

**Lee Know**

## **Die Mito-Medizin**

**Gesunde Mitochondrien – gesunder Körper:**

**Wie Sie Ihre Zellkraftwerke schützen,  
Krankheiten heilen und lange leben**



VAK Verlags GmbH  
Kirchzarten bei Freiburg

Titel der amerikanischen Originalausgabe:  
*Mitochondria and the Future of Medicine*  
Copyright © 2018 by Lee Know  
ISBN 978-1-60358-767-9  
VAK Verlags GmbH edition published by arrangement with  
Chelsea Green Publishing Co, White River Junction, VT, USA,  
[www.chelseagreen.com](http://www.chelseagreen.com)

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde im Text die männliche Form gewählt;  
alle Angaben beziehen sich selbstverständlich auf Angehörige aller Geschlechter.

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

VAK Verlags GmbH  
Eschbachstraße 5  
79199 Kirchzarten  
Deutschland  
[www.vakverlag.de](http://www.vakverlag.de)

© VAK Verlags GmbH, Kirchzarten bei Freiburg 2018  
Übersetzung: Imke Brodersen  
Lektorat: Nadine Britsch  
Layout: Karl-Heinz Munding  
Umschlagdesign: Agentur Guter Punkt, München  
Umschlagfoto: © wir0man / istock  
Satz & Druck: Friedrich Pustet GmbH & Co. KG, Regensburg,  
Printed in Germany  
ISBN: 978-3-86731-212-7

### *Hinweise des Verlags*

Dieses Buch dient der Information über Möglichkeiten der Gesundheitsvorsorge. Wer diese Informationen anwendet, tut dies in eigener Verantwortung. Autor und Verlag beabsichtigen nicht, Diagnosen zu stellen oder Therapieempfehlungen zu geben. Die vorgestellten Vorgehensweisen sind nicht als Ersatz für professionelle medizinische Behandlung bei ernsthaften Beschwerden zu verstehen.

# Inhalt

## KAPITEL 1

### Die Macht: Ursprung und Evolution der Mitochondrien

<b>in der Physiologie des Menschen</b> .....	13
Kleiner Abstecher in die Zellbiologie .....	18
Die Evolution der eukaryoten Zelle .....	22
Mitochondrien: Sie sind die Macht .....	26
Das Wichtigste über Mitochondrien .....	29
Zellatmung und oxidative Phosphorylierung: Die Grundlagen .	31
Wie eine heiße Kartoffel: Die Elektronentransportkette .....	33
ATP-Synthase: Kopplung von Elektronentransportkette mit oxidativer Phosphorylierung .....	41
Mitochondriale DNA (mtDNA): Ein Relikt aus den Anfängen des Lebens .....	43
Ein radikales Signal: Der positive Einfluss der freien Radikale	50
Mitochondrienmutationen: Der Anfang vom Ende .....	53
Überholte Theorien zur Alterung .....	60
Die Mitochondrientheorie der Alterung .....	65
Die maximale Lebenserwartung von Säugetieren verlängern ..	72
Degenerative Erkrankungen und das definitive Ende .....	74
Es wird so heiß hier drin:	
Die Entkopplung des Protonengradienten .....	77

## KAPITEL 2

### Die dunkle Seite der Macht:

<b>Krank durch mitochondriale Dysfunktion</b> .....	85
Ein Ausflug in die Bioenergetik .....	86
Nahrung und Sauerstoff: Die Grundbestandteile der Energieproduktion .....	88
ATP-Produktion und ATP-Umsatz .....	90

Die Rolle der Mitochondrien bei Herzgefäßkrankheiten . . . . .	94
Die Rolle der Mitochondrien für Nervensystem, Gehirn und kognitive Gesundheit . . . . .	99
Die Rolle der Mitochondrien bei der Neurodegeneration . . . . .	102
Depressionen . . . . .	111
Aufmerksamkeitsdefizitstörung mit Hyperaktivität: Achtet auf die Mitochondrien! . . . . .	112
Chronisches Erschöpfungssyndrom, myalgische Enzephalomyelitis und Fibromyalgie . . . . .	116
Typ-2-Diabetes . . . . .	117
Mitochondrienschäden bei Typ-2-Diabetes . . . . .	118
Mitochondrialer Diabetes . . . . .	121
Medikamentös induzierte Schäden und Erkrankungen der Mitochondrien . . . . .	122
Mitochondriale Erkrankungen . . . . .	126
Mitochondriale Erkrankungen als Primärerkrankung . . . . .	134
Mitochondriale Erkrankungen behandeln . . . . .	135
Altersbedingte Schwerhörigkeit . . . . .	139
Mitochondrien, Hautalterung und Falten . . . . .	141
Unfruchtbarkeit und Mitochondrien . . . . .	143
Augenerkrankungen . . . . .	148
Stammzellen brauchen gesunde Mitochondrien . . . . .	150
Krebs: Wer die Ursache versteht, ist der Heilung einen Schritt näher . . . . .	151
Alterung als Krankheitsprozess . . . . .	155

### **KAPITEL 3**

#### **Die Macht stärken: Wie Ernährung und Lebensweise**

<b>die Mitochondriengesundheit beeinflussen . . . . .</b>	<b>161</b>
Ein Blick ins Vogelreich . . . . .	161
D-Ribose . . . . .	166
Pyrrolochinolinchinon (PQQ) . . . . .	174

---

Coenzym Q10 .....	181
L-Carnitin .....	191
Magnesium .....	196
Alphaliponsäure .....	198
Kreatin .....	200
B-Vitamine .....	203
Eisen .....	207
Resveratrol und Pterostilben .....	208
Ketogene Ernährung und Kalorienrestriktion .....	210
Massage und Hydrotherapie .....	218
Cannabis und Phytocannabinoide .....	219
Sport und körperliche Aktivität .....	222
Zusammenfassung .....	228
<b>Danksagung .....</b>	<b>230</b>
<b>Glossar .....</b>	<b>231</b>
<b>Bibliografie .....</b>	<b>236</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>306</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>307</b>
<b>Stimmen zu <i>Die Mito-Medizin</i> .....</b>	<b>316</b>
<b>Über den Autor .....</b>	<b>318</b>

## KAPITEL 1

---

# Die Macht

---

# Ursprung und Evolution der Mitochondrien in der Physiologie des Menschen

*„Ohne die Midichlorianer könnte kein Leben existieren, und wir hätten auch keine Kenntnis von der Macht. Ohne Unterlass sprechen sie zu uns. Und teilen uns den Willen der Macht mit. Wenn du gelernt hast, deine Gefühle zum Schweigen zu bringen, wirst du auch hören, was sie sagen.“*

STAR WARS: EPISODE I – DIE DUNKLE BEDROHUNG,  
QUI-GON JINN ZU ANAKIN SKYWALKER

In einer weit entfernten Galaxie existierten einst mikroskopisch kleine, intelligente Lebensformen, die als Midichlorianer bezeichnet wurden. Sie lebten symbiotisch in den Zellen aller Lebewesen. Wenn sie in ausreichender Zahl vorhanden waren, konnte ihr Symbiosewirt das alles durchdringende Energiefeld der Macht entdecken. Das persönliche Machtpotenzial hing mit der Anzahl der Midichlorianer zusammen – bei normalen Menschen waren es 2 500 pro Zelle, bei einem Jedi weit aus mehr. Die höchste je gemessene Midichlorianermenge (mehr als 20 000 pro Zelle) fand man beim Jedi Anakin Skywalker.

