

A 3D ball-and-stick model of a molecular structure is positioned in the upper right corner. It features several red spheres, two orange spheres, and a few blue and grey spheres, all connected by white rods. The background is a vibrant green with faint, light-green curved lines.

Hans Konrad Biesalski

Mikronährstoffe als Motor der Evolution



Springer Spektrum

Mikronährstoffe als Motor der Evolution

Hans Konrad Biesalski

Mikronährstoffe als Motor der Evolution



Springer Spektrum

Hans Konrad Biesalski
Department of Biological Chemistry
and Nutrition
University of Hohenheim
Stuttgart
Deutschland

ISBN 978-3-642-55396-7
DOI 10.1007/978-3-642-55397-4

ISBN 978-3-642-55397-4 (ebook)

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 Berlin Heidelberg 2015

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.

Planung: Merlet Behncke-Braunbeck
Satz: Crest Premedia Solutions (P) Ltd., Pune, India

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer-Verlag ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

www.springer.com

Vorwort

Vitamine – jeder braucht sie, manche halten sie für giftig, andere können nicht genug davon bekommen. Sicher ist, dass wir ohne Vitamine, die zusammen mit den Mineralien und Spurenelementen zu den Mikronährstoffen gezählt werden, krank werden, und gelegentlich kann ein Mangel auch tödlich enden. Nun haben wir in den wohlhabenden Nationen eigentlich kein Problem mit einem Vitaminmangel, sofern wir uns ausgewogen ernähren. In ärmeren Schwellenländern oder auch Ländern der Dritten Welt dagegen ist der Mangel an einzelnen Vitaminen, aber auch an anderen Mikronährstoffen wie Eisen und Zink, weit verbreitet und für eine Vielzahl von Todesfällen, vor allem bei Kindern, verantwortlich. Ursache sind eine unzureichende Versorgung mit Nahrungsmitteln, die Mikronährstoffe enthalten, und ein fehlendes Wissen über eine gesunde Ernährung.

Wenn es darum geht, den Hunger zu stillen, sind Mensch und Tier sehr erfinderisch. Hauptsache es kann etwas gekaut und geschluckt werden, was das quälende Gefühl des Hungers beseitigt. Einen Hunger auf gesunde Nahrung gibt es allerdings ebenso wenig, wie einen Hunger auf Vitamine. Jedenfalls ist kein Sinnesorgan oder Sinnesreiz bekannt, der gezielt auf Mikronährstoffe ausgerichtet wäre. Der Hunger zielt einzig und alleine auf die Energiezufuhr.

Makronährstoffe – Fett, Protein, Kohlenhydrate – liefern Energie, wohingegen Mikronährstoffe keine Energie für den Körper bereitstellen. Da der Körper in Zeiten des Überschusses eigene Energiereserven anlegt, können wir eine Zeit lang auf einzelne Makronährstoffe verzichten. Mit welchen Nahrungsmitteln wir dann aber unseren Hunger stillen, ist dem Organismus zunächst einmal egal. Ihn scheint nicht zu interessieren, ob er neben der Energie auch genügend Vitamine erhält, um seine Funktionalität sicherzustellen. Und überhaupt: Vitamine kennen wir erst seit etwas mehr als 100 Jahren und können erst frühestens seit dieser Zeit darauf achten, dass wir über unsere Nahrung genug davon erhalten.

Unsere Urahnen haben weder gewusst, was ein Vitamin ist, noch wo sie es herbekommen könnten. Nun gibt es den Menschen bzw. seine Urahnen seit etwa 7 Mio. Jahren und es stellt sich die Frage, wie die Evolution es fertiggebracht hat, dass er immer ausreichend mit allem, das heißt mit genügend Energie aus Makronährstoffen und genügend essenziellen Mikronährstoffen versorgt war – und dies auch in Zeiten, als sich durch den Klimawandel das Nahrungsangebot nachhaltig veränderte. Wird die Energie über lange Zeit knapp, so führt dies letztlich zum Verhungern. Aber welchen Einfluss hatten Mikronährstoffe, die mal ausreichend, mal nur in geringer Menge in der Nahrung vorhanden waren oder die gelegentlich auch gar nicht zur Verfügung standen, auf die Evolution des Menschen? Hat der Mensch den Sprung an die Spitze der Säugetiere geschafft, weil er besser als andere Lebewesen mit Mikronährstoffen versorgt war, und wenn ja, was können wir daraus lernen? Mit diesen Fragen wird sich das Buch auseinandersetzen und damit auch das Verständnis für die Bedeutung der Mikronährstoffe für den heutigen Menschen vertiefen.

Danksagung

Im Jahr 2008 hatte ich das Glück, zusammen mit Randolph Nesse, Professor für Psychologie und Psychiatrie der University of Michigan und Direktor des Evolution and Human Adaptation Program, als Fellows des Wissenschaftskollegs Berlin am Arbeitsschwerpunkt »Evolutionäre Medizin« teilnehmen zu dürfen. Mit ihm habe ich damals intensiv über Fragen des Zusammenhangs zwischen der Ernährung und der Evolution des Menschen und über die Lehren, die wir heute daraus ziehen können, diskutiert. Dieser konstruktive Austausch, für den ich ihm an dieser Stelle herzlich danken möchte, hat den Grundstein für dieses Buch gelegt. Meiner Frau danke für die unermüdliche Korrektur von kleinen und großen Mißverständnissen. Frau Dr. Christine Lambert danke ich für ihre wertvolle Hilfe bei der Zusammenstellung der unterschiedlichen und manchmal exotischen Nahrungsmittel. Mein besonderer Dank gilt Frau Dr. Birgit Jarosch, die als kompetente und auch konsequente Lektorin viele Scharfen erkannt und ausgewetzt hat und nicht müde wurde, immer wieder nachzuhaken. Ich danke auch allen, die die Kapitel korrekturgelesen und mit kritischen Anmerkungen versehen und damit verbessert haben. Nicht zuletzt danke ich dem Springer-Verlag, allen voran Merlet Behncke-Braunbeck und Anja Groth, der sich auf das Wagnis eines solchen Buches eingelassen hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Evolution	1
1.1	Was ist eigentlich Evolution?	2
1.2	Was treibt Evolution bis heute an?	5
	Literatur	7
2	Ernährung	9
2.1	Makronährstoffe	10
2.1.1	Protein als Makronährstoff	10
2.1.2	Fett als Makronährstoff	11
2.1.3	Kohlenhydrate als Makronährstoff	12
2.2	Mikronährstoffe	13
2.2.1	Wie wird eine ausgewogene Versorgung mit Mikronährstoffen sichergestellt? ..	14
2.2.2	Kritische Mikronährstoffe	16
2.2.3	Mikronährstoffe – Bedeutung für Überleben und Fortpflanzung	19
2.3	Nährstoffe mit Einfluss auf die Reproduktionsrate	21
2.3.1	Makronährstoffe	22
2.3.2	Mikronährstoffe	23
	Literatur	25
3	Nutritive Nischen und Nischenkonstruktionen	27
3.1	Leben und ernähren im Regenwald	30
3.1.1	Der Regenwald und seine Bewohner	31
3.1.2	Nischen und Nischenkonstruktionen im Regenwald	36
3.2	Di- und trichromatisches Sehen	36
3.2.1	Wahrnehmung von Provitamin-A-haltiger Nahrung	37
3.2.2	Wahrnehmung von sexuell attraktiven Farbsignalen	39
3.3	Vitamin-C-Synthese	40
3.4	Urat-Oxidase	44
3.5	Die Energienische	46
3.6	Die Mangelnische	47
3.6.1	Beziehung zwischen Körpergröße und Sterblichkeit	49
3.6.2	Wovon ernähren sich die Pygmäen?	50
3.6.3	Gemeinsamkeiten von Stunting- und Pygmy-Phänotyp	52
3.7	Der Homo floresiensis	54
	Literatur	58
4	Fingerabdrücke der Nahrung	61
4.1	C₃- und C₄-Pflanzen	62
4.2	Kohlenstoffisotope	64
4.3	Klimaveränderung und Wandel des Nahrungsspektrums	65
4.4	Zähne erzählen über Ernährung	66
	Literatur	68

