

Atmungskette	Enzyme Reaktion	Nährstoffe
NADH/H ⁺ (mit Elektronen beladenes Vitamin B3)		Vitamin B3
	Komplex I: NADH-Dehydrogenase CoEnzym Q10 (Ubichinon)	Vitamin B2, Eisen Q10 (siehe Abb. 84)
FADH ₂ (mit Elektronen beladenes Vitamin B2)		Vitamin B2
	Komplex II: Succinat-Dehydrogenase CoEnzym Q10 (Ubichinon)	Vitamin B2, Eisen, Häm Q10 (siehe Abb. 84)
	Komplex III: Cytochrom-c-Reduktase CoEnzym Q10 (Ubichinon) Cytochrom-c	Eisen, Häm (siehe Abb. 85) Q10 (siehe Abb. 84) Eisen, Häm (siehe Abb. 85)
	Komplex IV: Cytochrom-c-Oxidase Cytochrom-c O₂ = Sauerstoff	Kupfer, Eisen, Häm (siehe Abb. 85) O₂ (siehe 3.2.1.3.6)
H ₂ O		
	Komplex V: ATPase (= ATP-Synthase)	ADP + P Magnesium
ATP (mit Elektronen beladenes ADP) = Energie beladener Akku		

Abb. 83: Atmungskette, Energiebeladung des ATP durch sauerstoffabhängige Oxidation

Dieser Prozess der ATP-Bildung passiert bei einem durchschnittlichen Kalorienverbrauch von 2.000 kcal unvorstellbare 1 Millionen Mal/Tag, das entspricht 10 Mal/Sekunde in jedem unserer 10²⁰ Atmungskettenkomplexe. Hierbei wird eine unvorstellbare Gesamtmenge von ca. 140 kg ATP/Tag produziert.

Wie oben erwähnt, wird das Energiegefälle, das die ATPase antreibt, durch Elektronen aufgebaut. Diese wurden in den vorgeschalteten Stoffwechselwegen - Glycolyse, β -Oxidation, Aminosäureabbau und im Citratzyklus - gesammelt, durch Vitamin B3 und Vitamin B2 übertragen und in die Atmungskette eingeschleust. In den feststehenden Enzymkomplexen I-IV wird mit Hilfe dieser Elektronen ein Energiegefälle aufgebaut. Hierfür werden die Elektronen durch **2 mobile Transporter** von einem Enzymkomplex auf den nächsten übertragen, die mit Hilfe der Elektronen Wasserstoffprotonen (H⁺) in den Intermembranraum pumpen. Der erste mobile Transporter **CoEnzym Q10** (Ubichinon) überträgt die Elektronen von Komplex I zu Komplex II und weiter zu Komplex III. Der zweite mobile Transporter ist **Cytochrom-c**, er übernimmt die Elektronen am Komplex III und transportiert sie zu Komplex IV. Die Elektronen müssen nach getaner Arbeit schnell wieder eingefangen werden, das geschieht primär durch den Sauerstoff (O₂), der mit Elektronen (e⁻) und Wasserstoffprotonen (H⁺) zu Wasser (H₂O) reagiert.

Die Elektronen werden in der Atmungskette von Vitamin B3 (NADH/H⁺) und Vitamin B2 (FADH₂) langsam von Enzym zu Enzym zum Sauerstoff übertragen. Hierbei wird Schritt für Schritt Energie frei, die das Energiegefälle aufbaut, mit dem wiederum ATP aufgeladen wird. Wie bei jeder Kette, bestimmt auch in der Atmungskette

das schwächste Glied die Leistungsfähigkeit. Kann also die Zelle die einzelnen Enzymkomplexe oder die beiden mobilen Transportenzyme Q10 und Cytochrom-c nicht in ausreichender Menge herstellen, leidet die Energiegewinnung und damit die Funktion der Zelle.

Deshalb will ich an dieser Stelle kurz auf die beiden Elektronentransporter und deren Synthese (körpereigener Aufbau) eingehen.

Diese Biosynthese des lebensnotwendigen Elektronentransporters Q10 läuft wie folgt ab:

Bildung von Q10 (Ubichinon) und Cholesterin		Enzyme Reaktion	Nährstoffe
Acetyl-CoA			
Cholesterin-Senker STATINE: HMG-CoA-Reduktase-Hemmer!		HMG-CoA-Reduktase	Vitamin B3
3-Isopentenyl-Pyrophosphat			
		3-Isopentenyl-Pyrophosphat-Isomerase	Vitamin B2 Calcium, Magnesium, Mangan
Dimethylallyl-Pyrophosphat			
		Dimethylallyl-Transferase Farnesyl-Pyrophosphat-Synthase	
Farnesylpyrophosphat			
Magnesium Mangan Vitamin B3 Vitamin B2 Eisen (Häm)		Farnesyltransferase	
	Polyprenyl-pyrophosphat		
		Methyltransferasen	Methionin (AS), Serin (AS) Vitamin B12, B3, B6, Folsäure,
	Polyprenyl-methyl-methoxy-benzoquinon		
		Monooxygenase	Vitamin B3
Cholesterin (siehe 2.3.6)	Q10 (Ubichinon)		

Abb. 84: Bildung von Q10 und Cholesterin, Gefahr der Cholesterinsenker

Q10 wird auch aus unserem Univerbrennstoff Acetyl-CoA durch Umwandlung mit verschiedenen Enzymen und Nährstoffen hergestellt (siehe Abb. 84). Interessanterweise ist der erste Schritt der Q10-Bildung identisch mit dem ersten Schritt der Cholesterinbildung. Dieser Schritt wird durch das Enzym HMG-CoA-Reduktase katalysiert. Deshalb ist Vorsicht bei der Verwendung von Cholesterinsenkern der Gruppe Statine (Atorvastatin, Cerivastatin, Fluvastatin, Lovastatin, Pitavastatin, Pravastatin, Rosuvastatin, Simvastatin) geboten, denn sie sind HMG-CoA-Reduktase-Hemmer. Sie hemmen nicht nur die notwendige Cholesterinproduktion (siehe 2.3.6), sondern gleichzeitig auch die Bildung von Q10! Dadurch wird die Energiegewinnung der Zelle empfindlich gestört - so erklären sich die teils massiven Nebenwirkungen von Statinen, die sich v.a. in Erkrankungen der Muskulatur und des Nervensystems zeigen.