Die Midichlorianer liegen unverändert in jeder Lebensform auf jeder Welt vor, die Leben gestattet. Ohne Midichlorianer gäbe es kein Leben. Ab der entsprechenden Menge gestatten die Midichlorianer ihrem Wirtsorganismus die Entdeckung der Macht, und diese Verbindung lässt sich stärken, wenn man seinen Geist zur Ruhe bringt und zulässt, dass die Midichlorianer über ihren Wirt „sprechen“ und den Willen der Macht zum Ausdruck bringen.



Viele, die dieses Buch in der Hand halten, denken jetzt vermutlich: „Was zur ... – ist der Autor komplett durchgeknallt?“ Worum es mir hier geht? Science-Fiction-Fans und alle, die mit Star Wars aufgewachsen sind, haben sicher schon gemerkt, dass die Midichlorianer eine Erfindung von George Lucas sind. Aber ist das wahr?

George Lucas ersann die Midichlorianer schon 1977. Damals diktierte er einem Teammitglied diverse Regeln für sein Werk und erläuterte die verschiedenen Konzepte seines Universums, darunter auch eine Erklärung zu den Midichlorianern (wobei Lucas erst 1999 Gelegenheit fand, dieses Konzept in *Star Wars: Episode I – Die dunkle Bedrohung* erstmals zu erwähnen.) Die Frage, warum manche für die Macht empfänglich waren, andere hingegen nicht, war seit dem ersten Star-Wars-Film ein ungelöstes Problem.

In *Star Wars: Episode I – Die dunkle Bedrohung* kommt das Thema der Midichlorianer als Teil einer symbiotischen Beziehung den ganzen Film über immer wieder zur Sprache. Das Faszinierende daran ist aus meiner Sicht, dass das Konzept der Midichlorianer lose auf den Mitochondrien basiert, also auf jenen Organellen, die auf unserem sehr realen Planeten ganz ohne Science-Fiction ständig Energie für die Zellen erzeugen. Wie die Midichlorianer werden auch die Mitochondrien als ehemals separate Organismen eingestuft, die lebende Zellen besiedelten und mittlerweile zu einem Teil davon geworden sind. Bis heute agieren Mitochondrien in mancherlei Hinsicht als unabhängige Lebensformen mit einer eigenen DNA.

Die meisten Leserinnen und Leser dürften Mitochondrien aus dem Biologieunterricht kennen: Dort werden sie als „Kraftwerke“ der Zelle beschrieben; winzige Generatoren, die in den Zellen leben und nahezu alle Energie erzeugen, die eine Zelle zum Leben benötigt. Je nach Zelltyp gibt es normalerweise Hunderte bis Tausende Mitochondrien pro Zelle. Sie nutzen den Sauerstoff aus der Luft, die wir einatmen, um die Nahrung, die wir zu uns nehmen, zu verwertbarer Energie zu verbrennen. Manche von Ihnen haben vielleicht auch schon einmal von der „mitochondrialen Eva“ gehört. Da die Mitochondrien über die mütterliche Linie vererbt werden, wäre die mitochondriale Eva – wenn wir

unsere genetische Herkunft zur Mutter, zur Großmutter mütterlicherseits und so weiter zurückverfolgen könnten – die Urmutter aller Menschen. (Und sie hätte vermutlich vor etwa 170 000 Jahren in Afrika gelebt. Das bedeutet nicht automatisch, dass sie der erste Mensch gewesen wäre, sondern lediglich, dass sie die jüngste Ahnin wäre, die alle heute lebenden Menschen gemeinsam hätten.)

Dass wir unsere Herkunft in dieser Form herleiten können, liegt daran, dass alle Mitochondrien eine eigene DNA (also Gene) besitzen, die normalerweise nur über die weibliche Eizelle an die Kinder weitergegeben werden, nicht über die männliche Samenzelle. Damit wäre die Mitochondrien-DNA (abgekürzt als mtDNA) sozusagen unser genetischer Nachname. Im Gegensatz zur im Westen üblichen Weitergabe des Nachnamens der väterlichen Linie (wodurch sich der Name aus diversen Gründen, beispielsweise durch Heirat, immer wieder ändern kann), ist die mtDNA relativ konstant und unterliegt kaum Veränderungen. So können wir die Abstammung über die mütterliche Linie nachvollziehen. Auf diese Weise lässt sich normalerweise auch eine familiäre Verwandtschaft bestätigen oder widerlegen.

Zugleich ist die mtDNA von großem Nutzen für die Forensik (zur Identifikation von lebenden oder toten Personen). Der Vorteil der mtDNA besteht darin, dass in jeder Zelle jede Menge dieses Genmaterials vorliegt. Denn von unserer menschlichen DNA im Zellkern (die nukleäre DNA, kurz nDNA; die Schaltzentrale der Zelle) liegen nur jeweils zwei Stränge vor, wohingegen jedes Mitochondrium fünf bis zehn Genkopien enthält. Hinzu kommt, dass jede Zelle nur einen Zellkern besitzt, aber zumeist mehrere Hundert und teilweise Tausende von Mitochondrien. Das heißt, in jeder Zelle gibt es mehrere Tausend Kopien derselben mtDNA.

Mediziner interessieren sich besonders für die „Mitochondrientheorie der Alterung“. Auf dieses Thema werde ich später näher eingehen (siehe Seite 65, „Die Mitochondrientheorie der Alterung“). Grundsätzlich postuliert diese Theorie, dass das Altern – und viele damit einhergehende Erkrankungen – auf eine allmähliche Degeneration der Mitochondrienqualität zurückgeht. Der Grund dafür sind reaktive Moleküle,

also freie Radikale, die während der normalen Zellatmung entstehen. (Die Zellatmung ist der Prozess, bei dem die Mitochondrien mit dem eingeatmeten Sauerstoff die verzehrte Nahrung verbrennen.) Diese freien Radikale schädigen angrenzende Strukturen, darunter auch die DNA, und zwar sowohl in den Mitochondrien als auch im Zellkern.

In jeder unserer Zellen greifen freie Radikale Zehntausende Male am Tag die DNA an. Die dabei entstehenden Schäden werden durch eine raffinierte Reparaturmaschinerie innerhalb der Zellen zumeist still und leise wieder beseitigt. Mitunter hinterlassen sie aber auch irreversible Schäden in Form von dauerhaften Mutationen der DNA. Da der Angriff der freien Radikale Tag und Nacht weiterläuft, sammeln sich derartige Mutationen im Laufe des Lebens an. Erreicht die Schädigung eine gewisse Schwelle, so stirbt die Zelle ab, und mit jeder sterbenden Zelle degeneriert das Gewebe ein wenig mehr. Diese stetige Erosion ist für viele altersabhängige degenerative Erkrankungen verantwortlich, ja, sogar für den Alterungsprozess an sich.