5	Unsere frühesten Vorfahren	69
5.1	Die Ernährung unserer Ahnen und ihre Folgen	72
5.2	Der <i>Sahelanthropus tchadensis</i>	72
5.2.1	See- und Flussuferhabitate	75
5.2.2	Vorteile des Fischfangs	82
5.3	Der <i>Ardipithecus ramidus</i>	86
	Literatur	90
6	Die Wiege der Menschheit	91
6.1	Die Gattung <i>Australopithecus</i>	92
6.2	Die grazilen <i>Australopithecinen</i>	93
6.2.1	Der <i>Australopithecus anamensis</i>	93
6.2.2	Der <i>Australopithecus afarensis</i>	94
6.3	Die robusten <i>Australopithecinen</i> – <i>Paranthropus</i>	97
6.4	Menschwerdung	99
6.4.1	Klimaentwicklung im Übergang zur Menschwerdung	100
6.4.2	Die Variabilitäts-Selektions-Hypothese	105
6.5	Die Vertreibung aus dem Paradies	109
	Literatur	111
7	Friss oder stirb	113
7.1	Klimawandel und Nahrungsangebot	115
7.2	Die Savanne als Habitat	117
7.2.1	Früchte	121
7.2.2	Leguminosen und Wurzeln	122
7.2.3	Wurzeln und Knollen – USOs und weitere Fallback-Nahrung	124
7.2.4	Invertebraten als Nahrung	127
7.3	Ernährung am Rande der Savanne	131
7.3.1	Vertebraten als Nahrung	135
7.3.2	Die <i>meat-scrap</i> -Hypothese	136
	Literatur	141
8	Aufrecht aus dem Wald	143
8.1	Der <i>Homo erectus</i>	147
8.2	Hungerstoffwechsel	149
8.2.1	Optimierung der Energieausbeute durch Genkopien	151
8.2.2	Gibt es einen Mikronährstoffhunger?	152
	Literatur	154
9	Was ist Geschmack?	155
9.1	Evolution des Geschmacks	156
9.2	Geschmackspräferenz und Nahrungsqualität	157
9.3	Geschmacksanpassung	158
9.4	Geschmack und Nahrungswahl	158
9.4.1	Kohlenhydratgeschmack	160
9.4.2	Fettgeschmack	161
9.4.3	»Giftgeschmack«	161

9.4.4	Proteingeschmack.....	163
9.5	Vom Frugivoren zum Omnivoren	165
	Literatur	166
10	Der Weg zum <i>Homo sapiens</i>	167
10.1	Gehirnentwicklung und Ernährung	171
10.2	Die Hypothese des <i>expensive</i> und des <i>selfish brain</i>	174
10.3	Hirnentwicklung und Nahrungsverfügbarkeit	175
10.4	Meat makes man	178
10.4.1	Protein	178
10.4.2	Taurin	180
10.4.3	Fettsäuren	183
10.5	Hirnentwicklung und Nahrungsqualität	186
	Literatur	187
11	Mikronährstoffe und Gehirn	189
11.1	Jagen und Orientierung als Auslöser für die Hirnentwicklung	194
11.1.1	Limbisches System und Hippocampus.....	195
11.1.2	Nischenkonstruktion und Plastizität des Hippocampus	196
11.2	Mikronährstoffe und Entwicklung des Gehirns	199
11.2.1	Eisen	200
11.2.2	Jod	204
11.2.3	Zink	206
11.2.4	Vitamin-A.....	206
11.2.5	Vitamin-D.....	208
11.2.6	Cholin-, Vitamin-B ₁₂ - und Folsäure.....	211
11.2.7	Vitamin-C.....	212
11.3	Fazit	213
	Literatur	216
12	Evolution des Menschen als Beispiel einer gelungenen Nischenkonstruktion	221
12.1	Die Pigmentierung der Haut	222
12.1.1	Depigmentierung der Haut	225
12.1.2	Vitamin D und Tuberkulose	227
12.2	Die Folsäurenische	230
12.3	Die Milchnische	231
12.4	Der <i>H. neanderthalensis</i>: Opfer einer missglückten Nischenkonstruktion?	232
12.4.1	Die Nahrung des <i>H. neanderthalensis</i>	233
12.4.2	Die optimale Nische als Sackgasse.....	234
12.4.3	Das Aussterben des <i>H. neanderthalensis</i>	234
	Literatur	237

Serviceteil

Stichwortverzeichnis	240
-----------------------------------	-----

Evolution

- 1.1 Was ist eigentlich Evolution? – 2
- 1.2 Was treibt Evolution bis heute an? – 5
- Literatur – 7

» Nothing in biology makes sense except in the light of evolution. (Dobzhansky 1973)

Der Begriff Evolution, abgeleitet von dem lateinischen *evolvere*, bedeutet »entwickeln«. Damit ist die ständige Weiterentwicklung einer Spezies gemeint, ein fortschreitender Prozess, der es der Spezies erlaubt, sich an die sich stetig verändernden Umweltbedingungen optimal anzupassen. Dabei bedeutet eine optimale Anpassung, dass die Mitglieder der Spezies ihre Gene austauschen und sich so unter den vorherrschenden Bedingungen vermehren können. Gelingt dies nicht in ausreichendem Umfang (beispielsweise durch eine niedrige Populationsdichte), so wird die Spezies nicht überleben können. Damit ist fast alles erwähnt, was die Evolution antreibt: Die Umweltveränderung führt zur natürlichen Selektion eines Genotyps einer Spezies, der Merkmale vermittelt, die unter den gegebenen Umständen günstig sind und die mit einer ausreichenden Reproduktionsrate weiter verbreitet werden.

Die Prinzipien der Evolution liefern einige Beispiele, die zeigen, dass die Verfügbarkeit einzelner Mikronährstoffe einen Vorteil für die Individuen brachte, der im Rahmen der natürlichen Selektion zur Weiterentwicklung geführt hat. Um dies zu verstehen, beginnen wir mit einem Exkurs in die Evolutionstheorie.

Auf unserem Planeten leben etwa 2 Mio. uns bekannte Tier- und Pflanzenarten. Die Zahl der tatsächlich auf der Erde existierenden Arten dürfte jedoch viel höher sein. Je nach Quelle und Zählart könnten es bis zu 5 Mio. sein. Tiere und Pflanzen besiedeln nahezu jeden Ort und sei er noch so lebensfeindlich, wobei die Regionen mit den extremsten Umweltbedingungen wie heiße Quellen oder Salzseen Mikroorganismen vorbehalten sind. Obgleich der Mensch sicherlich nicht überall auf der Erde leben und sich entwickeln kann, vermag er dennoch aufgrund seiner Intelligenz, mit deren Hilfe er sich eine entsprechende technische Ausrüstung konstruieren kann, an fast jeden Ort zu gelangen – letztlich bis zum Mond und in Zukunft sicherlich auch darüber hinaus. Der Mensch ist jedoch, wie alles Leben auf dem Planeten, ein Zwischenergebnis – eine Art Momentaufnahme – des stetigen Prozesses der Evolution.

1.1 Was ist eigentlich Evolution?

Entscheidend den Begriff der Evolution geprägt hat der englische Naturforscher Charles Darwin (1808–1882). Darwin hatte bereits in jungen Jahren seine Begeisterung für die Natur entdeckt, absolvierte aber zunächst ein Theologiestudium, bis er schließlich im Dezember 1881 seine legendäre Reise auf der HMS Beagle antrat, die ihn einmal um die Welt, unter anderem zu den Galapagos-Inseln, führte. Darwin widmete sich bei seinen Landausflügen der Geologie, beschrieb aber auch sehr detailliert zahlreiche Tier- und Pflanzenarten und nahm eine große Zahl an Proben, die er konservierte und sorgfältig katalogisierte. Am Ende seiner fast fünfjährigen Reise füllten seine Eindrücke schließlich Hunderte von Seiten in seinen Notizbüchern. Darwins Beobachtungen, insbesondere das Studium der Finken auf den Galapagos-Inseln, bildeten die Grundlage für seine Überlegungen zur Entstehung der Arten. Er entwickelte radikale Thesen zur Anpassung an den Lebensraum durch genetische Variation und natürliche Selektion und verfasste schließlich mehrere grundlegende Werke zur Diversität des Lebens, darunter sein berühmtes Werk *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*, kurz *On the origin of species* (Über die Entstehung der Arten).

Die zentralen Aussagen der von Darwin formulierten Evolutionstheorie sind bis heute gültig:

- Lebewesen innerhalb einer sich vermehrenden Population unterscheiden sich in Verhalten und Morphologie
- Nachkommen erben morphologische und Verhaltenseigenschaften von ihren Eltern
- die Individuen einer Art tragen nicht mit derselben Anzahl von Nachkommen zum Fortbestehen ihrer Art bei

Wesentlich für die Evolution sind das Überleben einzelner Individuen und ihre Reproduktion. Beides wird unter anderem beeinflusst von der natürlichen Selektion. Diese verschafft Individuen mit bestimmten Merkmalen unter bestimmten Umweltbedingungen einen Reproduktions- und Überlebensvorteil gegenüber anderen, die diese Merkmale nicht besitzen – diese Merkmale steigern also die Fitness ihres Trägers. Folge ist, dass die unter den gegebenen Bedingungen vorteilhaften Merkmale häufiger an die nächste Generation weitergegeben werden, als unvorteilhafte, und so mit der Zeit immer mehr Individuen über diese günstigen Merkmale verfügen. Über Generationen hinweg kann es so zu Anpassungen (Adaptationen) an bestimmte Umweltbedingungen kommen. Die natürliche Selektion beeinflusst also die Fitness der Individuen in ihrem jeweiligen Habitat.