Der zweite mobile Transporter in der Atmungskette ist **Cytochrom-c**. Es überträgt die Elektronen auf den Komplex IV. Cytochrom-c besteht aus 104 Aminosäuren und Häm. Häme sind Komplexverbindungen, die in sehr vielen Enzymen auftauchen (Cytochrome, Katalasen, Cyclooxygenasen) und auch in Globinen (Hämoglobin = roter Blutfarbstoff, Myoglobin = Muskeleiweiß) die funktionelle Gruppe für den Sauerstofftransport bilden.

Für die Bildung von Cytochrom-c werden also ein Häm, viele Aminosäuren und die dazugehörigen Nährstoffe benötigt.

Bildung von Cytochrom-c	Enzyme Reaktionen	Nährstoffe
Häm-Synthese:		
Glucose		Glucose, Zink, B3, Magnesium
Pyruvat		B5, Cystein (AS), B1, B2, B3
Oxalacetat		Eisen, Mangan, Magnesium, Vitamin B1, B2, B3
Propionyl-CoA		Biotin (= Vitamin B7), B12
Succinyl-CoA		
	Delta-Aminolävulinat-Synthase	Glycin (AS), Vitamin B6
	Porphobilinogen-Synthase	Zink
	Protoporphyrinogen-Oxidase	Vitamin B2
	Ferrochelatase	Eisen
Häm (enthält Eisen)		
Cytochrom-c-Synthese		
104 Aminosäuren + Häm		104 Aminosäuren
	Zusammenfügen von Aminosäuren und Häm	
Cytochrom-c		

Abb. 85: Bildung von Cytochrom-c mit Häm (enthält Eisen)

Cytochrom-c ist übrigens auch das Signalmolekül, das bei Schädigungen der Mitochondrien freigesetzt wird und die wichtige Apoptose (= programmierten Selbsttod) der Zelle einleitet (dazu aber mehr unter 3.1.2.6.1).

Die Elektronen, die wir für die Energiegewinnung benötigen und die auch bei anderen oxidativen Stoffwechselvorgängen freierwerden, suchen sich sofort wieder einen Bindungspartner. Wenn sie sich mit Wasserstoffprotonen und Sauerstoff verbinden, entsteht Wasser und alles ist in Ordnung.

Wenn sie aber nur unvollständig mit Sauerstoff, Wasserstoff oder Stickstoff reagieren, entstehen hoch reaktive Verbindungen (siehe Abb. 86), die mit allem reagieren, was sie erwischen. Deshalb heißen sie **freie oder reaktive Radikale**. Durch ihr sehr aggressives Reaktionsverhalten können sie erhebliche Schäden in und an der Zelle anrichten. Sie schädigen die Zellmembranen, einzelne Zellorganellen, auch die Mitochondrien und sogar die DNA, unsere Erbsubstanz.

Deshalb müssen diese freien, reaktiven Radikale, die bei der Oxidation entstehen, wieder neutralisiert und abgebaut werden. Dies geschieht durch enzymatische und nichtenzymatische Prozesse der **Antioxidation**. Diese antioxidativen Prozesse sind auch für die optimale Funktion der oxidativen Prozesse in den Mitochondrien wichtig, denn sie werden durch die freien Radikale gehemmt - genauso wie die Verbrennungsprozesse des Ofens durch die Asche.

Über die Enzyme Superoxid-Dismutase, Katalase, Glutathion-Peroxidase werden die freien Radikale zu neutralen Substanzen, wie Wasser, abgebaut. Diese Enzyme können natürlich ihre maximale Aktivität auch nur entfalten, wenn die notwendigen Nährstoffe in ausreichender Menge zur Verfügung stehen.

Neben den Enzymen, haben im Organismus viele Substanzen und Nährstoffe antioxidative Funktionen. Diese Antioxidationen sind im Organismus verteilt und entfalten ihren antioxidativen Schutz an unterschiedlichen Stellen. Vitamin E schützt v.a. die fettreiche Zellmembran - wird aber über Vitamin C wieder recycelt. Vitamin C dagegen schützt vor allem im wässrigen Milieu, also im Blutplasma und im Zellwasser der Zelle. Im Blut

3.1.2.5.1 Epithelzellen im Epithelgewebe (Oberflächengewebe)

Epithelzellen haben im Organismus vielfältige, energieaufwendige Aufgaben. Sie bilden die inneren und äußeren Körperoberflächen. Deshalb werden diese unterschiedlichen Gewebe auch als Deckgewebe bezeichnet. Neben Deckzellen werden auch Drüsenzellen und Sinneszellen zu den Epithelzellen gerechnet. Eine Auswahl der spezifischen Aufgaben der einzelnen Zellgruppen ist in Abbildung 99 dargestellt.

Epithelzellen	Beispiele	Funktionen
Deckepithelien	Epidermis der Haut, Samenleiter Trachea und Kehlkopf	mechanischer Schutz
	Magen-Darm-Kanal Nieren, Harnleiter, Harnblase Blut-Hirn-Schranke	Abdichtung des Gewebes Transport
	Darmschleimhaut Alveolen Nierentubuli	Resorption, Sekretion Stoffaustausch
	Schleimhaut der Nase, Bronchien, Vagina	Sekretion von Schleim
	Herzbeutel, Brustfell, Bauchfell	bildet Verschiebeschichten
	Endothelzellen der Blutgefäße (siehe Abb. 96)	reguliert Gewebsdurchblutung und Gefäßneubildung
Drüsenepithelien	Darmschleimhaut Schweißdrüsen der Haut	Bildung von Sekreten, Schleim und Schweiß
	Leberzellen	Bildung von Gallensäuren, Fettsäuren, Aminosäuren
	Speicheldrüsen im Mund Bauchspeicheldrüse	Bildung von Enzymen
	Hormondrüsen	Bildung von Hormonen
Sinnesepithelien	Netzhaut, Riechschleimhaut Geschmackszellen der Zunge Haarzellen des Innenohrs	Umwandlung physikalischer und chemischer Reize in Nervenimpulse

Abb. 99: Epithelzellen im Epithelgewebe

Als Beispiel für Epithelzellen möchte ich als Erstes die Schilddrüse darstellen. Die Schilddrüse produziert 2 Schilddrüsenhormone, das Trijodthyronin (T3) und das Tetrajodthyronin (T4 = Thyroxin). Das biologisch aktive T3 stimuliert Stoffwechsel, Wachstum, Fortpflanzung, indem es im Zellkern jeder Zelle an Schilddrüsenhormon-Rezeptoren **zink**abhängig bindet und die Transkription verschiedener Gene beeinflusst. Das passive T4 wird in der Leber durch die **selen**abhängige Thyroxin-Dejodase aktiviert, indem ein **Jod**-Atom entfernt wird. Wie die Produktion vom aktiven T3 abläuft, sehen Sie in folgender Abbildung 100.