Auch die Mitochondrien selbst können erkranken, und manche dieser teils angeborenen, teils erworbenen Erkrankungen sind durchaus bekannt. In der Regel beeinträchtigen sie metabolisch aktives Gewebe wie Muskeln, Herz und Gehirn. Je nach Lage des am stärksten betroffenen Gewebes kann die Symptomatik breit gefächert sein.

2015 wurde im Vereinigten Königreich über die Zulassung einer umstrittenen Kinderwunschbehandlung abgestimmt, den nukleären Genomtransfer, also eine Mitochondrien-Ersatztherapie. Bei dieser Form der künstlichen Befruchtung wird der Eizelle (Oozyte) einer gesunden, fruchtbaren Eizellenspenderin der Zellkern (Nukleus) entnommen. Alle anderen Komponenten einschließlich der gesunden Mitochondrien bleiben bestehen. Dann wird der Nukleus des befruchteten Eies (Zygote) der nicht fruchtbaren Frau in das gesunde gespendete Ei übertragen. Aufgrund ethischer und praktischer Bedenken ist diese Vorgehensweise im Rest der Welt bisher nicht zulässig. Das Vereinigte Königreich jedoch treibt die Forschungen voran und gestattet die Geburt von Babys, die genetisch drei Eltern haben (nDNA von Mutter und Vater sowie mtDNA von der Spenderin oder einem dritten Elternteil). Ende 2016

wurde im Vereinigten Königreich die erste Genehmigung ausgestellt, und 2017 sollte das erste offiziell „zugelassene“ Kind zur Welt kommen, bei dem diese Technik eingesetzt wurde. (Inoffiziell wurde diese Technik bereits 2015 in Mexiko erprobt, wo hierzu keine gesetzlichen Vorgaben existierten. Das mexikanische Drei-Eltern-Baby kam 2016 zur Welt.)

Einer der wichtigsten Aspekte der Mitochondrien wurde von den Medien jedoch in den letzten Jahrzehnten kaum beachtet. Es geht dabei um ihre Rolle bei der Apoptose, dem programmierten Zelltod, bei dem die Zelle sich selbst umbringt. Im Zuge der Apoptose sterben einzelne Zellen „freiwillig“ ab, damit der Körper insgesamt weiterleben kann.

Früher glaubte man, die Apoptose würde von Genen im Zellkern gesteuert werden. Mitte der 1990er-Jahre jedoch erfolgte aufgrund bemerkenswerter Erkenntnisse ein Umdenken, denn es stellte sich heraus, dass die Apoptose in Wahrheit von den Mitochondrien ausgeht. Für die Medizin und insbesondere für die Krebsforschung ist das von großer Bedeutung. Zellen unterliegen ständiger Alterung und Angriffen, die ihre DNA mutieren lassen. Wenn bei solchen Mutationen eine Zelle entsteht, die sich unkontrolliert vermehren will, führt das letztlich zu Krebs: Zellen, die nicht auf Anweisung Selbstmord begehen, gelten heute als die eigentliche Ursache von Krebserkrankungen.

Das bedeutet jedoch noch weit mehr. Ohne den programmierten Zelltod hätten komplexe, vielzellige Organismen womöglich nie die nötige Zielrichtung und Organisation erreicht, um sich kontrolliert zu vermehren, und wir würden unsere Welt vermutlich kaum wiedererkennen. Ich weiß, das klingt verwirrend. Leichter nachvollziehbar wird es, sobald Sie den Abschnitt „Die Evolution der eukaryoten Zelle“ (siehe Seite 22) gelesen haben.

Tatsächlich sind Zellen in vielzelligen Organismen (sogenannte eukaryote Zellen) nämlich um ein Vielfaches größer als einzellige Bakterien. Ohne Mitochondrien könnte eine eukaryote Zelle ihren Energiebedarf unmöglich decken, wie Sie gleich sehen werden.

Obwohl ich auf die Evolution der beiden Geschlechter (männlich und weiblich) nicht tiefer eingehen möchte, können Mitochondrien

sogar zur Beantwortung der Frage nach dem Sinn und Zweck zweier Geschlechter beitragen. Sexueller Kontakt zwischen Mann und Frau ist für die Beteiligten zwar sehr genussvoll, aber eigentlich eine wenig effiziente Fortpflanzungsmethode. Für ein einziges Kind (jedenfalls meistens) brauchen Menschen zwei Elternteile. Zum Klonen hingegen braucht man nur eine Mutter. Der Vater ist hierbei nicht nur überflüssig, sondern schlichtweg eine Verschwendung von Ressourcen (was ich rein zufällig ausgerechnet am Vatertagswochenende schreibe). Hinzu kommt, dass sich bei zwei Geschlechtern nur die Hälfte der Bevölkerung vermehren kann. Mathematisch betrachtet ist das ineffizient. Es wäre also logischer, wenn wir uns mit jedem anderen Menschen paaren könnten und alle dasselbe Geschlecht hätten oder es eine unendliche Anzahl an Geschlechtern gäbe.

Es gibt jedoch einen Grund dafür, dass wir nur zwei Geschlechter haben, und das sind die Mitochondrien. Inzwischen gelten sie als die wahrscheinlichste Erklärung, denn: Ein Geschlecht spezialisiert sich darauf, seine Mitochondrien an den Nachwuchs weiterzugeben (in den Eiern der Frau). Das andere spezialisiert sich darauf, seine Mitochondrien nicht weiterzugeben (über das Sperma des Mannes). Genaueres zu diesem Thema finden Sie in Kapitel 2 im Abschnitt „Unfruchtbarkeit und Mitochondrien“ (siehe Seite 143), wo es um Fruchtbarkeit, Unfruchtbarkeit und Empfängnis geht.

## **Kleiner Abstecher in die Zellbiologie**

Ich muss Sie leider vorwarnen: An dieser Stelle wird es ziemlich theoretisch, besonders für alle, die kein wissenschaftliches oder biologisches Hintergrundwissen haben. Um die Bedeutung der Mitochondrien und der entsprechenden Forschungsergebnisse sinnvoll erläutern zu können, muss ich einige technische Details erklären. Nur so kann ich sicherstellen, dass alle Leserinnen und Leser für die folgenden Informationen das gleiche Grundverständnis für Zellbiologie haben. Daher halte ich einen schnellen, groben Überblick für absolut angemessen und möchte damit nicht etwa Seiten schinden. Wenn Sie bei den Einzelheiten irgendwann abschalten, bleiben Sie bitte unbesorgt. Versuchen Sie lediglich, das

Gesamtbild zu erfassen. Mitunter geht es auch weiter ins Detail für all jene, die die Komplexität dieses Bildes noch besser verstehen möchten. Also los!

