auch bei einem schweren Erschöpfungszustand zu einer lebensbedrohenden Stoffwechselsituation führen kann. Die Bedeutung der Kohlenhydrate auch für den Fettabbau wird durch den folgenden Merkspruch betont:

➤ **Merke: Die Fette verbrennen im Feuer der Kohlenhydrate.**

Bemerkenswert ist auch, dass zwar aus Pyruvat Azetyl-CoA gebildet werden kann, dieser Reaktionsschritt aber nicht reversibel ist. Über die metabolische Zwischensubstanz Azetyl-CoA können daher wohl aus Glukose Fettsäuren aufgebaut werden; nicht aber aus Fettsäuren Glukose. Eine Neubildung von Glukose, eine **Glukoneogenese**, ist aus Glycerin möglich. Wie erwähnt, wird das Glycerin in die Glykolyse eingeschleust. Bei Bedarf kann dann aber nicht nur der Abbau zu Pyruvat, sondern auch der Aufbau zu Glukose erfolgen.

Energetische Eigenschaften von Fett

- Der RQ beträgt für Fett 0,7.
- Pro Fettsäure mit 18 C Atomen werden insgesamt 147 Moleküle ATP gewonnen,
- das ergibt pro Molekül Neutralfett, das ja 3 Fettsäuren enthält, 441 Moleküle ATP.
- Zusammen mit dem Abbau des Glycerins ergibt das eine Gesamtausbeute von 460 Molekülen ATP pro Molekül Neutralfett.
- 1 g Fett ergibt bei vollständiger Oxidation 9,3 kcal.
- Mit 1 l O₂ werden 4,7 kcal (19,7 kJ) bereitgestellt.

Die bereitgestellte Energiemenge pro Mol ist erheblich größer als beim Abbau von Glukose, aber natürlich ist das Fett auch ein erheblich größeres Molekül. Aber auch bezogen auf ein Gramm ergibt die Verbrennung von Fett mehr als die doppelte Energiemenge. Da bei normalgewichtigen schlanken Männern und Frauen je 10% der Körpermasse leicht mobilisierbares Depotfett sind, bedeutet das ein Energiedepot von rund 70.000 kcal (zusätzlich sind je 5% der Körpermasse bei Männern und 15% bei Frauen Baufett, das nur bei extremen Hungerperioden zur Deckung des Energiebedarfs herangezogen wird und normalerweise Stützfunktionen erfüllt, wie z. B. das Nieren- oder Wangenfett). Weniger günstig im Vergleich zu Kohlenhydraten ist die Energieausbeute, wenn man den verbrauchten O₂ berücksichtigt: Bei Verbrauch von 1 l O₂ werden aus Fett 4,7 kcal gewonnen, aus Kohlenhydraten 5,0 kcal, das sind um 6,4% mehr. Bei der Verbrennung von Fetten wird nicht für jedes eingeatmete O₂-Molekül ein CO₂ ausgeatmet, da ein Teil des O₂ für die Wasserbildung verbraucht wird. (Kohlenhydrate bestehen aus einer Anzahl von C-Atomen und der gleichen Menge Wassermolekülen [C_nH_{2n}O_n]. Der O₂ wird, rein rechnerisch, nur zur CO₂-Bildung benötigt.) Bei ausschließlicher Verbrennung von Fetten beträgt der RQ daher 0,7. Allerdings muss hier noch einmal erwähnt werden, dass die ausschließliche Verbrennung von Fetten nur theoretisch ist, da ja tatsächlich der Fettabbau ohne das aus der Glykolyse stammende Pyruvat blockiert ist. Der Vergleich der beiden Hauptnährstoffe für die Energiebereitstellung zeigt, dass Fett wegen seiner hohen Energiedichte ein hervorragender Energiespeicher ist. Pro Gramm ist in Fett um mehr als 100% mehr Energie enthalten als in Kohlenhydraten und sie stehen, zumindest kurzfristig, in unbegrenzter Menge zur Verfügung. Kohlenhydrate sind dann günstiger, wenn es, wie zuvor beschrieben, um die

Energieausbeute pro verbrauchten Liter O_2 geht. Daraus ergibt sich auch das jeweilige Haupteinsatzgebiet der beiden Nährstoffe:

- Fett zur Grundsicherung des Energiebedarfs in Ruhe und bei mäßiger Belastung.
- Kohlenhydrat bei intensiver Belastung, wenn die O_2 -Versorgung der Muskelzellen sehr aufwändig wird.