Schilddrüsenhormone Thyroxin (T4) und Trijodthyronin (T3)	Enzyme Reaktionen	Nährstoffe
Phenylalanin Tyrosin	Phenylalanin-Hydroxylase	Phenylalanin (AS), Eisen Tyrosin (AS)
	Thyreoperoxidase (TPO)	Eisen, Jodid, H ₂ O ₂
Monojodthyrosin, Dijodthyrosin		
	Koppelung	
Thyroxin (T4)		
	Thyroxin-Dejodase (Leber)	Selen
Trijodthyronin (T3) (aktives Schilddrüsenhormon)		

Abb. 100: Produktion Schilddrüsenhormone T3 und T4

Durch die Schilddrüsenhormone kommt es zu einer breitgefächerten Aktivierung der Sauerstoffversorgung, des Sauerstoffverbrauchs, der Mitochondrienfunktion, des Energiestoffwechsels, der Herzleistung, des Eiweißstoffwechsels und des Wachstums. Deshalb ist eine optimale Schilddrüsenfunktion - falls notwendig durch gezielte Substitution von Schilddrüsenhormonen - ein wichtiger Pfeiler in der Therapie von chronischen Krankheiten.

Weitere wichtige Hormone, die den Gesamtstoffwechsel beeinflussen, sind die Steroidhormone. Das wichtigste Hormon hierbei wird unser Stresshormon Nr. 1 sein - das Cortisol. In Abbildung 101 sehen Sie, wie aus dem Grundbaustein Cholesterin über Zwischenstufen die anderen Cholesterinhormone hergestellt werden. Bemerkenswert ist, dass auch hier Eisen und Vitamin B2, B3 als CoFaktoren für die Hormonproduktion nötig sind. Bei einem Eisenmangel (siehe 3.2.5.8) kann also auch die Produktion der Steroidhormone eingeschränkt sein. Die Produktion der Geschlechtshormone (Progesteron, Testosteron und Östradiol) findet überwiegend in Eierstöcken und Hoden statt, allerdings zu einem kleinen Teil auch, genauso wie die der anderen Steroidhormone, in der Nebenniere.

Steroidhormone: Progesteron und Co	Enzyme Reaktionen	Nährstoffe
Cholesterin (= Cholesterol)		(siehe Abb. 84)
	Cholesterol-Monooxygenase	Häm, Eisen
Pregnenolon		
	3 β -Steroid-Dehydrogenase	Vitamin B3
Progesteron		
	Monooxygenasen	Häm, Eisen, Vitamin B3
	unspez. Monooxygenase	Häm, Eisen, Vitamin B3, B2
Aldosteron		
Testosteron		
Östradiol		
Cortisol		

Abb. 101: Biosynthese der Steroidhormone

3.1.2.5.3 Nervenzellen im Nervengewebe

Die Nervenzellen, die zusammen mit den Gliazellen das Nervengewebe bilden, stehen voll und ganz im Dienste der Signalübertragung. Sie bilden das gesamte Nervensystem mit mehr als 100 Milliarden Nervenzellen. Das Nervensystem besteht aus dem **Zentralen Nervensystem (ZNS)**, welches Gehirn und Rückenmark beinhaltet und dem **Peripheren Nervensystem (PNS)**, das aus den einzelnen Nerven vom Rückenmark bis zum Muskel, Organ oder der Haut besteht. Dieses Geflecht an Nervenzellen ist im gesamten Körper aufgespannt und zentriert sich im Gehirn. Die Aufgaben der Nervenzellen können einfach zusammengefasst werden in der Signalaufnahme, in der Verarbeitung dieses Signals, der Weiterleitung zum nächsten Nerv, Muskel oder Drüsenzelle und in der Speicherung von einzelnen Signalen (Gedächtnis).

Nervenzelle	Beispiele	Funktionen
Nervenzellen (NZ)	zuführend zum ZNS	
	somato-sensible Afferenzen	Temperatur-, Schmerz-, Oberflächen-, Tiefensensibilität Riechen, Sehen, Hören, Schmecken, Gleichgewicht
	viscero-sensible Afferenzen	Schmerzempfinden chemische und mechanische Reize aus Organen
	wegführend vom ZNS	
	somato-motorische Efferenzen (Motoneuronen)	Skelettmuskulatur, Mimik Kau- und Rachenmuskulatur
	viscero-motorische Efferenzen (Vegetatives NS)	glatte Muskulatur Herzmuskulatur, Drüsen
	Interneurone oder Zwischenneurone	Reflexbögen im Rückenmark, Gehirn und Vegetatives NS
Gliazellen	im Zentralen Nervensystem	
	Astrozyten	Regeln Flüssigkeits-, pH-Wert
	Oligodendrozyten	bilden die Myelin-Scheiden
	Ependymzellen	kleiden Liquorräume aus
	Mikroglia	Immunzellen des ZNS
	im Peripheren Nervensystem	
	Schwannsche Zellen	bilden die Myelin-Scheiden
	Mantelzellen	ummanteln Nervenzellkörper
	Müllerzellen in der Netzhaut	leiten Licht

Abb. 106: Nervenzellen im Nervengewebe

Es gibt natürlich - je nach Funktion - unterschiedliche Arten und Formen der Nervenzellen (siehe Abb. 106). Ihr Grundbauplan ist allerdings stets gleich. Der Körper einer Nervenzelle hat bis zu 1.000 Fühler, sogenannte Dendriten, welche die Informationen aufnehmen und in den Ausläufer der Nervenzelle - das Axon - weitergeben. Es gibt markhaltige und marklose Axone von Nervenzellen. Markhaltig bedeutet, dass die Nervenfasern von Myelin-Scheiden umhüllt wird. Die Myelin-Scheiden werden im ZNS von Oligodendrozyten und im PNS von Schwannschen Zellen gebildet (siehe Abb. 107).