Die Zelle ist die einfachste Lebensform, die unabhängig existieren kann. Deshalb gilt sie in der Biologie als Grundeinheit. Die einfachsten Zellen sind Einzeller, zum Beispiel Bakterien. Einzellige Organismen sind extrem klein und haben in der Regel nur einen Durchmesser von wenigen Mikrometern (ein Mikrometer ist das Tausendstel eines Millimeters). Sie können unterschiedliche Formen annehmen, doch die meisten sind entweder kugelig oder stäbchenförmig. Vor Umwelteinflüssen schützt sich die Zelle durch eine starke, aber durchlässige (permeable) Zellwand. In dieser Zellwand befindet sich die Zellmembran, eine unglaublich dünne und feine, aber relativ undurchlässige (impermeable) Membran. Mithilfe dieser Membran erzeugen Bakterien ihre Energie. Genau diese Membran bildet auch die Innenmembran der Mitochondrien und dürfte die wohl wichtigste Membran im menschlichen Körper darstellen.

Innerhalb der Bakterienzelle befindet sich das Zytoplasma, eine gelartige Masse, die unzählige biologische Moleküle enthält. Manche der „großen“ Moleküle sind selbst bei millionenfacher Vergrößerung durch ein starkes Mikroskop kaum erkennbar. Eines dieser Moleküle ist die lange, gedrehte Struktur der DNA, die legendäre Doppelhelix, die Watson und Crick vor über 50 Jahren beschrieben haben. Ansonsten sieht man dort nicht viel. Biochemische Analysen ergaben jedoch, dass Bakterien – die einfachsten Lebensformen – in Wahrheit derart komplex sind, dass wir nach wie vor nur sehr wenig über ihre kaum wahrnehmbare Organisation wissen.

Menschen hingegen bestehen aus unterschiedlichen Zelltypen.\* Zellen gelten zwar als einfachste Grundeinheit des Lebens, doch das Volumen dieser Zelltypen ist häufig Hunderttausendmal größer als das von Bakterien, was uns deutlich bessere Einblicke ermöglicht. Es gibt große

---

\* An dieser Stelle möchte ich anmerken, dass ich damit nicht die Abermilliarden Bakterien meine, die in und auf dem menschlichen Körper leben und jüngsten Untersuchungen zufolge nicht nur von größter Bedeutung für unsere Gesundheit sind, sondern unverzichtbarer Teil unseres Menschseins.

Strukturen aus komplexen Membranen, in die verschiedenste Proteine eingebettet sind, und die als Organellen bezeichnet werden. Für die Zelle sind die Organellen dasselbe, was für den Körper die Organe sind: Unauffällige Einheiten mit ganz bestimmten Aufgaben. Daneben finden sich im Zytoplasma die verschiedensten großen und kleinen Vesikel (bläschenförmige Strukturen) sowie das Zytoskelett, ein dichtes Faser Netzwerk, das der Zelle strukturellen Halt verleiht. Und schließlich gibt es den Zellkern, der landläufig als Schaltzentrale der Zelle gilt. All dies zusammen ergibt die Zellen, aus denen die uns bekannte Welt besteht, und die wir als eukaryote Zellen bezeichnen. Alle Pflanzen und Tiere, sogar die Algen und letztlich jedes Lebewesen, das wir mit bloßem Auge erkennen könnten, setzen sich aus eukaryoten Zellen zusammen, die jeweils einen eigenen Zellkern beherbergen.

Innerhalb des Zellkerns befindet sich die DNA. Einerseits hat die DNA einer eukaryoten Zelle genau die gleiche Doppelhelixstruktur wie jene von Bakterien, andererseits ist sie völlig anders organisiert.

Bei Bakterien bildet die DNA lange, gewundene Schlingen (ringförmige oder zirkuläre DNA). Lassen Sie sich von dieser Bezeichnung jedoch nicht täuschen, denn man sieht hier keineswegs einen „Ring“, sondern eher eine Art chaotisch verwickelten Ball. Es geht lediglich darum, dass es wie bei einem Kreis keinen Anfang und kein Ende gibt. Von dieser zirkulären DNA liegen in jedem Bakterium diverse Kopien vor, die allesamt Kopien derselben Gene darstellen.

Bei eukaryoten Zellen findet sich normalerweise eine bestimmte Anzahl verschiedener Chromosomen, die nicht kreisförmig, sondern linear ausgerichtet sind. Auch dies heißt nicht etwa, dass die DNA eine gerade Linie beschreibt, sondern lediglich, dass jeder Strang zwei eindeutig getrennte „Enden“ besitzt. Im Gegensatz zur zirkulären DNA enthalten die Chromosomen jeweils unterschiedliche Gene. Menschen haben 23 Chromosomen. Weil wir jedoch von jedem über zwei Kopien verfügen, sind es insgesamt 46 Chromosomen pro Zelle. Bei der Zellteilung schließen diese sich paarweise zusammen, verbinden sich in der Mitte und nehmen hierfür die vertraute X-Struktur an, die wir aus dem Biologieunterricht kennen.

Chromosomen bestehen jedoch nicht nur aus DNA. Sie sind von spezialisierten Proteinen überzogen, darunter die sogenannten Histone, welche die DNA nicht nur vor Schaden bewahren, sondern auch als „Türsteher“ zu den Genen fungieren. Histone unterscheiden die eukaryoten Chromosomen von denen der Bakterien, deren DNA nicht in dieser Form geschützt ist und sozusagen „nackt“ vorliegt.

Jeder der beiden Genstränge der Doppelhelix ist eine Blaupause für den anderen Strang. Wenn sie bei der Zellteilung auseinandergezogen werden, enthält jeder Strang die nötige Information zur Rekonstruktion der vollständigen Doppelhelix, wodurch wiederum zwei identische Kopien entstehen. Die in der DNA enthaltene Information ist in Genen organisiert, die ihrerseits die molekulare Struktur von Proteinen codieren. So wie jedes Wort aus den Buchstaben des Alphabets besteht, ist jedes Gen eine Sequenz aus lediglich vier „Molekül-Buchstaben“. Die Abfolge dieser Buchstaben bestimmt die Proteinstruktur.

Das Genom (das über eine Milliarde Buchstaben umfassen kann) ist die vollständige Ausgabe aller Gene eines Organismus'. Jedes Gen (zumeist Tausende von Buchstaben) codiert ein bestimmtes Protein. Jedes Protein besteht wiederum aus einem Strang Untereinheiten, den Aminosäuren, und die exakte Abfolge dieser Aminosäuren bestimmt die funktionellen Eigenschaften dieses bestimmten Proteins.

Eine „Mutation“ entsteht, wenn die Buchstabenreihenfolge sich verändert. Dadurch kann sich die Aminosäure oder aber die Proteinstruktur ändern. Zum Glück hat die Natur an dieser Stelle gewisse Redundanzen einkalkuliert. Eine Aminosäure kann nämlich von unterschiedlichen Buchstabenkombinationen codiert werden, sodass solche Mutationen nicht immer zu strukturellen oder funktionalen Veränderungen am Protein führen.

Das ist wichtig, denn Proteine sind der Dreh- und Angelpunkt des Lebens. Sie können nahezu unbegrenzte Formen annehmen und zahllose Funktionen ausfüllen. Nur ihretwegen ist das Leben, das wir kennen, möglich. Wenn wir die Funktion der Proteine verstehen, lassen sich bestimmte übergeordnete Kategorien unterscheiden, zum Beispiel Enzyme, Hormone, Antikörper und Neurotransmitter.