Bei zunehmender Belastung erfolgt die Regelung, in welchem Verhältnis die beiden Nährstoffe zur ATP-Synthese beitragen, über mehrere Mechanismen, z. B. den Pasteureffekt, der hemmend auf die Glykolyse wirkt und daher den Fettsäurenabbau forciert, oder die intrazelluläre Konzentration an ADP und freier Phosphorsäure, die bei zunehmender Belastung ansteigen und auf die Glykolyse stimulierend wirken, oder die Wirkung des zunehmenden Laktatspiegels. Ab einer Konzentration von 4 mmol/l hemmt er die Lipolyse in den Adipozyten und bringt damit den Nachschub an freien Fettsäuren weitgehend zum Erliegen. Es kann daher unter diesen Bedingungen zwangsläufig nur mehr Azetyl-CoA in den Zitratzyklus eingeschleust werden, das aus der Glykolyse stammt. Der jeweilige Anteil von Fett und Kohlenhydraten an der Energiebereitstellung unter Belastung kann am RQ abgelesen werden.

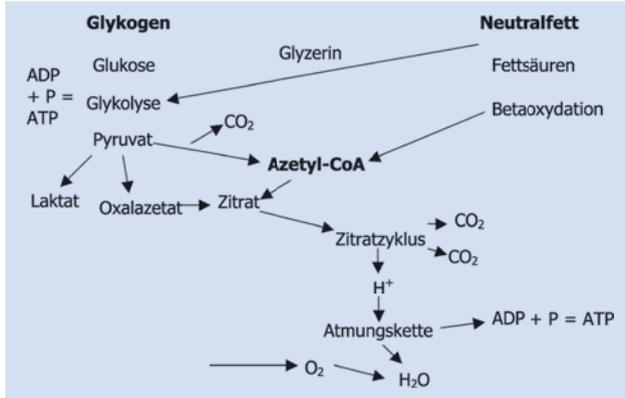
Übrigens beruht die Annahme, dass man am schnellsten Körperfett abnimmt, wenn im Training bei niedriger Trainingsherzfrequenz und niedrigem Tempo überwiegend Fette oxidiert werden (so genanntes **fat-burning-Training**), auf physiologischer Unkenntnis. Um Körperfett abzunehmen, muss die Energiebilanz langfristig negativ sein (siehe Sektion V). Das Energiedefizit muss dann aus den Fettdepots zugeschossen werden! Das erfolgt aber nach dem Training (z. B. auch während des Schlafs). Was dabei während des Trainings verbrannt wird, ist wirklich egal. Im Übrigen wird die absolut größte Menge Fett pro Minute bei einer Intensität zwischen 50 und 70% verbrannt, das ist eine normale Intensität für extensives Ausdauertraining. Bei niedrigerer Intensität ist zwar der relative Anteil von Fett an der Energiebereitstellung größer; weil aber der gesamte Energieumsatz geringer ist, wird auch die abgebaute Fettmenge kleiner (Achten, Gleeson et al. 2002).

➤ Es gibt kein spezielles körperfettreduzierendes fat-burning-Training

Ein anderer weit verbreiteter Irrtum ist, dass es ein spezielles Fettstoffwechseltraining gäbe, das noch dazu durch einen bestimmten Laktatspiegel im Blut definiert werden könnte. Wie geschildert und in [Abb. 1.1](#) dargestellt, produzieren sowohl die Glykolyse als auch die Beta-Oxidation der Fettsäuren zunächst Azetyl-CoA und erst dieses wird in den Zitratzyklus zum weiteren oxidativen Abbau eingeschleust.