Myelin für die Myelin-Scheiden der NZ	Enzyme Reaktionen	Nährstoffe
Lipide (70%)		Fettsäuren
- Phospholipide 50%, Lecithin	Fettsäure-Synthase Acyltransferasen Dehydrogenasen	Vitamin B3, B2, Acyl-CoA, Cholin, Cholesterin, Serin (AS)
- Cholesterin 25%	(siehe Abb. 84)	Vit. B2, B3, B6, B12, Folsäure Calcium, Magnesium, Mangan Methionin (AS), Serin (AS)
- Galactocerebrosid 20%	Desaturasen Elongasen	Eisen, Vitamin B3, O ₂ Acetyl-CoA, Vitamin B3
- Galactosulfatid 5%	Sulfatase	Calcium, Magnesium
Proteine (30%)		Aminosäuren

Abb. 107: Produktion von Myelin für die Myelin-Scheide der Nervenzelle

Durch diese Myelinisierung haben markhaltige Nerven mit bis zu 120 m/s eine deutlich schnellere Leitungsgeschwindigkeit als marklose (bis 2 m/s). Diese Myelin-Scheiden gehen bei den Krankheitsprozessen der Multiplen Sklerose zugrunde (siehe 4.3.3.9.6).

Die Nervenzelle hat in der Regel nur ein Axon, das am Ende eine präsynaptische Endigung bildet. In diesem Axonende werden in kleinen Bläschen die Botenstoffe (Neurotransmitter) freigesetzt, die zur nächsten Zelle wandern und dort eine Reaktion (postsynaptisches Potential = PSP) auslösen.

Diese Reaktion kann entweder hemmend (inhibitorisches postsynaptisches Potential = IPSP) oder erregend (exzitatorisches postsynaptisches Potential = EPSP) sein. Die Summe an hemmenden und erregenden Potentialen an der postsynaptischen Membran der Nachfolgezelle (Nervenzelle, Muskelzelle oder Drüsenzelle) bestimmt, ob der Reiz weitergeleitet wird und eine Reaktion erfolgt.

Diese Signalübertragung von einer Nervenzelle auf eine benachbarte Zelle geschieht an der Kontaktstelle dieser beiden Zellen, der sogenannten Synapse. Hier werden die Botenstoffe (Neurotransmitter) für die Signalübertragung in den Spalt zwischen den Zellen freigesetzt. Als Neurotransmitter fungieren unterschiedliche Botenstoffe, die in den folgenden Abbildungen dargestellt sind.

Acetylcholin (siehe Abb. 108) ist der wichtigste Neurotransmitter des vegetativen Nervensystems und auch der Botenstoff, der die Reizübertragung vom Nerv auf den Muskel ermöglicht.

Acetylcholin	Enzyme Reaktionen	Nährstoffe
Cholin		Cholin, Lecithin, Serin, Glycin, Methionin (AS)
	Cholin-O-Acetyltransferase	Acetyl-CoA, Kalium
Acetylcholin		
	Acetylcholinesterase	
Cholin		

Abb. 108: Biosynthese und Abbau von Acetylcholin

Die folgende Abbildung 109 haben Sie schon im Kapitel 3.1.2.4.4 zur Kreislaufregulation gesehen, da Noradrenalin und Adrenalin für die Stabilisierung des Blutdrucks nötig sind. Diese Kreislaufhormone fungieren aber auch als Neurotransmitter im vegetativen Nervensystem und im Gehirn. Dopamin ist der fehlende Botenstoff bei Parkinson (siehe 4.3.3.9.7), deshalb werden wir dort nochmal genauer darauf zurückkommen.

Dopamin Noradrenalin Adrenalin	Enzyme Reaktionen	Nährstoffe
Phenylalanin Tyrosin	Phenylalanin-Hydroxylase	Phenylalanin (AS), Eisen, O ₂ Tyrosin(AS), Tetrahydrobiopterin
	Tyrosin-Hydroxylase	Eisen, Vitamin B3, Magnesium Tetrahydrobiopterin, O ₂
L-Dopa		
	Dopa-Decarboxylase oder Tyrosinase	Vitamin B6 Vitamin B3, B6, Kupfer,
Dopamin		
	Dopamin-β-Hydroxylase	Kupfer, Vitamin C, O ₂
Noradrenalin		
	Noradrenalin-Methyltransferase	Methionin (AS), Vitamin B12, Zink
Adrenalin		
	Catechol O-methyltransferase	Methionin (AS)
	Monoaminoxidase	Vitamin B2, O ₂
	Aldehyd-Dehydrogenase	Vitamin B3
	Alkohol-Dehydrogenase	Eisen, Zink, Vitamin B3
z.B. Vanillinmandelsäure		

Abb. 109: Biosynthese und Abbau von Dopamin, Noradrenalin, Adrenalin

Der nächste Syntheseweg ist meines Erachtens auch sehr spannend, da hier sehr leicht nachzuvollziehen ist, weshalb bei Depressionen (4.3.3.9.1) oder Schlafstörungen (4.3.3.9.2) die nötigen Nährstoffe - vor allem Eisen (siehe 3.2.5.8) - zu messen und aufzufüllen sind.

Bildung von Serotonin und Melatonin	Enzyme Reaktionen	Nährstoffe
Tryptophan		Tryptophan (AS)
	Tryptophan-5-Hydroxylase	Eisen, Vitamin C, Calcium Tetrahydrobiopterin, O ₂ Magnesium, Vitamin B3,
5-Hydroxy-Tryptophan		
	Decarboxylase	Vitamin B6
Serotonin (Glückshormon)		
	N-Acetyl-Transferase	Acetyl-CoA, Vitamin B1, B3,
N-Acetyl-Serotonin		
	Acetylserotonin-O- Methyltransferase	Methionin (AS), Folsäure, Vitamin B12, B6
Melatonin (Schlafhormon)		
	Monoamino-Oxidase	Vitamin B2, O ₂
	Aldehyd-Dehydrogenase Aldehyd-Oxidase	Vitamin B3, B2, Häm, Eisen, O ₂
	Acetylserotonin-O- Methyltransferase	Vitamin B2, Methionin
5-Methoxyindolacetat 6-Hydroxymelatonin		

Abb. 110: Biosynthese und Abbau von Serotonin und Melatonin

Myelin für die Myelin-Scheiden der NZ	Enzyme Reaktionen	Nährstoffe
Lipide (70%)		Fettsäuren
- Phospholipide 50%, Lecithin	Fettsäure-Synthase Acyltransferasen Dehydrogenasen	Vitamin B3, B2, Acyl-CoA, Cholin, Cholesterin, Serin (AS)
- Cholesterin 25%	(siehe Abb. 84)	Vit. B2, B3, B6, B12, Folsäure Calcium, Magnesium, Mangan Methionin (AS), Serin (AS)
- Galactocerebrosid 20%	Desaturasen Elongasen	Eisen, Vitamin B3, O ₂ Acetyl-CoA, Vitamin B3
- Galactosulfatid 5%	Sulfatase	Calcium, Magnesium
Proteine (30%)		Aminosäuren

Abb. 107: Produktion von Myelin für die Myelin-Scheide der Nervenzelle

Durch diese Myelinisierung haben markhaltige Nerven mit bis zu 120 m/s eine deutlich schnellere Leitungsgeschwindigkeit als marklose (bis 2 m/s). Diese Myelin-Scheiden gehen bei den Krankheitsprozessen der Multiplen Sklerose zugrunde (siehe 4.3.3.9.6).