Der gesamte Prozess der Proteinbildung wird wiederum von anderen Proteinen gesteuert, unter denen die Transkriptionsfaktoren besonders hervorstechen. Die DNA enthält die Gene nämlich in inaktiver Form, und die Transkriptionsfaktoren bestimmen, ob sie zum Ausdruck kommen (sogenannte Genexpression). Dafür teilen die Transkriptionsfaktoren der Zelle mit, dass sie aus einem bestimmten, zuvor inaktiven DNA-Abschnitt ein aktives Protein bilden soll. Hierfür greift die Zelle jedoch nicht auf die DNA direkt zurück, sondern verlässt sich auf entbehrliche Kopien, die RNA. Es gibt verschiedene RNA-Typen mit jeweils unterschiedlichen Aufgaben. Da wäre zunächst einmal die Messenger- oder Boten-RNA (mRNA). Ihre Abfolge ist eine exakte Kopie der entsprechenden DNA-Sequenz. Wie der Name schon verrät, wandert dieser Botenstoff durch die Poren der Membran um den Zellkern ins Zytoplasma. Dort findet es eines der vielen Tausend proteinbildenden Ribosomen. Die Ribosomen sind sozusagen die Fabrik, in der die auf der mRNA verschlüsselte Information in eine Abfolge von Aminosäuren übersetzt wird, die zusammen das gewünschte Protein bilden.

Ich hoffe, Sie konnten mir folgen. Ich habe mich bemüht, diese Vorgänge möglichst einfach zu beschreiben, wenngleich Hunderte von Wissenschaftlern sich ihr Leben lang bemüht haben (und es gegenwärtig weiterhin tun), einem unglaublich winzigen Abschnitt der bisherigen Biologielektion ein weiteres Detail zu entlocken. Dieser Schnellkurs sollte jedoch die meisten Leserinnen und Leser in die Lage versetzen, nachfolgend die Bedeutung und das Innenleben der Mitochondrien nachzuvollziehen. Fahren wir also fort.

## Die Evolution der eukaryoten Zelle

Im Griechischen bedeutet das Wort *eukaryot* zwar „wahrer Kern“, doch neben diesem Kern enthalten eukaryote Zellen noch vieles mehr, darunter auch die Mitochondrien. Ursprünglich waren die Mitochondrien unabhängige Bakterieneinheiten, die irgendwann andere Bakterienzellen besiedelten. Anstatt dabei wie üblich verdaut zu werden, wurden sie zum symbiotischen Partner. In einer Symbiose profitieren beide

Beteiligten in irgendeiner Form vom Vorhandensein des anderen. Man könnte die Mitochondrien auch als Ursprung aller Probiotika betrachten: Ein Mikroorganismus, der seinem Wirt guttut.

Dieser Theorie zufolge hat irgendwann vor ungefähr zwei Milliarden Jahren ein Bakterium ein anderes umschlossen. Anfangs war jeder dieser beiden Organismen völlig autonom und enthielt alle Gene für ein unabhängiges Leben. Nachdem der eine jedoch den anderen aufgenommen hatte, ohne ihn dabei zu zersetzen, experimentierten die beiden mit zahllosen unterschiedlichen biochemischen und genetischen Kombinationen.

Dieser Prozess von Versuch und Irrtum verlief über die unverstellbare Zeitspanne von 1,2 Milliarden Jahren, an deren Ende das umschlossene Bakterium sich ganz auf die Energieproduktion verlagert hatte (und zum Mitochondrium geworden war), während der Rest dieser primitiven neuen eukaryoten Zelle eine spezialisierte Struktur und Funktion entwickelt hatte. Für die Geschichte des uns bekannten Lebens scheint die Übernahme der Mitochondrien der entscheidende Moment gewesen zu sein. Falls dies stimmt, würden wir die uns bekannte Vielfalt allen irdischen Lebens den Mitochondrien verdanken. Ohne sie hätte sich die Welt nicht über den Einzeller hinaus entwickelt.

Obwohl die Mitochondrien ursprünglich Bakterien waren, haben sich die eukaryoten Zellen, die sie erzeugt haben, inzwischen auf vielerlei spannende Weise weit von ihrem bakteriellen Ursprung entfernt. Erstens sind die meisten eukaryoten Zellen im Vergleich zu Bakterien riesig. In der Regel ist ihr Zellvolumen 10 000 bis 100 000 Mal größer als das der Bakterien.

Zweitens haben die eukaryoten Zellen (wie bereits erwähnt) einen Zellkern. Dieser Zellkern ist normalerweise eine kugelige Doppelmembran, welche die kompakte Masse der DNA umschließt, die ihrerseits in schützende Proteine verpackt ist. Bakterien hingegen besitzen keinen Zellkern, und ihre DNA liegt in einer eher primitiven, ungeschützten Form vor.

Der dritte Unterschied ist die Größe des Genoms (der Gesamtzahl der Gene). Bakterien enthalten üblicherweise weit weniger DNA als

eukaryote Zellen. Zudem haben eukaryote Zellen viel mehr nicht codierende DNA (DNA-Abschnitte, die keine Gene codieren) als Bakterien. Früher ging man davon aus, dass all diese nicht codierende DNA nur „Müll“ wäre – sozusagen „Junk-DNA“ ohne Sinn und Zweck. Neuere Forschungen zeigen jedoch auf, dass die DNA keineswegs nur Proteine codiert. Große Abschnitte der nicht codierenden DNA (oder zumindest Teile davon) erfüllen vielmehr zahlreiche Aufgaben. Allerdings benötigt diese Riesenmasse zusätzlicher DNA in den eukaryoten Zellen (im Vergleich zu Bakterien) viel mehr Energie, um sich – korrekt – zu kopieren.

Der letzte wichtige Unterschied, über den ich sprechen möchte, ist die Organisation der DNA. Wie bereits erwähnt, liegt bakterielle DNA in Form eines einzigen kreisrunden Chromosoms vor. Dieses Chromosom ist zwar in der Zellwand verankert, treibt aber ansonsten frei durch die Zelle. Da die Bakterien-DNA nicht von einer schützenden Proteinhülle umgeben ist, ist sie leicht zugänglich, sobald es um die Replikation geht. Bakteriengene schließen sich zudem gern zu funktionellen Gruppen mit ähnlichen Aufgaben zusammen. Außerdem enthalten Bakterien weiteres DNA-Material in Form von winzigen Ringen, den sogenannten Plasmiden. Diese kleinen Ringe replizieren sich unabhängig von den Bakterien und können relativ schnell auf andere Bakterien übertragen werden. Eukaryote Gene hingegen scheinen nach keiner erkennbaren Ordnung organisiert zu sein. Ihre Abfolge ist häufig in viele kleine Abschnitte unterteilt, die durch lange Strecken nicht codierender DNA unterbrochen sind. Um ein bestimmtes Protein zu bilden, muss oft ein langer DNA-Abschnitt abgelesen und separat abgeteilt werden, ehe die codierenden Abschnitte verbunden werden, um ein verständliches Gen zu formen, das letztlich als Code für die Proteinherstellung dient. Dabei ist es bereits ziemlich kompliziert, überhaupt an diese Gene heranzukommen, weil die Chromosomen fest in die sogenannten Histone eingepackt sind. Diese Histone bieten einerseits einen gewissen Schutz vor möglichen DNA-Schädigungen, erschweren aber andererseits den leichten Zugriff auf diese Gene. Wenn die Gene für die Zellteilung repliziert oder für die Proteinherstellung kopiert werden müssen, muss sich zuvor die Struktur der Histone so verändern, dass der Zugriff auf

die DNA möglich wird. Diese Aufgabe übernimmt eine andere Proteingruppe, von der bereits die Rede war, nämlich die Transkriptionsfaktoren.