Definition

Fitness: Fähigkeit, innerhalb eines Lebensraums (Habitat) Nachkommen zu zeugen, die überleben und sich weiter fortpflanzen können

Betrachtet man nun das verfügbare Nahrungsangebot in einem Lebensraum, dann kann eine entsprechend angepasste (adaptierte) Population das Angebot optimal für Überleben und Reproduktion nutzen. Bei einer Veränderung des Nahrungsangebots kann jedoch über einen langen Zeitraum hinweg eine evolutionäre Anpassung stattfinden. Aufgrund der genetischen Variabilität unter den Vertretern einer Spezies verfügen einzelne Individuen über genetische Eigenschaften oder Verhaltensstrategien, die es ihnen erlauben, das veränderte Nahrungsangebot zu nutzen und sich einen Selektionsvorteil zu verschaffen. Ihre Fitness wird im Vergleich zur Fitness anderer Individuen erhöht, sodass sich ihre Eigenschaften häufiger in den folgenden Generationen wiederfinden werden. Neben der natürlichen Selektion, beispielsweise in Form einer metabolischen Anpassung, kann, zumindest beim Menschen, allerdings auch eine kulturelle oder soziale Coevolution erfolgen. So gibt es in verschiedenen Ethnien eine Reihe von Nahrungstabus, die die Menschen schützen. Ein Beispiel ist das Tabu für schwangere Frauen, bittere Lebensmittel zu verzehren, um sie so vor unverträglichen Nahrungsmitteln zu bewahren. Dies wiederum kann zur Ausprägung eines Typus mit besonders sensibler Bitterwahrnehmung führen.

Der Einfluss der Umwelt auf die Evolution wurde von Ernst Mayr, einem der großen Evolutionsbiologen des vergangenen Jahrhunderts, als adaptive Radiation, also adaptive Ausbreitung oder Auffächerung, bezeichnet. Zu dieser Aufspaltung einer Art in neue Arten kommt es beispielsweise, wenn sich Populationen durch die Anpassung an neue Umweltbedingungen stärker spezialisieren und neue ökologische Nischen besetzen. Dies kann der Fall sein, wenn einzelne Individuen in andere geografische Regionen abwandern und sich damit anderen Umweltbedingungen aussetzen, oder wenn sich die Bedingungen im Lebensraum einer Population verändern. Werden die Lebensräume von Populationen einer Art, sei es durch natürliche

Barrieren oder schlicht zu große räumliche Distanzen, voneinander getrennt, werden die Gene der Teilpopulationen nicht mehr ungehindert ausgetauscht und die Teilpopulationen entwickeln sich unabhängig voneinander weiter. Da in den verschiedenen Lebensräumen zudem unterschiedliche Selektionsfaktoren auf die Teilpopulationen wirken, nehmen ihre genetischen Unterschiede weiter zu, bis schließlich verschiedene Arten entstanden sind, die miteinander keine fruchtbaren Nachkommen hervorbringen können. Sind die Bedingungen in getrennten Habitaten für die Teilpopulationen jedoch gleich, so können sich unabhängig voneinander ähnliche Phänotypen entwickeln, die sich auch miteinander fortpflanzen können, falls die Trennung aufgehoben werden sollte.

Definition

ökologische Nische: »die Gesamtheit der Beziehungen zwischen einer Art und ihrer Umwelt, wobei sowohl biotische Faktoren (andere Organismen, z. B. Nahrung, Konkurrenten, Feinde, Symbionten, Parasiten) als auch abiotische Faktoren (physikalische Faktoren, wie Temperatur, Feuchtigkeit, Salinität und andere) berücksichtigt werden« (► <http://www.Spektrum.de/lexikon/biologie>; Zugriff: 10.11.2014)

Arten können neue ökologische Nischen besetzen. Dies kann als Reaktion auf ein konstant reduziertes Energieangebot passieren, oder als Folge einer Verknappung oder gänzlichem Fehlen eines oder mehrerer essenzieller Nährstoffe in dem bisherigen Lebensraum. Eine solche »Neubesiedlung« kann mithilfe der natürlichen Selektion erfolgen, indem beispielsweise Eigenschaften begünstigt werden, die es gestatten, auf einen oder mehrere Mikronährstoffe zu verzichten, die im neuen Habitat möglicherweise fehlen, bzw. solche, die mit weniger Energie auszukommen. Ebenso kann es sich um Eigenschaften handeln, die es erlauben, Nahrungsquellen zu erkennen, welche die knapp gewordenen Stoffe enthalten, oder auch diese effizienter aufzunehmen und zu metabolisieren. Auch solche Eigenschaften können im Zuge der natürlichen Selektion begünstigt werden, das heißt, sie üben einen entsprechend großen Selektionsdruck aus.

Oft werden Nischen durch Klimaveränderungen verursacht und können so zu neuen Spezies führen, die durch die natürliche Selektion an die veränderten Lebensbedingungen angepasst wurden. Da Klimaveränderungen einen direkten Einfluss auf die Ernährung haben, erfolgen solche Anpassungen häufig verhältnismäßig rasch und untermauern somit die Theorie des Punktualismus (*punctuated equilibrium*). Nach dieser Theorie führt eine neue Anpassung nach einer langen Phase mit nur sehr wenigen Veränderungen, das heißt der genetischen Stabilität, zu einer in evolutionären Maßstäben gemessen raschen Entwicklung einer neuen Art, der wiederum eine längere Phase der gleichmäßigen und geringen Entwicklung folgt. Dem gegenüber beschreibt die Theorie des Gradualismus einen mit gleichmäßiger Geschwindigkeit fortschreitenden Wandel mit nur geringen, aber dafür stetigen Veränderungen und genetischen Anpassungen. Immer wieder auftretende Klimaveränderungen können so zur Trennung von Populationen beitragen und damit die Bildung neuer Arten begünstigen oder auch verhindern bzw. zu Parallelentwicklungen in getrennten Lebensräumen führen. Dies spielt gerade im Zusammenhang mit der Ernährung eine ganz wesentliche Rolle, wie noch an verschiedenen Beispielen erläutert wird.

1.2 Was treibt Evolution bis heute an?

- » The environment presents challenges to living species, to which the latter may respond by adaptive genetic changes. (Dobzhansky 1973)

Die Umwelt der Lebewesen fordert diese durch ihren ständigen Wandel immer wieder heraus, sich an neue Bedingungen anzupassen, um nicht unterzugehen. Wird zum Beispiel durch Temperaturänderung eine lebenswichtige Ressource knapp, so muss die genetische Adaptation Wege finden, den Bedarf an dieser Ressource zu verringern bzw. ganz darauf verzichten zu können oder sie gegen eine andere auszutauschen, die deren Funktion übernimmt. Das bedeutet, es werden nur die Individuen überleben und sich erfolgreich reproduzieren, die bereits über die entsprechende genetische Ausstattung für derartige Anpassungen verfügen und das Fehlen der Ressource kompensieren können (*survival of the fittest*). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass einzelne Individuen oder ganze Populationen aus dem vom Ressourcenmangel betroffenen Gebiet auswandern. Dabei ist der stärkste Antrieb zum Verlassen des Lebensraums der Hunger. Umgekehrt können sich einwandernde, bereits an den Lebensraum adaptierte Individuen einer Art mit den dort lebenden Individuen derselben Art kreuzen und die genetische Vielfalt der lokalen Population und damit auch ihre »Fitness« erhöhen.

Der Organismus der meisten lebenden Arten ist so programmiert, dass bei der Nahrungssuche Nahrung mit einem hohen Energiegehalt favorisiert wird – Nahrungssuche ist in erster Linie eine Suche nach Energie. Der Energiebedarf kann entweder durch kontinuierliche oder auch durch zeitlich begrenzte Nahrungsaufnahme gedeckt werden. Energiemangel löst Hunger und damit Nahrungssuche aus.