Die Nervenzelle hat in der Regel nur ein Axon, das am Ende eine präsynaptische Endigung bildet. In diesem Axonende werden in kleinen Bläschen die Botenstoffe (Neurotransmitter) freigesetzt, die zur nächsten Zelle wandern und dort eine Reaktion (postsynaptisches Potential = PSP) auslösen.

Diese Reaktion kann entweder hemmend (inhibitorisches postsynaptisches Potential = IPSP) oder erregend (exzitatorisches postsynaptisches Potential = EPSP) sein. Die Summe an hemmenden und erregenden Potentialen an der postsynaptischen Membran der Nachfolgezelle (Nervenzelle, Muskelzelle oder Drüsenzelle) bestimmt, ob der Reiz weitergeleitet wird und eine Reaktion erfolgt.

Diese Signalübertragung von einer Nervenzelle auf eine benachbarte Zelle geschieht an der Kontaktstelle dieser beiden Zellen, der sogenannten Synapse. Hier werden die Botenstoffe (Neurotransmitter) für die Signalübertragung in den Spalt zwischen den Zellen freigesetzt. Als Neurotransmitter fungieren unterschiedliche Botenstoffe, die in den folgenden Abbildungen dargestellt sind.

Acetylcholin (siehe Abb. 108) ist der wichtigste Neurotransmitter des vegetativen Nervensystems und auch der Botenstoff, der die Reizübertragung vom Nerv auf den Muskel ermöglicht.

Acetylcholin	Enzyme Reaktionen	Nährstoffe
Cholin		Cholin, Lecithin, Serin, Glycin, Methionin (AS)
	Cholin-O-Acetyltransferase	Acetyl-CoA, Kalium
Acetylcholin		
	Acetylcholinesterase	
Cholin		

Abb. 108: Biosynthese und Abbau von Acetylcholin

Die folgende Abbildung 109 haben Sie schon im Kapitel 3.1.2.4.4 zur Kreislaufregulation gesehen, da Noradrenalin und Adrenalin für die Stabilisierung des Blutdrucks nötig sind. Diese Kreislaufhormone fungieren aber auch als Neurotransmitter im vegetativen Nervensystem und im Gehirn. Dopamin ist der fehlende Botenstoff bei Parkinson (siehe 4.3.3.9.7), deshalb werden wir dort nochmal genauer darauf zurückkommen.

Dopamin Noradrenalin Adrenalin	Enzyme Reaktionen	Nährstoffe
Phenylalanin Tyrosin	Phenylalanin-Hydroxylase	Phenylalanin (AS), Eisen, O ₂ Tyrosin(AS), Tetrahydrobiopterin
	Tyrosin-Hydroxylase	Eisen, Vitamin B3, Magnesium Tetrahydrobiopterin, O ₂
L-Dopa		
	Dopa-Decarboxylase oder Tyrosinase	Vitamin B6 Vitamin B3, B6, Kupfer,
Dopamin		
	Dopamin-β-Hydroxylase	Kupfer, Vitamin C, O ₂
Noradrenalin		
	Noradrenalin-Methyltransferase	Methionin (AS), Vitamin B12, Zink
Adrenalin		
	Catechol O-methyltransferase	Methionin (AS)
	Monoaminoxidase	Vitamin B2, O ₂
	Aldehyd-Dehydrogenase	Vitamin B3
	Alkohol-Dehydrogenase	Eisen, Zink, Vitamin B3
z.B. Vanillinmandelsäure		

Abb. 109: Biosynthese und Abbau von Dopamin, Noradrenalin, Adrenalin

Der nächste Syntheseweg ist meines Erachtens auch sehr spannend, da hier sehr leicht nachzuvollziehen ist, weshalb bei Depressionen (4.3.3.9.1) oder Schlafstörungen (4.3.3.9.2) die nötigen Nährstoffe - vor allem Eisen (siehe 3.2.5.8) - zu messen und aufzufüllen sind.

Bildung von Serotonin und Melatonin	Enzyme Reaktionen	Nährstoffe
Tryptophan		Tryptophan (AS)
	Tryptophan-5-Hydroxylase	Eisen, Vitamin C, Calcium Tetrahydrobiopterin, O ₂ Magnesium, Vitamin B3,
5-Hydroxy-Tryptophan		
	Decarboxylase	Vitamin B6
Serotonin (Glückshormon)		
	N-Acetyl-Transferase	Acetyl-CoA, Vitamin B1, B3,
N-Acetyl-Serotonin		
	Acetylserotonin-O- Methyltransferase	Methionin (AS), Folsäure, Vitamin B12, B6
Melatonin (Schlafhormon)		
	Monoamino-Oxidase	Vitamin B2, O ₂
	Aldehyd-Dehydrogenase Aldehyd-Oxidase	Vitamin B3, B2, Häm, Eisen, O ₂
	Acetylserotonin-O- Methyltransferase	Vitamin B2, Methionin
5-Methoxyindolacetat 6-Hydroxymelatonin		

Abb. 110: Biosynthese und Abbau von Serotonin und Melatonin



3.2.2 Messen - spezielle Labordiagnostik

Deutschland ist natürlich kein Hungerland, bei uns muss kein Mensch Hunger leiden - im Gegenteil: rund 67% der Männer und 53% der Frauen sind übergewichtig. Wobei viele Übergewichtige unterernährt sind - ihnen fehlt es an wichtigen Nährstoffen für eine normale Stoffwechselfunktion. Sie haben unterschiedliche Stoffwechselstörungen bis hin zum Übergewicht.

Laut DGE ist Deutschland aber auch kein Vitaminmangeland: „Die Versorgung ist ausreichend“ - ausreichend ist aber nur die Note 4! Die DGE stützt ihre Aussage auf die „Nationale Verzehrstudie II“. Hier wurde bei 20.000 zufällig ausgewählten Personen - anhand von 2 x 4 Tage Wiegeprotokollen - erfasst, was und wie viel gegessen worden ist und daraus die Nährstoffmengen berechnet.