Ich möchte diese Diskussion nicht weiter ausbreiten. Worum es hier geht, ist die zentrale Aussage, dass Bakterien evolutionstechnisch von brutaler Effizienz sind. Die meisten eukaryoten Zellen hingegen sind gigantische, unglaublich komplexe Einheiten, und diese Komplexität hat energetisch ihren Preis.

Doch auch viele andere Aspekte der eukaryoten Zelle sind sehr energieaufwendig. Ein Beispiel hierfür ist das Zytoskelett im Inneren der eukaryoten Zelle im Gegensatz zur Zellwand der prokaryoten (bakteriellen) Zelle. Beide haben ähnliche Funktionen – sie sollen strukturellen Halt liefern –, doch das Konzept unterscheidet sich fundamental. Der Unterschied entspricht dem zwischen dem Knochenskelett im Inneren eines Menschen und der äußeren Hülle (Exoskelett) eines Insekts oder Krustentiers.

Bakterienwände sind unterschiedlich strukturiert und zusammengesetzt, bieten aber in der Regel starren äußeren Halt, der die bakterielle Form erhält und das Bakterium davor bewahrt, bei einer plötzlichen Umgebungsveränderung zu platzen oder in sich zusammenzufallen. Im Gegensatz hierzu besitzen eukaryote Zellen normalerweise eine flexible Außenmembran, der ein inneres Zytoskelett strukturelle Stabilität verleiht. Dieses Zytoskelett ist ein sehr dynamisches Gebilde, das ständig umgeformt wird und schon deshalb seinerseits eine signifikante Energiequelle benötigt. Dank dieses Riesenvorteils können eukaryote Zellen ihre Form verändern, was sie häufig sehr vehement tun. Ein klassisches Beispiel sind die Makrophagen (eine Form der weißen Blutkörperchen), die schädliche Fremdpartikel, Bakterien oder Überreste abgestorbener Zellen umschließen.

Insgesamt verbraucht praktisch jeder Aspekt im Leben einer eukaryoten Zelle – Formveränderung, Wachstum, Ausbildung eines Zellkerns, Speichern von massenweise DNA, Multizellgebilde – große Mengen Energie und ist damit von der Existenz der Mitochondrien abhängig. Ohne Mitochondrien gäbe es vermutlich keine höher

entwickelten Tiere, weil ihre Zellen lediglich in der Lage wären, Energie über anaerobe Atmung zu gewinnen (also ohne Sauerstoff). Dieser Prozess ist allerdings weit weniger effizient als die aerobe Atmung in den Mitochondrien (mit Sauerstoff). Tatsächlich können die Zellen dank der Mitochondrien 15 Mal mehr Energie (in Form der „Zellwährung“ ATP) erzeugen, als es anderweitig möglich wäre. Und komplexe Lebewesen wie der Mensch können nur dank großer Mengen Energie überleben.

## Mitochondrien: Sie sind die Macht

Evolutionär haben die Mitochondrien sich zu Kraftwerken – also Energiefabriken – der Zelle entwickelt. Diese Organellen agieren wie ein zelluläres Verdauungssystem, das Nährstoffe aufnimmt, zerlegt und daraus Energie für die Zelle erzeugt. Der Prozess der Energiegewinnung wird als Zellatmung bezeichnet, und die meisten hiermit verbundenen chemischen Reaktionen laufen in den Mitochondrien ab.

Die winzigen Mitochondrien eignen sich von ihrer Form her perfekt dazu, ihre harte Arbeit zu maximieren. Wie bereits erwähnt, enthält jede Zelle Hunderte bis hin zu mehreren Tausend Mitochondrien. Die konkrete Anzahl richtet sich nach der Aufgabe der Zelle. Herz- und Skelettmuskulatur (die für die mechanische Arbeit große Mengen an Energie benötigen) enthalten große Mengen Mitochondrien. Dies gilt auch für die meisten Organe (wie die Bauchspeicheldrüse, die Insulin synthetisieren muss, oder die Leber mit ihren Entgiftungsaufgaben) und für das Gehirn (die Nervenzellen verbrauchen massenweise Energie).

Jegliche Lebensform, die keine eigene Energie erzeugen kann, ist im Grunde genommen tot. Ohne Energie gibt es kein Leben. Atmen versorgt das Blut mit Sauerstoff, der in jede einzelne unserer zig Milliarden Körperzellen transportiert wird. Diesen Sauerstoff befördert die Zelle wiederum zu den Mitochondrien, die damit über die sauerstoffabhängige sogenannte aerobe Zellatmung aus Glukose, Fettsäuren und

### Ein spiritueller Deutungsansatz

Dass vor Milliarden Jahren ein einziges Mal rein zufällig eukaryote Zellen entstanden, wirft die ernsthafte Frage auf, ob hier wohl eine höhere Macht im Spiel war. Eine friedliche Koexistenz von Wissenschaft und Spiritualität (und vielleicht sogar manchen Religionen), wie sie viele akademische und philosophische Abhandlungen nahelegen, ist durchaus möglich. Wenn wir allerdings auf „Neustart“ drücken würden und alles noch einmal von vorne losginge, würde sich gemäß der Theorie der konvergenten Evolution bei ausreichend Zeit (in Dimensionen von Milliarden von Jahren) vieles ganz ähnlich entwickeln wie bisher. Das sollte man im Kopf behalten. Denn wir würden auf dieselben Flaschenhälse und Probleme zusteuern, und angesichts einer endlichen Zahl idealer Lösungen besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die natürliche Selektion zu sehr ähnlichen Lösungen führen würde. Bei dieser Vorstellung frage ich mich, ob denkbare Leben auf anderen Planeten biochemisch in ähnlicher Weise auf Konvergenz basiert.

Diese Diskussion sollte in einem ganz anderen Buch stattfinden, doch der Umstand, dass in Meteoriten, die älter sind als unser Sonnensystem, Aminosäuren nachgewiesen wurden (die Bausteine des Lebens), und dass in interstellarem Staub PQQ (ein Nährstoff, auf den ich in Kapitel 3 näher eingehe) gefunden wurde, so scheint die Saat des Lebens auf der Erde aus dem Kosmos herzurühren. Wir sind wahrhaftig Sternenkinder.