Zur Auswahl der Nahrung gebrauchen wir alle unsere fünf Sinne, in erster Linie den Geschmackssinn. Was nicht schmeckt, bleibt liegen, es sei denn, der Hunger zwingt es hinein. Wer nun aber denkt, das Überleben sei gesichert, wenn der Hunger gestillt ist, der irrt. Zum Leben ist Energie in Form von Fett, Protein oder Kohlenhydraten notwendig. Organismen benötigen jedoch zusätzlich eine ganze Reihe von Stoffen, die zwar keine Energie liefern, aber dafür sorgen, dass der Motor läuft – die sogenannten Mikronährstoffe. Da wir sie von ganz wenigen Ausnahmen abgesehen nicht in unserem Stoffwechsel herstellen können, müssen wir sie mit unserer Nahrung aufnehmen. Man bezeichnet sie daher als essenzielle Mikronährstoffe. Wie oft und in welcher Menge wir sie brauchen hängt davon ab, wie rasch sie verbraucht werden und ob sie gespeichert werden können oder nicht. Fehlt ein Mikronährstoff über längere Zeit, werden wir krank oder unsere Fähigkeit zur Reproduktion ist beeinträchtigt. Damit aber sind die wesentlichen Faktoren betroffen, die die Evolution antreiben: Überleben und Reproduktion.

Definition

essenzielle Nährstoffe: Substanzen, die vom Organismus nicht selbst hergestellt und daher über die Nahrung aufgenommen werden müssen und für die Funktion des Organismus benötigt werden

Makronährstoffe: Kohlenhydrate, Fett, Protein

Mikronährstoffe: Vitamine, Mineralien, Spurenelemente

Wer oder was gibt aber das Signal zur Aufnahme von Mikronährstoffen? Möglicherweise ist ein solches Signal aber auch gar nicht nötig, denn die erforderlichen Mikronährstoffe könnten auch in der entsprechenden Menge in der Nahrung vorhanden sein, die das besiedelte Habitat zur Verfügung stellt. Was aber, wenn durch Veränderungen der Umwelt ein Nahrungsmittel knapp wird oder verschwindet, das einen oder mehrere der essenziellen Mikronährstoffe enthält? Machen sich die betroffenen Populationen gezielt auf die Suche danach?

In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage, ob es einen Sensor, das heißt eine Sinnesempfindung, für Mikronährstoffe gibt, mit dem der Gehalt der Nahrung an Mikronährstoffen erkannt werden kann, und ob selektiv nach entsprechenden Nahrungsmitteln gesucht wird. Forschungen aus jüngerer Zeit haben Hinweise erbracht, dass der Stoffwechsel des Menschen auf eine Verknappung an Mikronährstoffen mit einer Steigerung des Verzehrs an Makronährstoffen reagiert, um so eventuell auch wieder mehr Mikronährstoffe zu erhalten. Letztendlich, so die Theorie, würde dann eine Unterversorgung an Mikronährstoffen zur Entwicklung des Übergewichts beitragen.

Ist es Zufall, dass unsere sich entwickelnden Vorfahren, angefangen von den reinen Frugivoren bis hin zu den Omnivoren, immer bedarfsgerecht ernährt haben, oder ist es den jeweiligen Spezies gelungen, sich an die sich immer wieder verändernden Habitate und das darin vorhandene Nahrungsangebot anzupassen? Die Entwicklung zeigt, dass in den meisten Fällen eine Anpassung an die durch das Nahrungsangebot des Habitats mögliche Versorgung mit Makro- und Mikronährstoffen erfolgt ist. Allerdings ist dies nicht immer gelungen, beispielsweise wenn sich die Versorgung akut verschlechterte (Verlust eines Mikronährstoffs durch klimatische Veränderungen) oder wenn die Anpassung auf dem Weg der natürlichen Selektion nicht erfolgreich war. Viele Verzweigungen des menschlichen Stammbaums haben sich im Nachhinein als Sackgasse erwiesen – die vorhandenen Spezies (d.h. ihre genetische Variabilität) konnten sich den sich verändernden Umweltbedingungen nicht entsprechend anpassen und neue ökologische Nischen besetzen, weil etwas Grundlegendes fehlte, das zum Fortbestand der Art unentbehrlich war.

Ob eine Spezies überlebt, hängt unter anderem von der Populationsdichte innerhalb des Habitats sowie der Menge und Art an verfügbarer Nahrung ab. Hinsichtlich der Versorgung mit Mikronährstoffen entscheiden demnach zwei Dinge über das Überleben der Population:

- die Verfügbarkeit von Mikronährstoffen in ausreichender Menge zur Sicherung des Überlebens und der Reproduktion
- die Fähigkeit zur Anpassung an sich verändernde Umweltbedingungen bzw. an einen fehlenden bzw. selten vorkommenden Mikronährstoff

Vor diesem Hintergrund soll in diesem Buch versucht werden, folgende Fragen zu beantworten:

- Wie sah die Versorgung unserer frühen Vorfahren mit Mikronährstoffen aus?
- In welchen Habitaten haben unsere Vorfahren gelebt und welche Mikronährstoffe haben sie dort vorgefunden?
- Wie haben sich die Umweltbedingungen in diesen Habitaten mit der Zeit verändert?
- Welche Auswirkungen hatten solche Veränderungen auf die Verfügbarkeit von Mikronährstoffen und welche Rolle spielte diese Verfügbarkeit bei der Menschwerdung?
- Welche Möglichkeiten der Kompensation fehlender Mikronährstoffe gab es und wie haben diese die menschliche Entwicklung beeinflusst?

Wenn im Folgenden die Frage erörtert werden soll, welche Rolle Mikronährstoffe in der Evolution des Menschen gespielt haben, so mögen Sie sich fragen, warum dies überhaupt von Bedeutung sein könnte. Sofern ausreichend Nahrung zur Verfügung stand, sollte die Versorgung

mit diesen Mikronährstoffen kein Problem gewesen sein. Das ist in der Tat richtig, wenn die angebotene Nahrung die Bedürfnisse des Individuums hinsichtlich der ausreichenden Versorgung mit diesen Mikronährstoffen dauerhaft sicherstellt. Dafür sprechen das Überleben und die erfolgreiche Fortpflanzung einer Art innerhalb eines Lebensraums. Dies gilt bis heute für viele Arten, so auch für den modernen Menschen, solange er in seinem Lebensraum über ein Angebot an Nahrungsmitteln verfügt, das in seiner Menge und Qualität (Vorkommen aller essenzieller Mikronährstoffe) ausreicht, ihn adäquat zu ernähren.

Vor welchem Hintergrund ist vorstellbar, dass Mikronährstoffe die Entwicklung einer Art innerhalb ihres angestammten Lebensraums beeinflussen? Wodurch wird ein ausreichend hoher Selektionsdruck erzeugt, der so grundlegende Veränderungen im Geno- und Phänotyp hervorruft, die die Versorgung und Wirkung der Mikronährstoffe betreffen?

Definition

Gen: Abschnitt auf der DNA, der eine Vererbungseinheit darstellt

Genotyp: individuelle Ausstattung eines Organismus mit Genen; bestimmt den Phänotyp

Phänotyp: Ausprägung physiologischer und morphologischer Merkmale wie auch Verhaltensweisen eines Individuums

Wesentlich beeinflusst wird die Evolution von den Umweltbedingungen des Habitats, in dem eine Art lebt. Ernährung ist die wichtigste Verbindung zwischen Individuum und Umwelt. Bei dieser Aussage ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Umgebungstemperatur und andere physikalische Parameter, die die Umweltbedingungen beschreiben, die Nahrungsqualität bzw. die Ernährung direkt beeinflussen. Damit ist bereits der Rahmen gesteckt, in dem Mikronährstoffe eine Rolle spielen. Veränderungen der Umweltbedingungen führen zu Veränderungen des Nährstoffangebots und somit zu Veränderungen des vorhandenen Spektrums an Mikronährstoffen.

Ändert sich das Nahrungsangebot im angestammten Lebensraum einer Population, müssen zumindest einzelne Individuen der Population, um überleben zu können, entweder den Lebensraum verlassen oder sich an das veränderte Nahrungsangebot anpassen. Eine Population wird den Lebensraum immer dann verlassen, wenn nicht genügend Nahrung vorhanden ist, das heißt, wenn sie unter ständigem Hunger leidet und keine alternativen Nahrungsquellen erschlossen werden können. Ähnliches gilt auch, wenn Umwelteinflüsse die Verfügbarkeit wichtiger Mikronährstoffe verringern. Die Population wird sich daran anpassen bis hin zur Selektion einer neuen Art, die diesen Mikronährstoff nicht oder nur in sehr geringer Menge braucht. Alternativ stirbt die Population bzw. die Art aus.

Eine Art ist in ihrem Lebensraum, dem Habitat, an das verfügbare quantitative und qualitative Nahrungsangebot angepasst. Solange sich die Bedingungen nicht gravierend ändern und die Nahrungsquelle Bestand hat, also beispielsweise nicht durch eine steigende Zahl an Nahrungskonkurrenten oder Klimaveränderungen gefährdet ist, ist das Überleben der Art gesichert. Eine nachhaltige Veränderung des Nahrungsangebots kann einen erheblichen Selektionsdruck ausüben und damit zur Weiterentwicklung der Art beitragen.