Gemessen wurden die Nährstoffe bei den Probanden allerdings nicht! Aber ohne Laborkontrollen ist das Ergebnis jedoch nur eine vorsichtige Schätzung, da die Nährstoffe in der Regel nicht zu 100% im Darm aufgenommen werden.

Die meisten Nährstoffe werden über aktive oder passive Prozesse über die Dünndarmschleimhaut aufgenommen. Die Resorptionsraten schwanken zwischen 30 % (Vitamin E) und nahezu 100 % (Vitamin B3). Die Aufnahmemöglichkeit der Darmschleimhaut ist allerdings bei Reizzuständen und Entzündungen des Magen-Darm-Trakts teilweise erheblich eingeschränkt, so dass es individuell zu sehr unterschiedlichen Resorptionsraten der Nährstoffe kommen kann.

Die Berechnungen der „Nationalen Verzehrstudie II“ zeigen also nicht, ob die Probanden auch genügend Nährstoffe aufgenommen haben und somit leistungsstarke Blutwerte aufwiesen, um eine optimale Funktion von Zellen und Stoffwechsel zu gewährleisten.

Unabhängig davon, ob die Berechnung der Nährstoffversorgung aussagekräftig ist, macht es Sinn, die wichtigen Nährstoffe für eine gesunde Stoffwechsellaage zu überprüfen und individuelle Defizite mit spezieller Labordiagnostik zu erfassen.

Den leidenden Patienten wird nicht interessieren, ob er rein rechnerisch genügend Nährstoffe zu sich nimmt, sondern er wird wissen wollen, ob er ein leicht zu behandelndes Nährstoffdefizit hat, das seine eingeschränkte Stoffwechsellaage erklärt und eine Nährstofftherapie seine Beschwerden verbessern kann.

Übrigens: Gesetzliche Krankenkassen zahlen die Nährstoffanalysen in der Regel nicht - sie halten es für unnötig und unwissenschaftlich. Aus dem gleichen Grund werden die Nährstoffe auch nur von sehr wenigen Ärzten untersucht.

Sind die Nährstoffe und eine gezielte Labordiagnostik wirklich unwichtig?

Wo und wie die Nährstoffe im Stoffwechsel wirken, haben wir uns ja schon sehr ausführlich im Kapitel 3.1 erarbeitet.

Wenn Ihr Auto stehen bleibt, schauen Sie doch als allererstes, ob genug Benzin im Tank ist. Sie lassen Ihr Auto ja auch nicht einfach abschleppen und veranlassen langwierige Untersuchungen in einer Werkstatt, wo vielleicht auch noch der Motor zerlegt wird.

Zuerst sollte das Grundlegende - nämlich die Betriebsstoffe (Nährstoffe) - abgeklärt werden. Simply first - das Einfache zuerst. Füllen Sie doch erst mal den leeren Tank auf und schauen dann, ob der Wagen wieder fährt.

So sollte es in der Medizin auch sein, zuerst kontrollieren, ob genügend Betriebsstoffe (Nährstoffe) für eine normale Funktion zur Verfügung stehen!

Für die Labordiagnostik stehen verschiedenste einfache und kostengünstige Messungen für jeden Nährstoff zur Verfügung.

Ich habe diese **Laboruntersuchungen** in den Steckbriefen auch immer angeführt. Für jeden Nährstoff sind verschiedene Möglichkeiten und die dazugehörigen Normalwerte dargestellt.

Zur Festlegung der Normalwerte wurde bei einer größeren Gruppe von Personen dieser Laborwert gemessen und der Bereich, der die meisten Personen einschließt, wurde als „normal“ definiert.

In diesen Normalwerten liegt ein kleiner Stolperstein:

Als „normal“ wird hier der Bereich festgelegt, den die meisten Personen aufweisen -

„normal“ ist aber nicht zwingend optimal!

Mehr als 60% der Personen in Deutschland haben Übergewicht - d.h. die meisten Personen sind übergewichtig - also ist Übergewicht „normal“, aber sicher nicht optimal!

Optimalwerte der Nährstoffe sollten nicht als „normal“, sondern anders definiert werden:

1. Der Optimalbereich ist der Bereich, in dem die Enzyme ihre maximale Aktivität haben (z.B. Glutathion-Peroxidase mit Selen, Transketolase mit Vitamin B1). Dieser entspricht in der Regel dem oberen Normalbereich.

2. Der Optimalbereich ist der Bereich, in dem Gegenregulationsmaßnahmen nicht mehr nötig sind. Beim Vitamin D ist dieser Bereich einfach festzulegen.

Bei 25-OH-Vitamin D3-Werten unter 40 µg/l steigt das Parathormon (Gegenspieler von Vitamin D), d.h. der Calciumstoffwechsel wird auf Reserve geschaltet. Das nötige Calcium wird durch den Vitamin D-Mangel nicht mehr genügend aus dem Darm aufgenommen, sondern - durch den Anstieg des Parathormons - vermehrt aus dem Knochen abgebaut.

Deshalb ist der Optimalwert für 25-OH-Vitamin D3 das ganze Jahr über bei 40 - 100 µg/l bzw. 100 - 250 nmol/l (siehe 3.2.5.20).

In der einfachen, bio-logischen Nährstofftherapie sollten **immer die Optimalwerte** angestrebt werden, um ein Defizit sicher auszuschließen, maximale Enzymaktivität zu ermöglichen und ein Umschalten des Stoffwechsels auf Reserve zu verhindern.