Das ist vermutlich nicht für jeden so leicht zu akzeptieren. Schließlich erscheint uns der Mensch aus egozentrischer Sicht als etwas Besonderes. Unser Bewusstsein unterscheidet uns von der mechanischen Welt der Physik und Chemie und vielleicht sogar von niederen Lebensformen. Fakt ist jedoch, dass die grundsätzlichen Ähnlichkeiten zwischen allen Lebewesen die Unterschiede übersteigen. Mir ist absolut bewusst, wie kritisch die Evolutionstheorie mit der natürlichen Selektion vonseiten der Religion betrachtet wird. Am liebsten würde ich dieses Thema ganz vermeiden, doch man kann nicht über Evolution sprechen, ohne den massiven Widerstand der Religion einzugestehen. Angesichts der Vielzahl an Nachweisen, die im Laufe der Jahrhunderte gesammelt wurden, scheint die Negierung der Evolution jedoch auf ziemlich tönernem

Fuße zu stehen. Vor allem aber würden wir uns mit einer solchen Einstellung ihrer fantastischen Geschichte verschließen.

Natürlich ist vieles noch nicht bekannt. Zahlreiche wissenschaftliche Thesen sind spekulativ, aber dessen sollte man sich nicht schämen und es auch nicht verwerfen. Wissenschaft beruht immer auf vorläufigen Modellen, und wir wissen auf keinem Gebiet auch nur annähernd alles. Doch wenn Naturbeobachtungen einer Theorie widersprechen (wie anerkannt, alt oder beliebt sie auch sein mag), dann wird diese Theorie ohne großes Federlesen verworfen, und die Jagd nach einer anderen, besseren Theorie nimmt neue Fahrt auf. So sind wir bei unserem gegenwärtigen Verständnis der Mitochondrien gelandet: Es wurden viele Theorien vorgeschlagen, hinterfragt, überprüft und entweder bestätigt oder verworfen. Denn das macht die Wissenschaft aus – sie ist eine Wissensgrundlage im steten Wandel.

Traditionelle Religionen sollten sich in Bezug auf die Evolution weiterentwickeln und Glaubenssätze einbeziehen, in denen die Evolution von einer höheren Macht gelenkt wird. Streng wissenschaftlich orientierte Menschen sollten allerdings ihrerseits anerkennen, dass wir nur glauben, viel zu wissen. In Wahrheit wissen wir ziemlich wenig. Man sollte sich stets bescheiden daran erinnern, dass (zumindest gemäß den Schätzungen von Neil deGrasse Tyson) alles, was wir über das uns bekannte Universum und unsere Realität wissen – von der simpelsten Chemie bis hin zur unglaublich komplexen Quantenphysik – höchstens vier Prozent all dessen umfasst, was es zu wissen gäbe. Das heißt, 96 Prozent unseres Universums und unserer gegenwärtigen Realität kennen wir gar nicht – von Verstehen ganz zu schweigen. Die Vorstellung, wir könnten tatsächlich oben und unten unterscheiden, ist so anmaßend wie einst die Überzeugung, die Erde sei eine Scheibe.

Ist das, was in diesem Buch steht, nun das letzte Wort? Wahrscheinlich nicht. Nahezu alles, was wir in der Vergangenheit für die Wahrheit hielten, hat sich später als völlig falsch oder unvollständig herausgestellt. Es spiegelt jedoch den derzeitigen Stand unseres Wissens, und ich bin sehr gespannt auf neue Ergebnisse, die dieses gegenwärtige Wissen untermauern oder uns einen vollkommen (oder geringfügig) anderen Weg weisen.

mitunter Aminosäuren Energie gewinnen. Es ist zwar schwer vorstellbar, doch wir sind Gramm für Gramm die wohl mächtigste Energiefabrik im Universum. Laut einer interessanten Modellrechnung, die Nick Lane in seinem Buch *Power, Sex, Suicide* (2005) aufstellte, scheinen wir jede Sekunde 10 000-mal mehr Energie pro Gramm zu erzeugen als die Sonne.

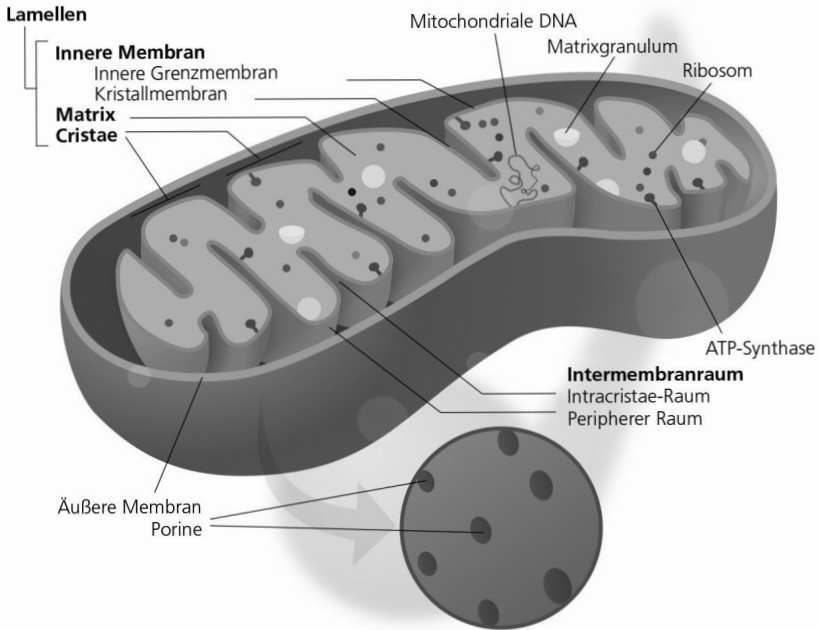
Was nach einem weiteren Abstecher zur Science-Fiction schreit, diesmal jedoch nicht zu *Star Wars*, sondern zu *Matrix*. In diesem Film decken die Maschinen ihren Energiebedarf, indem sie die Energie abschöpfen, die über riesige „Humanenergiefarmen“ erzeugt wird. Lanes Berechnungen zufolge wäre dies gar nicht so abwegig. Laut Lane übersteigt die Energieerzeugung bestimmter energieproduzierender Bakterien wie *Azotobacter* die der Sonne um einen Faktor von 50 Millionen. Und das wiederum wirft die Frage auf: „Wieso verwendet noch niemand *Azotobacter* als saubere, biologische Energiequelle?“ Ich bin doch bestimmt nicht der Einzige, dem solche milliardenschweren Ideen kommen!

## Das Wichtigste über Mitochondrien

In den meisten Abbildungen werden Mitochondrien stäbchenförmig dargestellt, obwohl sie in Wahrheit viele Formen annehmen können. Sie sind nämlich ziemlich flexibel und können sich wie Bakterien teilen oder aber sich zu komplexen Strukturen zusammenschließen. Untersuchungen ergaben, dass sie keineswegs reglos sind, sondern jeweils in den Bereich wandern, wo sie gerade benötigt werden. Ihre Bewegungen scheinen mit einem Mikrotubuli-Netzwerk zusammenzuhängen, das man sich wie die Knochen einer Zelle vorstellen kann (das Zytoskelett, das der Zelle seine Form verleiht). Innerhalb dieses Netzwerks werden sie wahrscheinlich über Motorproteine transportiert.