Literatur

Dobzhansky T (1973) Nothing in biology makes sense except in the light of evolution. *Am Biol Teach* 35:125–129

Ernährung

2.1 Makronährstoffe – 10

- 2.1.1 Protein als Makronährstoff – 10
- 2.1.2 Fett als Makronährstoff – 11
- 2.1.3 Kohlenhydrate als Makronährstoff – 12

2.2 Mikronährstoffe – 13

- 2.2.1 Wie wird eine ausgewogene Versorgung mit Mikronährstoffen sichergestellt? – 14
- 2.2.2 Kritische Mikronährstoffe – 16
- 2.2.3 Mikronährstoffe – Bedeutung für Überleben und Fortpflanzung – 19

2.3 Nährstoffe mit Einfluss auf die Reproduktionsrate – 21

- 2.3.1 Makronährstoffe – 22
- 2.3.2 Mikronährstoffe – 23

Literatur – 25

Jedes Lebewesen ist, vereinfacht ausgedrückt, eine Kraft-Wärme-Maschine. Damit es in der Umwelt überleben und sich fortpflanzen kann, ist die Zufuhr von Energie notwendig. Diese Energie stammt aus unterschiedlichen Quellen, sei es aus dem Sonnenlicht oder auch aus energiereichen Verbindungen in der Nahrung. Im Organismus wird sie in Energieformen umgewandelt, die vom Körper universell einsetzbar sind und dazu dienen, den Organismus in seiner Funktion zu erhalten bzw. ständig zu erneuern. Hierzu werden aber neben der Energie auch noch zahlreiche weitere Stoffe gebraucht, die mit der Nahrung aufgenommen und als Mikronährstoffe bezeichnet werden. Damit Lebewesen überleben und sich fortpflanzen können, brauchen sie genau diese Mikronährstoffe in einem ausgewogenen Verhältnis.

Bei der Beurteilung unserer Nahrung müssen wir zwei Kriterien unterscheiden: ihre Quantität und ihre Qualität. Der Begriff Quantität bezieht sich auf die Menge an Energie, die ein Mensch je nach körperlicher Belastung für ein gesundes Leben benötigt. Diese Energie wird mit den Makronährstoffen zugeführt. Die Qualität beschreibt die Menge an nicht-energie-liefernden essenziellen Stoffen in der Nahrung, die notwendig ist, damit die zugeführten Makronährstoffe so verarbeitet werden können, dass sie sowohl Energie als auch Bausteine für den gesamten Organismus liefern.

2.1 Makronährstoffe

Zu den Makronährstoffen zählen Proteine, Fett und Kohlenhydrate. Der Begriff »Makronährstoff« hat sich für diese Verbindungen eingebürgert, da es sich um Moleküle handelt, die aus kleineren Einzelbausteinen zusammengesetzte, große Verbindungen bilden. Eine andere Bezeichnung für Makronährstoffe – »energieliefernde Nährstoffe« – beschreibt direkt eine wichtige Funktion dieser Verbindungen. Was geschieht nun mit den Makronährstoffen, wenn wir sie verzehren?

2.1.1 Protein als Makronährstoff

Protein pflanzlicher oder tierischer Herkunft wird nach dem Verzehr in seine Bausteine, die Aminosäuren, zerlegt, die im Darm absorbiert werden und wiederum die Basis für die Herstellung körpereigener Proteine sind. Diese katalysieren Reaktionen des Stoffwechsels (Enzyme), dienen dem Transport von Stoffen wie Glucose, Vitamin A oder Kupfer oder werden für den Aufbau von Muskelmasse benötigt, um nur einige Beispiele zu nennen. Einige der insgesamt 20 Aminosäuren, die in Proteinen des menschlichen Körpers vorkommen, sind essenziell, das heißt, sie können nicht durch andere Bausteine ersetzt und müssen daher mit der Nahrung zugeführt werden (■ Tab. 2.1). Der gesunde erwachsene Mensch muss acht Aminosäuren mit der Nahrung aufnehmen, um das Stickstoffgleichgewicht zu erhalten: Leucin, Lysin, Methionin, Phenylalanin, Threonin, Tryptophan und Valin. Streng genommen sind bei sechs dieser Aminosäuren nur die korrespondierenden Kohlenstoffskelette der Ketosäuren essenziell, da der Körper diese über eine Transaminierung in Aminosäuren umwandeln kann. Für Lysin und Threonin gilt dies nicht, da sie irreversibel transaminiert werden und folglich als eigentlich essenzielle Aminosäuren bezeichnet werden. Beide kommen vor allem in tierischem Protein, aber auch in Leguminosen vor. Darüber hinaus gibt es bedingt essenzielle Aminosäuren. Dazu gehören solche, die in einem bestimmten Alter oder bei Vorliegen von Erkrankungen

Tab. 2.1 Für den Menschen essenzielle, bedingt essenzielle und nichtessenzielle Aminosäuren

Kategorie der Aminosäure	Beschreibung
<i>Essenziell</i>	
Threonin, Lysin	Absolut essenziell
Valin, Leucin, Isoleucin, Phenylalanin, Tryptophan, Methionin	Nur das Kohlenstoffskelett der jeweiligen Aminosäure
Phenylalanin, Tryptophan, Methionin, Histidin	Für Säuglinge und Kleinkinder
<i>Bedingt essenziell</i>	
Arginin	Für Säuglinge, Kleinkinder, Schwerkranke
Serin	Bei chronischem Nierenversagen
Tyrosin	Bei Phenylalaninmangel, Sepsis, Phenylketonurie; für Frühgeborene
Cystein	Bei Methioninmangel, Leberzirrhose
<i>Nichtessenziell</i>	
Alanin, Glycin, Prolin, Asparaginsäure, Asparagin, Glutaminsäure, Glutamin	

vorübergehend oder dauerhaft essenziell werden können. Beim Neugeborenen sind beispielsweise während der ersten Lebenstage Arginin, Cystein, Histidin und Tyrosin bedingt essenzielle Aminosäuren, da diese noch nicht aus anderen Aminosäuren gebildet werden können.

Das Nahrungsprotein erfüllt zwei wichtige Aufgaben: die Versorgung mit allen Aminosäurebausteinen, die der Mensch nicht selbst herstellen kann, und die Versorgung mit Stickstoff, den der Organismus für die Bildung von Aminosäuren und anderen Stickstoffverbindungen benötigt. In einer normalen Mischkost kommen alle Aminosäuren in ausreichender Menge vor. Dies gilt auch für eine vegane Ernährung, wenn sie richtig zusammengestellt ist. Kritisch wird es, wenn Protein im Wesentlichen über Getreide zugeführt wird, da in diesem Fall ein Mangel an den zwei wichtigen Aminosäuren Lysin und Threonin entstehen kann. Den pflanzenfressenden Urahnen in den afrikanischen Regenwäldern konnte das wegen der Vielfalt der aufgenommenen pflanzlichen Nahrung wahrscheinlich nicht passieren.

Als Energielieferant sind Proteine weniger tauglich als Fett oder Kohlenhydrate, da die Zerlegung in die kleinen Bausteine im Darm vor der Aufnahme und das Wiederausammenfügen im Organismus Energie verbraucht.

2.1.2 Fett als Makronährstoff

Pflanzliches oder tierisches Fett ist die wichtigste gut speicherbare Energiequelle des menschlichen Körpers. Neben ihrer Funktion als Energielieferant liefern Nahrungsfette jedoch auch Bausteine für die Zellmembranen in Form von Cholesterin und Phospholipiden, und enthalten Omega-(ω)-6- und Omega-3-Fettsäuren, die eine wichtige Rolle im Immunsystem spielen. Eine Fettsäure, die Linolensäure, ist für den Menschen essenziell, muss also mit der Nahrung

zugeführt werden. Sie ist vorwiegend in Fisch und einigen Ölsaaten enthalten. Fett wird nach der Aufnahme über den Darm rasch gespeichert und nur in Ausnahmefällen als sofortige Energiequelle eingesetzt.

2.1.3 Kohlenhydrate als Makronährstoff

Kohlenhydrate (Saccharide) sind der Hauptenergielieferant für den menschlichen Körper und dienen, anders als Fette, der raschen Energieversorgung. Die Mono-, Di- und Polysaccharide (Einfach-, Zweifach und Mehrfachzucker) sind in großer Menge allen Arten von Knollen, Hülsenfrüchten, Wurzeln, Getreide, Obst, Gemüse und auch in Blättern, die für unsere Ahnen das Gemüse gewesen sein dürften, enthalten. Sie stellen unter anderem den für den Menschen wichtigen Kohlenhydratbaustein, die Glucose, bereit.