3.2.5.1 Calcium

Calcium		Bedarf: 800 - 1.000 mg/Tag
Enzyme	Reaktionen	Wirkung
Calcium-Hydroxylapatit (CaP)	Aufbau Matrixbestandteile	Baustoff für Knochen und Zähne
G-Protein-gekoppelte Rezeptoren Calciumkanäle Transportproteine	Signalübertragung	Muskelkontraktion Nervenimpuls Hormonfreisetzung
ATP-Hydrolase	ATP-Spaltung	Energiefreisetzung
Coaktivator der Blutgerinnung	Faktor IV und Co-Faktor für andere Gerinnungsfaktoren	Blutgerinnung
NADH-Oxidase	ROS-Bildung: H_2O_2	Immunabwehr Bildung Schilddrüsenhormone
Apyrase	Purin-, Pyrimidinsynthese	DNA-Bildung, Zellteilung ATP-Bildung
Phospholipase A2	Phosphoglycerid-Stoffwechsel Arachidonsäure-Stoffwechsel	Baustoffe für Zellmembran Entzündung (siehe 4.3.2))
3-Isopentenyl-Pyrophosphat-Isomerase	Q10-Synthese Cholesterinsynthese	Energiegewinnung Baustoffe für Zellmembran, Hormone, Gallensäure
Top 12: Calcium - Gehalt in mg/100 g		
Käse	500 mg	Quark 120 mg
Paranuss	160 mg	Garnelen 90 mg
Joghurt, Milch	120 mg	Walnuss 80 mg
Spinat	112 mg	Sellerie 80 mg
Vollkornbrot	40 mg	Reis 30 mg
		Kartoffel 10 mg
		Bohnen 60 mg
		Broccoli 60 mg
		Hühnerei 50 mg
		Beeren 40 mg
Labordiagnostik:		
	Normal-Wert	Optimal-Wert
Calcium im Serum	2,20 - 2,65 mmol/l	2,20 - 2,65 mmol/l
Calcium im Vollblut	59 - 61 mg/l	59 - 61 mg/l
Nährstoffsubstitution:		
Calcium	oral	500 - 1.000 mg/Tag
	i.v.	130 - 260 mg/Tag

Abb. 120: Calcium-Steckbrief

Wichtige Anmerkung: Die Calcium-Aufnahme im Darm ist überwiegend auf Calbindin und eine Calciumpumpe zurückzuführen, das durch Vitamin D erst produziert wird.

Das bedeutet, ohne Vitamin D (siehe 3.2.5.20) kann der Organismus kein Calcium aus dem Darm aufnehmen, sondern muss sich das notwendige Calcium durch Calciumabbau aus dem Knochen holen.

3.2.5.8 Eisen

Eisen		Bedarf: 2 - 4 mg/Tag
Enzyme	Reaktionen	Wirkung
Eisen als CoFaktor		
γ-Trimethyllysin-Dioxygenase γ-Butyrobetain-Dioxygenase	Carnitin-Biosynthese für β-Oxidation	Energiegewinnung
Superoxid-Dismutase (SOD) Katalase	Antioxidation	Schutz aller Zellbestandteile vor freien Radikalen
Ribonukleosid-Diphosphat- Reduktase	Purin-, Pyrimidin-Synthese	DNA-Bildung, Zellteilung ATP-Bildung
Desaturasen Lipoxygenase	Phosphoglycerid-Stoffwechsel Arachidonsäure-Stoffwechsel	Baustoffe für Zellmembran Entzündung (siehe 4.3.2)
Phenylalanin-Hydroxylase Tyrosin-Hydroxylase	Dopamin-, Noradrenalin-, Adrenalin-synthese	Hormonsynthese
Tryptophan-5-Hydroxylase	Serotonin-, Melatonin-synthese	
β-Caroten-Monooxygenase	Vitamin A-Stoffwechsel	siehe Vitamin A (3.2.5.17)
Alkohol-Dehydrogenase	Gallensäureproduktion Alkoholabbau	Cholesterinabbau Alkoholabbau
Eisen-Schwefel-Zentren		
Aconitase	Citratzyklus	Energiegewinnung
NADH-Dehydrogenase	Komplex I der Atmungskette	
Succinat-Dehydrogenase	Komplex II und Citratzyklus	
Cytochrom-c-Reduktase	Komplex III der Atmungskette	
Iron Regulatory Protein 1 (IRP-1) bei Eisenmangel	hemmt Häm-Synthese fördert Eisenaufnahme d. Zelle	Eisenstoffwechsel
Xanthin-Oxidase	Purin-Abbau	Harnsäureausscheidung
Häm als CoFaktor		
Hämoglobin	Sauerstofftransport im Blut Säure-Puffer durch Bicarbonat	Sauerstofftransport von Lunge zur Zelle
Myoglobin	das „Hämoglobin“ des Muskels	Sauerstofftransport und - speicherung im Muskel
Succinat-Dehydrogenase	Komplex II und Citratzyklus	Energiegewinnung
Cytochrom-c-Reduktase	Komplex III der Atmungskette	
Cytochrom-c-Oxidase	Komplex IV der Atmungskette	
Cytochrom-c	Atmungskette	
NADH-Oxidase	ROS-Bildung: H ₂ O ₂	Immunabwehr (siehe Abb. 117) Bildung Schilddrüsenhormone
Thyreoperoxidase (TPO)	Trijodthyronin(T3), Thyroxin(T4)	Schilddrüsenhormonproduktion
Cyclooxygenase (COX)	Arachidonsäurestoffwechsel	Immunabwehr, Blutgerinnung Mehrdurchblutung Entzündungsregulation

Abb. 127.1: Eisen-Steckbrief

Eisen				Bedarf: 2 - 4 mg/Tag	
Enzyme		Reaktionen		Wirkung	
Häm-Thiolat für CytochromP ₄₅₀					
Sterol-14-Demethylase		Cholesterinsynthese		Baustoff für Zellmembran, Hormone, Gallensäure	
Monooxygenasen		Progesteron-, Aldosteron-, Testosteron, Östradiol-, Cortisolsynthese		Hormonsynthese	
		Gallensäureproduktion		Cholesterinabbau	
Vitamin D-25-Hydroxylase Calcidiol-1-Monooxygenase		Vitamin D-Synthese		siehe Vitamin D (3.2.5.20)	
Thromboxan-A-Synthase		Arachidonsäurestoffwechsel		Blutgerinnung	
Prostacyclin-Synthase				Mehrdurchblutung	
Top 12: Eisen - Gehalt in mg/100 g					
Leinsamen	7 mg	Spinat	3 mg	Bohne	3 mg
Kürbiskern	5 mg	Hirsch	3 mg	Schwein	3 mg
Ente	4 mg	Mandel	3 mg	Pecannuss	2 mg
Haselnuss	3 mg	Rind	3 mg	Feldsalat	2 mg
Vollkornbrot	2 mg	Reis	1 mg	Kartoffel	0 mg
Labordiagnostik:		Normal-Wert		Optimal-Wert	
Hämoglobin (Hb)		Frau:	12,3 - 15,3 g/dl	Frau:	12,3 - 15,3 g/dl
		Mann:	14,0 - 17,0 g/dl	Mann:	14,0 - 17,0 g/dl
!!! Ferritin im Serum !!!		10 - 400 µg/l		100 -400 µg/l	
Nährstoffsubstitution:					
Eisen		oral		10 - 300 mg/Tag	
		i.v.		37,5 - 62,5 - 100 - 500 mg	