Metabolisch aktive Zellen wie die Herz-, Muskel- oder Gehirnzellen enthalten Tausende Mitochondrien. Die Eizelle (Oozyte) enthält die atemberaubende Zahl von 100 000 Mitochondrien, Spermien hingegen nicht einmal 100. Rote Blutkörperchen und Hautzellen haben allenfalls





**Abbildung 1.1** Struktur eines einzelnen Mitochondriums. Erkennbar ist die Doppelmembran, wobei die innere Membran viele Male gefaltet ist, um die Oberfläche zu vergrößern.

ein paar wenige. Gewichtsmäßig besteht der menschliche Körper zu bis zu zehn Prozent aus Mitochondrien. Zahlenmäßig sind das etwa zehn Billionen, wofür die „Macht der Menge“ ziemlich passend erscheint.

Erscheinungsbild und Größe der Mitochondrien erinnern nach wie vor an jene Bakterien, die sie einst waren. Im Gegensatz zu Bakterien sind Mitochondrien allerdings nicht durch eine Zellwand vom Rest der Zelle getrennt, sondern durch eine durchgehende, glatte Außenmembran. Die Innenmembran ähnelt der Bakterienmembran, ist jedoch in enge Falten gelegt, die sogenannten Cristae (siehe Abbildung 1.1).

Diese Cristae vervielfachen die Oberfläche der Innenmembran in der Organelle. Energie wird in erster Linie in dieser Innenmembran erzeugt, und die Struktur der Cristae optimiert diesen Bereich. Die Energieproduktion auf der Membran erfolgt durch die Übertragung von Elektronen

entlang einer Molekülkette. Diese Atmungskette, die auch als mitochondriale Elektronentransportkette bezeichnet wird, befindet sich ebenso wie die verschiedenen Enzyme für die Energiesynthese in und auf der inneren Membran.

Der Innenraum (die Matrix – nein, nicht der Film, sondern der innerste Teil der Mitochondrien) enthält die Enzyme des Zitronensäurezyklus‘ (auch: Tricarbonsäurezyklus, Krebs-Zyklus oder Citratzyklus). Die im Zitronensäurezyklus entstehenden Moleküle (NADH und FADH<sub>2</sub>) werden in die Elektronentransportkette eingespeist. Beide Enzymsysteme liegen dicht nebeneinander, sodass all dies reibungslos und ohne Verzögerung ablaufen kann.

## **Zellatmung und oxidative Phosphorylierung: Die Grundlagen**

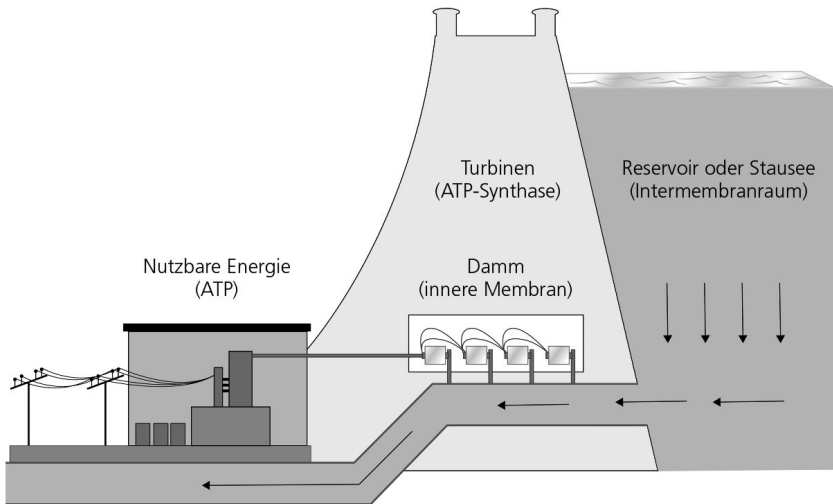
Jedes Kind weiß, dass wir atmen und essen müssen, um zu überleben. Aber warum eigentlich? Warum (beziehungsweise wie) gewinnen wir lebensspendende Energie, wenn wir den Körper mit Sauerstoff und Nahrung versorgen? Die Zellatmung ist die wichtigste Aufgabe der Mitochondrien. Die Enzyme des Citratzyklus und der Elektronentransportkette nehmen Moleküle auf, die bei der Verdauung unserer Nahrung entstehen, und kombinieren sie mit Sauerstoff (O<sub>2</sub>). Dabei wird Energie frei. Dieser Kombinationsprozess kann in der Zelle nur in den Mitochondrien ablaufen. Nur so erhält die Zelle ihre Energie.

Den meisten Menschen würde diese Erklärung ausreichen. Um zu begreifen, wie wichtig dieser Vorgang für Gesundheit und Krankheit ist – der Grund, weshalb Sie dieses Buch lesen –, müssen wir an dieser Stelle jedoch weiter in die Tiefe gehen.

Beginnen wir mit den Ausgangsstadien des Glukosestoffwechsels, der Glykolyse, die im Zytosol abläuft. Hier wird die Glukose (also der Zucker) über eine bestimmte Abfolge chemischer Reaktionen in das Molekül Pyruvat umgewandelt. Das Pyruvat wird anschließend in die Matrix der Mitochondrien transportiert, wo es über eine weitere Reaktionskette zu Acetyl-Coenzym A (Acetyl-CoA) wird. Danach beginnt

die eigentliche Magie, denn Acetyl-CoA ist das Ausgangsprodukt für den Zitronensäurezyklus, in dem die abschließende Energiegewinnung aus der Nahrung optimiert wird. Bei diesem Schritt entsteht Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), das wir ausatmen, sowie zwei Energiemoleküle: NADH und  $\text{FADH}_2$ . Auch beim Abbau von Fettsäuren entsteht Acetyl-CoA, das gleichfalls den Zitronensäurezyklus durchläuft.

Die nächste Phase nennt sich oxidative Phosphorylierung und findet in der inneren Mitochondrienmembran statt. Die reaktionsfreudigen Elektronen aus NADH und  $\text{FADH}_2$  werden über diverse Carrier in der Transportkette weitergereicht und reagieren letztlich mit Sauerstoff. Dabei entsteht Wasser. Bei jedem Schritt in der Atmungskette pumpt die Energie, die bei diesen Transferreaktionen von den Elektronen abgegeben wird, Protonen (Wasserstoffatome) aus der Matrix in den Intermembranraum. Dabei entsteht eine hohe Protonenkonzentration zwischen den Membranen und eine niedrige Konzentration in der Matrix. Dieser



**Abbildung 1.2** Der Prozess der Energieproduktion in den Mitochondrien entspricht den Grundprinzipien eines Wasserkraftwerks. Wenn Wasser (Protonen) in ein Reservoir (Intermembranraum) läuft, das von einem Damm (innere Membran) abgesperrt ist, baut sich Druck auf. Dieser Druck bringt das Wasser dazu, durch einen Kanal im Damm abzufließen, wobei es die Turbinen antreibt, damit hydroelektrische Energie entsteht.