Nach der Nahrungsaufnahme gelangt die Glucose über die Wand des Dünndarms in das Blut, woraufhin der Glucosespiegel im Blut steigt. Als Reaktion darauf schüttet die Bauchspeicheldrüse das Hormon Insulin aus, welches das Signal für Zellen verschiedener Gewebe ist, Glucose aus dem Blut aufzunehmen. In den Zellen wird die Glucose entweder in Energie umgewandelt oder in Leber und Muskulatur in Form von Glykogen gespeichert. Gleichzeitig sorgt Insulin dafür, dass der Aufbau von Körpermasse (Fett, Protein) gesteigert und der Abbau gehemmt wird, weshalb es auch als anaboles, also aufbauendes, Hormon bezeichnet wird.

Durch diesen Effekt von Insulin wirkt sich der Verzehr von Kohlenhydraten besonders deutlich auf die Zunahme an Körpermasse aus, wenn gleichzeitig Fett und Protein aufgenommen werden. Die anabole Wirkung einer Aufnahme von Fett und Protein allein ist weitaus geringer, da diese den Blutglucosespiegel nicht so deutlich ansteigen lassen wie Kohlenhydrate.

Die Glucose steht der Muskulatur und anderen Geweben als rasche Energiequelle zur Verfügung. Besonders wichtig ist sie aber für das Gehirn, das ohne Glucose seine Leistungsfähigkeit nicht aufrechterhalten kann. Da das Gehirn den Energiestoffwechsel des Körpers sogar zu seinem Vorteil zu lenken vermag, bezeichnet man es auch als »selbstsüchtig« (*selfish brain*-Theorie; ► Abschn. 10.1, ► Abschn. 10.2).

Sinkt der Blutzuckerspiegel, wird weniger Insulin freigesetzt und ein Hungergefühl stellt sich ein. Bleibt dann allerdings eine Nahrungsaufnahme aus, werden zunächst die Glykogenspeicher abgebaut, es folgt ein Umbau einiger Proteinbausteine aus der Muskulatur zu Glucose und zuletzt werden auch Speicherfette geopfert, um den Blutzuckerspiegel wieder anzuheben. Drastische Folgen eines dauerhaft zu geringen Blutzuckerspiegels sind eine Kachexie (Abmagerung), wie sie bei schweren Erkrankungen auftritt, oder eine deutliche Unterernährung (► Abschn. 8.2). Aber selbst in solchen Fällen ist das Gehirn häufig noch recht gut versorgt und bedient sich bei einer Unterernährung zur Not an der Körpermasse, sodass die betroffenen Menschen meist lange Zeit noch geistig rege sind, obwohl der Körper schon lange nicht mehr mitspielt (► Abschn. 10.1, ► Abschn. 10.2).

Letztlich entscheidet die Zusammensetzung der Nahrung über Entwicklung und Belastbarkeit eines Individuums. Eine ausgewogene Versorgung mit Makronährstoffen ist die Basis. Die Makronährstoffe wären aber nutzlos, wenn sie nicht gleichzeitig die »Transporter« der Mikronährstoffe wären. Das heißt, mit jedem Makronährstoff werden auch spezielle Mikronährstoffe aufgenommen. Fehlt eine Makronährstoffkomponente, so fehlen auch die in den Nahrungsmitteln ebenfalls enthaltenen Mikronährstoffe. Eine ausreichende Ernährung ist also

keinesfalls nur eine Frage der Quantität, sondern der Qualität, und einen wesentlichen Anteil daran haben die Mikronährstoffe.

2.2 Mikronährstoffe

Mikronährstoffe werden, mit Ausnahme einer Fettsäure und zwei Aminosäuren, auch als nicht energieliefernde Nährstoffe bezeichnet und haben eine Vielzahl wesentlicher Funktionen, die Wachstum und Entwicklung ebenso sicherstellen wie Fortpflanzung und Überleben. Zu diesen Funktionen gehört beispielsweise ihre Rolle im Energiestoffwechsel, der aus den Makronährstoffen die Energie gewinnt, die wir brauchen, damit die Zell- und Organfunktionen ordnungsgemäß ablaufen können. Auch für das Immunsystem sind sie von Bedeutung, vor allem die fettlöslichen Vitamine A und D sowie Zink, Eisen und Selen.

Während die Makronährstoffe zumindest hinsichtlich ihrer Energiebereitstellung in gewisser Weise austauschbar sind, denn alle liefern verwertbare Energie, wenn auch nicht in derselben Menge, übernehmen einzelne Mikronährstoffe eher spezielle Aufgaben und sind nicht einfach gegeneinander auszutauschen. Ein über längere Zeit andauernder Mangel an einem Mikronährstoff hat daher Konsequenzen für die Gesundheit. Der Mangel an einigen Mikronährstoffen führt durch direkte Wirkung auf den Organismus zum Tod, der Mangel an anderen wiederum ist Ursache von Erkrankungen, die chronisch sein können.

Mikronährstoffe lassen sich grob einteilen in solche, die als Cofaktoren im Stoffwechsel wichtig sind – dabei handelt es sich vor allem um die wasserlöslichen Vitamine und viele Spurenelemente –, und in solche, die ähnlich wie ein Hormon (Prähormon) oder auch als wichtiger Teil eines Hormons wirken (Vitamin A, D, Jod), sowie in eine Gruppe von Verbindungen, die als Antioxidantien bezeichnet werden bzw. als antioxidative Cofaktoren (Vitamin C, E, Selen, Kupfer). Für die wasserlöslichen Vitamine gilt, dass ihre Wirkungen oft eng vernetzt sind bzw. sie an den unterschiedlichsten Stellen in den Energiestoffwechsel eingebunden sind. Hierbei können sie sich teilweise ergänzen bzw. auch kompensieren, wenn die Versorgung mit dem betreffenden Vitamin vorübergehend kritisch wird. Bei den fettlöslichen Vitaminen dagegen finden sich zwar auch gemeinsame Aktivitäten, allerdings mit Ausnahme von Vitamin K viel stärker auf zellulärer Ebene und weniger in speziellen Stoffwechselprozessen.

Je nach Mikronährstoff ist die Menge, die wir täglich benötigen, sehr unterschiedlich. Im Vergleich zu den Makronährstoffen, von denen wir täglich mehr als 500 g aufnehmen, um je nach Alter mit der notwendigen Mengen an Energie versorgt zu sein, sind bei den Mikronährstoffen nur sehr geringe Mengen zwischen 5 µg (Vitamin B₁₂ und D) und 100 mg (Vitamin C) erforderlich, um unseren Bedarf zu decken, d.h. alle abhängigen Funktionen zu gewährleisten. Ob sich daraus oder aus der Tatsache, dass die meisten Mikronährstoffe als Moleküle auch klein sind, der Name Mikronährstoffe ableitet, ist unklar und auch nicht wirklich von Bedeutung.

Wichtig ist allerdings, dass die meisten Mikronährstoffe mit einer gewissen Regelmäßigkeit auf dem Speiseplan stehen müssen und keinesfalls in allen Nahrungsmitteln vorkommen. Dennoch es ist ein Trugschluss anzunehmen, wir müssten alle Mikronährstoffe täglich aufnehmen, denn einige werden nur langsam abgebaut oder verbraucht (sie haben eine lange Halbwertszeit) und andere können im Körper gespeichert werden. Zu Letzteren gehören Vitamin A, Vitamin B₁₂, Jod und Eisen, sodass eine nur geringe Versorgung über längere Zeiträume – bei Eisen und Jod sind es Wochen, bei Vitamin A und B₁₂ Monate – ohne sichtbare gesundheitliche Folgen bleibt, sofern nicht eine Erkrankung oder eine besondere körperliche Belastung (z. B. eine Schwangerschaft) den Verbrauch erhöhen. Das Gros der Mikronährstoffe wird jedoch

nicht in körpereigene Speicher verfrachtet und besitzt zudem eine geringe Halbwertszeit von nur wenigen Tagen bis Wochen.

Manche Mikronährstoffe können also gespeichert werden, andere nicht. Die Ursache dafür könnte darin liegen, dass die Mikronährstoffe, die nicht gespeichert werden oder eine geringe Halbwertszeit besitzen – die wir also mit großer Regelmäßigkeit aufnehmen müssen –, in der Nahrung unserer Vorfahren sehr viel häufiger und in größerer Menge vertreten waren. Solche, die gespeichert werden können oder eine lange Halbwertszeit besitzen, nehmen wir seltener auf, weil es weniger Nahrungsquellen für sie gibt. Und in der Tat sieht es so aus, dass die Mikronährstoffe mit kurzen Halbwertszeiten und fehlender Speicherfähigkeit vor allem in Blättern, Früchten und Wurzeln enthalten sind, während andere, also solche mit langer Halbwertszeit oder Speichermöglichkeit, in großer Menge in Fleisch und tierischer Nahrung vorkommen. Um an Fleisch zu gelangen, mussten unsere Vorfahren jagen, was energie- und zeitaufwendig war, während pflanzliche Lebensmittel leicht und ohne große Anstrengung zu erhalten waren. Nun kann man davon ausgehen, dass unsere sehr frühen Vorfahren, die in den dichten Blättern der Baumwipfel lebten und sich von Früchten ernährten, eher selten auf Jagd gingen. Vielmehr wurde wahrscheinlich eher beiläufig von Zeit zu Zeit ein kleineres Wirbeltier oder auch Insekten verzehrt, sow wie das bei heute lebenden Affen zu beobachten ist.