Abb. 127.2: Eisen-Steckbrief

Wichtige Amerkung: **Eisen ist ein ganz besonderer Nährstoff!**

Aufnahme und Stoffwechsel sind bei Eisen gänzlich anders als bei allen anderen Nährstoffen. Eisen wird als einziger Nährstoff nicht mehr ausgeschieden - weder über Niere-Blase, noch über Leber-Darm. Der Organismus gibt Eisen nicht mehr freiwillig her, Eisen wird nur verloren und zwar über die Abschilferung von Haut und Schleimhautzellen, die ebenfalls Eisen enthalten. Diese Eisenverluste liegen bei 1 mg/Tag (siehe Abb. 127.3). Nachdem die Eisenaufnahme über den DMT-1 Transporter streng limitiert ist (1 - 5 mg/Tag), kann eine niedrige Eisenaufnahme über diesen Weg dazu führen, dass zusätzliche Eisenverluste (Monatsblutung, Schwangerschaft, Blutspenden oder Operationen) nicht mehr - oder nur über Jahre hinweg - ausgeglichen werden können.

Weil Eisen für sehr viele Enzyme und Stoffwechselwege notwendig ist, führt ein Eisenmangel zwangsläufig zu massiven Leistungseinschränkungen der Energiegewinnung, der Hormonproduktion und vielen anderen Stoffwechselwegen bis hin zum programmierten Zelltod (siehe 3.1.2.6.1).

3.2.5.20 Vitamin D (Colecalciferol)

Vitamin D (Colecalciferol)		Bedarf: 2.000 - 4.000 IE		
Enzyme	Reaktionen	Wirkung		
vermehrt Calciumkanäle TRPV5 und TRPV6 und Calbindin	Dünndarm	Calcium- und Phosphat-Aufnahme im Dünndarm		
Calciumrückresorption über TRPV5 und Calbindin	Niere	Calcium-Rückresorption in der Niere		
erhöht Osteocalcin , Osteopontin, RANKL (TNF) vermindert Parathormon	Knochen Osteoblasten Osteoklasten	Knochenaufbau und Knochenabbau		
Calciumtransport und Calciumerhöhung im Blut	Muskel	Muskelaktivität		
	Nerv	erhöht Erregungsleitung		
erhöht Nerve growth factor	Nervensystem und Gehirn	Wachstum und Entwicklung des Nervensystems		
erhöht p21	Kontrolle Zellzyklus	Zellteilung und Zellreifung antitumorale Wirkung		
erhöht Insulinausschüttung vermehrt Insulinrezeptoren	Bauchspeicheldrüse	Zuckerstoffwechsel		
erhöht Bindegewebsstoffwechsel	Bindegewebszellen Haut, Knorpel, Knochen	Bindegewebsreifung		
Hemmung Renin-Freisetzung	Renin-Angiotensin-Aldosteron-System	Blutdruckregulation		
erhöht Aktivität des angeborenen Immunsystems	Aktivität Makrophagen, Monozyten, Granulozyten, Natürliche Killerzellen	antibakterielle, antivirale, antitumorale Funktion fördert primäre Immunabwehr		
Hemmung Interleukin-2, TNF-α und dadurch das erworbene Immunsystem	hemmt T- und B-Lymphozyten	hemmt Antikörperfreisetzung und dadurch auch Autoimmunprozesse		
Top 12: Vitamin D3 (Colecalciferol) - Gehalt in IE/100 g				
Lebertran	13.000 IE	Avocado	100 IE	einzige, effektive Quelle für Vitamin D3 ist die Eigenproduktion durch Sonne: täglich bis zu 20.000 IE
Forelle	1.000 IE	Champignon	80 IE	
Lachs	200 IE	Sahne	50 IE	
Hühnerei	100 IE	Käse	50 IE	
Vollkornbrot	0 IE	Reis	0 IE	
Kartoffel				0 IE
Labordiagnostik:		Normal-Wert	Optimal-Wert ganzjährig	
25-OH-Vitamin D im Serum		20 - 100 µg/l	40 - 100 µg/l	
		50 - 250 nmol/l	100 - 250 nmol/l	
Nährstoffsubstitution:				
Colecaciferol		oral	3.000 - 20.000 IE/Tag	

Abb. 139.1: Vitamin D-Steckbrief

Colecalciferol wird in IE (= Internationale Einheiten) angegeben, auch gebräuchlich ist die Einheit μg , wobei gilt: $25 \mu\text{g} = 1.000 \text{ IE}$

Einzig wirkliche Quelle für Vitamin D ist die Eigenproduktion (siehe Abb. 139.2). Sie kann aber nur mit Hilfe von Sonne (UV-Licht) vonstatten gehen und benötigt verschiedene CoFaktoren. Hierbei kann der Körper in

den 30 - 60 min Mittagssonne - also in der Zeit, bevor sich die Haut anfängt zu röten - bis zu 20.000 IE bilden.
Ein Geschenk des Himmels!

Allerdings mit Sonnenschutz (UV-Schutz) ist so gut wie keine Vitamin D-Produktion möglich, deshalb gilt:

Bitte gehen Sie an die Sonne!

Sie müssen sich nicht vor der Sonne schützen, sondern nur vor dem Sonnenbrand! Bevor Sie also rot werden, gehen Sie bitte in den Schatten, ziehen sich etwas über oder tragen Sie erst dann Sonnencreme auf.

Eigenproduktion von Vitamin D	Enzyme Reaktionen	Nährstoffe
Acetyl-CoA		
	(siehe Abb. 84)	Calcium, Magnesium, Mangan, Eisen (Häm), Vitamin B2, B3
Cholesterin (Cholesterol)		
	UV-Licht	Sonnenlicht
Cholecalciferol täglich bis zu 20.000 IE		
	Vitamin D-25-Hydroxylase	Häm, Eisen, Vitamin B3, O ₂
25-OH-Vitamin D3 (Calcidiol)		
	Calcidiol-1-Monooxygenase	Häm, Eisen, Vitamin B3, O ₂
1,25-Dihydroxy-Vitamin D3 (Calcitriol)		

Abb. 139.2: Vitamin D-Eigenproduktion

Wichtige Anmerkung: Das aktive 1,25-Dihydroxy-Vitamin D3 (Calcitriol) bindet an die Vitamin-D-Rezeptoren im Zellkern. Fast alle Zellen haben diesen Vitamin-D-Rezeptor. Hier angedockt verändert das aktive Vitamin D die Transkription, d.h. das Ablesen der DNA. Somit beeinflusst Vitamin D die Produktion von mehr als 300 verschiedenen Enzymen.