➤ Im Zitratzyklus wird nicht nach der Quelle des Azetyl-CoA unterschieden.

Ausdauertraining, das in der Muskelzelle die mitochondriale Enzymmasse für Zitratzyklus und Atmungskette vermehrt (► [Abschn. 1.5.3](#)), verbessert daher immer gleichzeitig sowohl den aeroben Glukose- als auch den aeroben Fettsäurenabbau! Und solange die Atmungskette ausreichend ATP resynthetisieren kann, bleibt die ADP-Konzentration niedrig und die Glykolyse gehemmt. Die Zunahme der Oxidation von Fettsäuren bei höherer Belastung bei Trainierten ist daher eine Folge der allgemeinen Vermehrung der mitochondrialen Enzymmasse durch Ausdauertraining und nicht eine Folge eines speziellen Fettstoffwechseltrainings. Eine Limitierung für den Fettsäurenabbau könnte der von L-Karnitin abhängige Transport durch die Mitochondrienmembran sein.



■ **Abb. 1.1** Schematische Darstellung der Energiebereitstellung aus Kohlenhydrat und Fetten

Der ist aber nicht speziell trainierbar, sondern nimmt mit dem Wachstum der mitochondrialen Oberfläche zu, was ebenfalls ein unmittelbarer Effekt des Ausdauertrainings ist. Die zusätzliche Zufuhr von L-Karnitin als Nahrungsergänzungsmittel verbessert die Fettsäureoxidation nicht, woraus geschlossen werden kann, dass auch die Verfügbarkeit von L-Karnitin und damit der Transport von Fettsäuren durch die Mitochondrienmembran kein limitierender Faktor für den oxidativen Fettabbau ist. Daraus folgt:

➤ **Es gibt kein spezielles Fettstoffwechseltraining.**

1.3.3 Energiebereitstellung aus Protein

Die Nahrungsproteine werden im Darm zunächst in ihre Bestandteile, die **Aminosäuren**, zerlegt, die in erster Linie für die Synthese körpereigener Proteine zur Verfügung stehen. Nur ein sehr kleiner Anteil von maximal 5% geht direkt in die Energiebereitstellung.

Die Synthese körpereigener Proteine aus Aminosäuren wird **Anabolismus** genannt. Das betrifft vor allem Funktionsproteine, wie z. B. den Proteinanteil von Enzymen (**Apo-Enzym**), das Globin im Häm- oder Myoglobin oder Strukturproteine, wie z. B. kollagene Fasern. Die Notwendigkeit eines beständigen, ununterbrochenen Anabolismus ergibt sich durch den Umstand, dass alle Proteinstrukturen des Körpers einem ununterbrochenen Abbau unterliegen, der **Katabolismus** genannt wird. Trotz dieses beständigen Umbaus bleiben die Form und auch die Funktion des Körpers, zumindest mittelfristig, gleich. Dies ist dem Umstand zu verdanken, dass Katabolismus und Anabolismus im Normalfall ausgewogen ablaufen. Zwischen beiden gibt es allerdings einen gravierenden Unterschied: Katabole Vorgänge laufen von ganz alleine ab, also auch und besonders bei vollkommener Untätigkeit, wie z. B. der Abbau von Myofibrillen oder der Knochenmatrix. Anabole Prozesse bedürfen hingegen eines adäquaten Stimulus, wie z. B. die funktionell angemessene Belastung der Muskulatur oder die mechanische Beanspruchung der Knochen. Gehen z. B. durch Bewegungsmangel diese Stimuli zurück, dann gehen auch die anabolen Prozesse zurück und es überwiegt der Katabolismus. Es kommt zur **Atrophie**, was sich als Muskelschwund (**Sarkopenie**) oder Knochenschwund (**Osteoporose**) manifestiert. Durch die alleinige Zufuhr von Protein, ohne gleichzeitige adäquate Belastungen wird, weder der Anabolismus gefördert, noch der Katabolismus verhindert.