Die ■ Tab. 2.2 soll dazu dienen, bei den in den folgenden Kapiteln dargestellten Mikronährstoffquellen abschätzen zu können, inwieweit diese Quellen zur Versorgung beitragen können. Bezogen auf die Fragestellung der Versorgung unserer Ahnen sollte mindestens der EAR (*estimated average requirement*; geschätzter mittlerer Bedarf) erreicht werden, um Defizite zu vermeiden.

Referenzwert

Der Referenzwert, auch als empfohlene Tagesdosis bezeichnet, gibt die Menge eines Mikronährstoffs an, die ausreicht, um den Bedarf an diesem Mikronährstoff zu sichern. Der Bedarf kann allerdings nur geschätzt werden und wird daher im englischen Sprachraum auch EAR (*estimated average requirement*; geschätzter mittlerer Bedarf) genannt. Beim EAR handelt sich um die Menge, bei der (bei Normalverteilung) 50 % der gesunden Menschen ausreichend mit dem Mikronährstoff versorgt sind und die anderen 50 % nur unzureichend. Nimmt man zum EAR zwei Standardabweichungen des EAR hinzu, so erhält man einen Referenzwert (empfohlene Tagesdosis), bei dem 97,5 % aller Personen ausreichend versorgt sind. Der individuelle Bedarf hängt ab von Alter, Geschlecht, Schwangerschaft, Stillzeit, chronischen Erkrankungen, Lebensstil (Sport, Rauchen, Alkohol u. a.).

2.2.1 Wie wird eine ausgewogene Versorgung mit Mikronährstoffen sichergestellt?

Fehlt uns Energie, so verspüren wir ein Hungergefühl, das uns schließlich dazu bringt, etwas zu essen. Ist der Energiebedarf gedeckt, dann vergeht auch das Hungergefühl, wir sind satt. Fehlen uns dagegen Mikronährstoffe, so passiert, je nach Mikronährstoff, zunächst einmal nichts. Es stellt sich, anders als mal erwarten würde, kein besonderer Appetit auf Mikronährstoffe ein. Das ist verwunderlich, kann ein Mangel an Mikronährstoffen doch schwerwiegende gesundheitliche Folgen haben. Der Betreffende wird irgendwann krank und kann bei weiterer Unterversorgung sogar sterben. Erstaunlicherweise reagiert der Körper auf einen Mangel nicht mit einem selektiven Appetit auf den fehlenden Mikronährstoff, sondern es zeigen sich eher

Tab. 2.2 Geschätzter mittlerer Bedarf (EAR)* und Referenzwert (R)** der Menge eines Mikronährstoffs, die täglich zugeführt werden sollte. Der Referenzwert wird auch als empfohlene Tagesdosis bezeichnet. (*Institute of Medicine 2012, **Deutsche Gesellschaft für Ernährung 2014)

Mikronährstoff	Bis zum 10. Lebensjahr	Erwachsener	Schwangerschaft	Stillzeit
	EAR/R	EAR/R	EAR/R	EAR/R
<i>Vitamine</i>				
Vitamin A (ug)	275/900	500/1000	550/1100	900/1500
Vitamin D (ug)	10/10	10/20	10/10	10/20
Vitamin E (mg)	12/12	12/15	12/15	16/17
Vitamin C (mg)	22/50	75/100	70/110	100/150
Thiamin (mg)	0,5/0,8	1,0/1,3	0,9/1,3	0,9/1,4
Riboflavin (mg)	0,5/0,9	1,1/1,5	1,2/1,5	1,3/1,6
Niacin (mg)	6/10	12/17	14/15	13/17
Vitamin B ₆ (mg)	0,5/0,5	1,1/1,5	1,6/1,9	1,7/1,9
Folsäure (ug)	160/300	320/400	520/600	450/600
Vitamin B ₁₂ (ug)	1/1,5	2/3	2,2/3,5	2,4/4
<i>Mineralien</i>				
Kupfer (ug)	340/700	700/1200	800/1200	1000/1200
Jod (ug)	65/120	95/200	160/230	209/260
Eisen (mg)	4/10	8/15	23/30	7/20
Zink (mg)	4/8	9/10	10,5/10	10,9/11
Calcium (mg)	800/900	1000/1000	1000/1000	1000/1000
Magnesium	110/150	300/400	300/310	300/390
EAR estimated average requirement				

unspezifische Symptome wie Schmerzen in Muskeln und Knochen bei einer Unterversorgung mit Vitamin D oder auch Zahnfleischbluten, Erschöpfung und Infektanfälligkeit bei Vitamin-C-Mangel.

Es stellt sich die Frage, wie die Natur sichergestellt hat, dass neben dem Energiebedarf auch der Bedarf an eben diesen essenziellen Mikronährstoffen gedeckt wird. Wie erkennen Lebewesen – angefangen bei den Herbivoren (Pflanzenfresser), über die Carnivoren (Fleischfresser) bis hin zu den Omnivoren (Allesfresser; der Mensch) – Nahrung, die alle für sie wichtigen Mikronährstoffe enthält?

Es ist schwer zu verstehen, wie eine Spezies all die essenziellen Stoffe mit einer gewissen Regelmässigkeit aufnehmen kann, die Leben und Überleben überhaupt erst möglich machen. Immerhin beläuft sich die Zahl der Verbindungen, auf die der Mensch nicht verzichten kann, auf 49.

Eine mögliche Erklärung ist ein Vorgang, der auch als Nischenkonstruktion bezeichnet wird. Lebewesen, die eine ökologische Nische mit einem bestimmten Angebot an Mikronährstoffen besiedeln, haben sich dieser Nische durch natürliche Selektion angepasst, wobei der Genotyp

der einzelnen Individuen wie in allen Populationen nicht identisch ist. Tritt in dem Lebensraum beispielsweise plötzlich eine Pflanzenkrankheit auf, die bedeutende Futterpflanzen zumindest teilweise vernichtet, oder Nahrungskonkurrenten finden sich ein, kann sich ein Mangel an einem Mikronährstoff einstellen. Dieser Mangel übt einen Selektionsdruck auf die Population aus. Welche Szenarien sind nun denkbar? Keinesfalls erfolgt eine aktive Veränderung des Genotyps von Individuen als Anpassung an den Nährstoffmangel – die Veränderung des genetischen Materials ist kein aktiver Vorgang und nicht zielgerichtet. Einige Mitglieder der Population werden möglicherweise auswandern und einen Lebensraum mit einem passenden Angebot an Mikronährstoffen besiedeln, nicht, weil sie dort den Mikronährstoff selbst, sondern weil sie dort die verschwundene Futterquelle oder einen passenden Ersatz antreffen. Andere sind möglicherweise aber auch Träger einer Mutation und damit von besonderen Merkmalen, die unter den ursprünglichen Bedingungen keine Rolle spielte, nun aber einen entscheidenden Überlebensvorteil darstelle, und zwar mit einem geringeren Angebot des Mikronährstoffs auszukommen oder auch ganz darauf verzichten zu können. Diese Individuen werden nun mehr Nachkommen hervorbringen als andere, sodass die positiven Merkmale verstärkt an die folgenden Generationen weitergegeben werden. Dieser als natürliche Selektion bezeichnete Vorgang kann im Zusammenhang mit der Nahrung und ihren spezifischen Inhaltsstoffen oft beobachtet werden. Dabei kann die Anpassung durch natürliche Selektion des Nischenbewohners ebenso erfolgen, wie durch Veränderung des Nahrungsangebots durch direkten Einfluss des Bewohners auf seinen Lebensraum. Letzteres kann geschehen, indem sich der Nischenbewohner eine neue Nahrungsquelle sucht, beispielsweise Früchte. Über die in ihnen enthaltenen Samen, die den Verdauungstrakt des Tieres unbeschadet passieren, und seine Ausscheidungen trägt der Nischenbewohner zu einer Verbreitung dieser Pflanzenart bei und kann sich so auch eine Nische konstruieren.

Damit stellt sich die Frage, ob sich die Entwicklung des Menschen mit Änderungen des Nährstoffangebots und damit der Nahrungsqualität in unterschiedlichen Nischen erklären lässt und wie solche Nischen ausgesehen haben könnten. Wenn man annimmt, dass die Vorfahren des Menschen vor 6–8 Mio. Jahren in Regenwäldern lebten und sich vorwiegend von Blättern und Früchten ernährten, so müsste eine Veränderung des Nahrungsangebots, der ökologischen Nische, zu einer natürlichen Selektion einer Spezies geführt haben, die sich der neuen Nische anpassen konnte und von dieser Veränderung profitiert hat. Man kann sich aber auch vorstellen, dass sich der Mensch ganz nach dem Prinzip der adaptiven Radiation an mehreren Orten gleichzeitig entwickelt hat, wobei die Besonderheiten der verfügbaren Nahrungsqualität in den verschiedenen Lebensräumen die Entwicklung unterschiedlich beeinflusst haben können. Waren alle essenziellen Mikronährstoffe, neben der erforderlichen Energie, in ausreichendem Masse vorhanden, so war es gleichgültig, aus welchen Nahrungsquellen diese entstammten. Das heißt, die unterschiedlichen Habitate müssen nicht zwingend das gleiche Nahrungsspektrum bereitgestellt haben, um eine adaptive Radiation zu ermöglichen.

Einige »Anpassungen« an die Sicherung der Mikronährstoffversorgung lassen sich gerade bei den kritischen Mikronährstoffen erkennen.

2.2.2 Kritische Mikronährstoffe

kritische Mikronährstoffe

Mikronährstoffe, deren ausreichende Verfügbarkeit nicht sichergestellt ist; vor allem solche, die nur in wenigen Nahrungsmitteln in ausreichender Menge vorkommen (■ Tab. 2.3)

Tab. 2.3 Mikronährstoffe, die in nur wenigen Lebensmitteln in größerer Menge vorkommen. Von den Lebensmitteln muss daher nur eine recht geringe Menge (eine übliche Portionsgröße) verzehrt werden, um den täglichen Bedarf an dem betreffenden Mikronährstoff zu decken

Mikronährstoff	Lebensmittel	Menge des Lebensmittels, die aufgenommen werden muss, um die empfohlene Tagesdosis (Erwachsener) zu decken (g)	In der angegebenen Menge enthaltener Anteil an der empfohlenen Tagesdosis (Erwachsener) (%)
Vitamin A	Leber	10–25	> 100
Vitamin D	Seefisch	50–100, je nach Fettgehalt	> 100
Vitamin B ₁₂	Leber Seefisch	100	> 100
Eisen	Leber Muskelfleisch	100 200–500	100 15–50
Jod	Seefisch	100	100–200
Zink	Leber Keimlinge Nüsse	100 100 100	100 > 100 100

Für den Menschen kritische Mikronährstoffe sind in erster Linie Vitamin D und Vitamin B₁₂. Andere Mikronährstoffe sind dagegen scheinbar im Überfluss vorhanden, manche werden jedoch aus pflanzlichen Lebensmitteln schlecht aufgenommen (Eisen, Zink, Folsäure), oder sie müssen aus pflanzlichen Quellen umgewandelt werden (Provitamin A) und können daher ebenfalls als kritisch gelten. Jod ist ein Sonderfall, da die Konzentration in Lebensmitteln regional schwanken kann. Die Versorgung mit wiederum anderen Mikronährstoffe unterliegt saisonalen Schwankungen (Vitamin C, Vitamin E) oder die Mikronährstoffe müssen wegen kurzer Halbwertszeiten mit großer Regelmäßigkeit aufgenommen werden (z. B. Niacin, Vitamin C).

Die Angaben der Empfehlung beziehen sich auf den modernen Menschen. Für unsere Vorfahren ist anzunehmen, dass diese aufgrund ihrer geringeren Körpergröße weniger des jeweiligen Mikronährstoffs benötigt haben.

Der Mensch hat sich seit seiner »vormenschlichen« Existenz als reiner Frugivore im Verlauf der Jahrtausende dauernden Entwicklung langsam an ein breiteres Nahrungsangebot angepasst und sich zu einem Omnivoren entwickelt. Dies verdankt er der hohen Variabilität seiner Gene, die eine solche Anpassung im Zuge der natürlichen Selektion ermöglichte. Dazu gehört auch, dass sich im Verlauf der Evolution des Menschen für genau die kritischen Nährstoffe alternative Quellen oder auch andere Mechanismen etabliert haben, die die Versorgung auch in Zeiten knapper Zufuhr aus der primären Quelle sicherstellten (■ Tab. 2.4).

Die Speicherung wichtiger Mikronährstoffe ist wie die Energiespeicherung die einfachste Lösung, eine kontinuierliche Versorgung sicherzustellen, und im gesamten Tierreich weit verbreitet. Zusätzliche Quellen bedeuten eine weitere Sicherheit und am Ende steht, als seltene Ausnahme, die Synthese durch den Körper selbst. Alle anderen Mikronährstoffe können entweder gar nicht oder nur für kurze Zeit gespeichert werden. An sie ist allerdings auch leichter heranzukommen, da die meisten in Wurzeln, Blüten und Früchten vorkommen.

■ **Tab. 2.4** Mikronährstoffe, die nur in wenigen und nicht beliebig zugänglichen Quellen vorhanden sind, und ihre alternative Bereitstellung

Mikronährstoff	Primäre Quelle	Alternative Bereitstellung
Vitamin D	Fisch	Synthese in der Haut
Vitamin A	Leber	Speicherung über 6–12 Monate (Provitamin A)
Niacin	Fleisch, einige Pflanzen	kann teilweise durch Tryptophan ersetzt werden
Vitamin B ₁₂	Leber	Speicherung über 1–3 Jahre
Eisen	Fleisch	Speicherung über Wochen
Jod	Seefisch, Wasser	Speicherung über Wochen

Die Dauer der Speicherung kann stark davon abhängen, wie viel und wie schnell das einzelne Individuum unter den gegebenen Bedingungen von den unterschiedlichen gespeicherten Mikronährstoffen verbraucht, das heißt, welchen Bedarf es hat. Über den individuellen Bedarf wissen wir allerdings wenig. Er schwankt durch eine individuelle genetische Variabilität des Verbrauchs im Stoffwechsel und wird außerdem bestimmt durch Alter, Geschlecht, Gesundheitszustand, Körpermasse und die täglich verbrauchte Menge an Energie. Vor allem die genetische Ausstattung des Individuums hat einen Einfluss darauf, welche Mengen an Mikronährstoffen benötigt werden, damit seine Enzyme ihre Funktion im Stoffwechsel optimal erfüllen können. Zwischen den Individuen einer Population gibt es kleinste genetische Unterschiede (Polymorphismen), die sich wiederum auch auf die Ausprägung von Merkmalen niederschlagen, also eine Vielfalt von Phänotypen, bedingen können. Von diesen Polymorphismen können einige auch die Aufnahme und den Bedarf an Mikronährstoffen betreffen und genau diese Polymorphismen sind es dann, die es Individuen einer Art erlauben, sich an ein verändertes Angebot an einem oder mehreren Mikronährstoffen anzupassen oder eben auch nicht.

Polymorphismus

Obgleich der genetische Code bei allen Menschen gleich ist und wir alle die gleichen Gene besitzen, können unsere Gene in verschiedenen Varianten vorkommen und morphologische Unterschiede zwischen einzelnen Individuen hervorrufen, die beispielsweise die Haarfarbe aber auch Stoffwechselvorgänge betreffen. Diese Varianten haben wir über Generationen von unseren Vorfahren geerbt, oder sie haben sich neu entwickelt.

Betrifft die Variation nur ein einzelnes Nucleotid in einem Gen, wird sie auch als Einzelnucleotidaustausch, kurz SNP (*single nucleotide polymorphism*), bezeichnet. Bisher sind mehr als 1 Mio. solcher SNPs bekannt und jeder von uns besitzt bis zu 50.000 von ihnen. In vielen Fällen bleibt der SNP ohne messbaren bzw. funktionellen Effekt. Liegt er jedoch in einer Region, in der die DNA für die Herstellung eines bestimmten Proteins abgelesen wird, also in einem Gen, dann wird möglicherweise eine falsche Aminosäure in das Protein eingebaut. Dadurch kann dessen Funktion verändert werden. Ist zum Beispiel ein Enzym betroffen, dann kann es vollkommen inaktiviert werden, seine Aktivität kann aber auch gesteigert oder mehr oder weniger gehemmt werden. Hat ein solches Enzym einen Cofaktor (z. B. ein Vitamin), der seine Funktion unterstützt, dann kann dies bedeuten, dass das Enzym weniger oder mehr von diesem Cofaktor benötigt, um ordnungsgemäß arbeiten zu können.