

Ausgabe

04/26

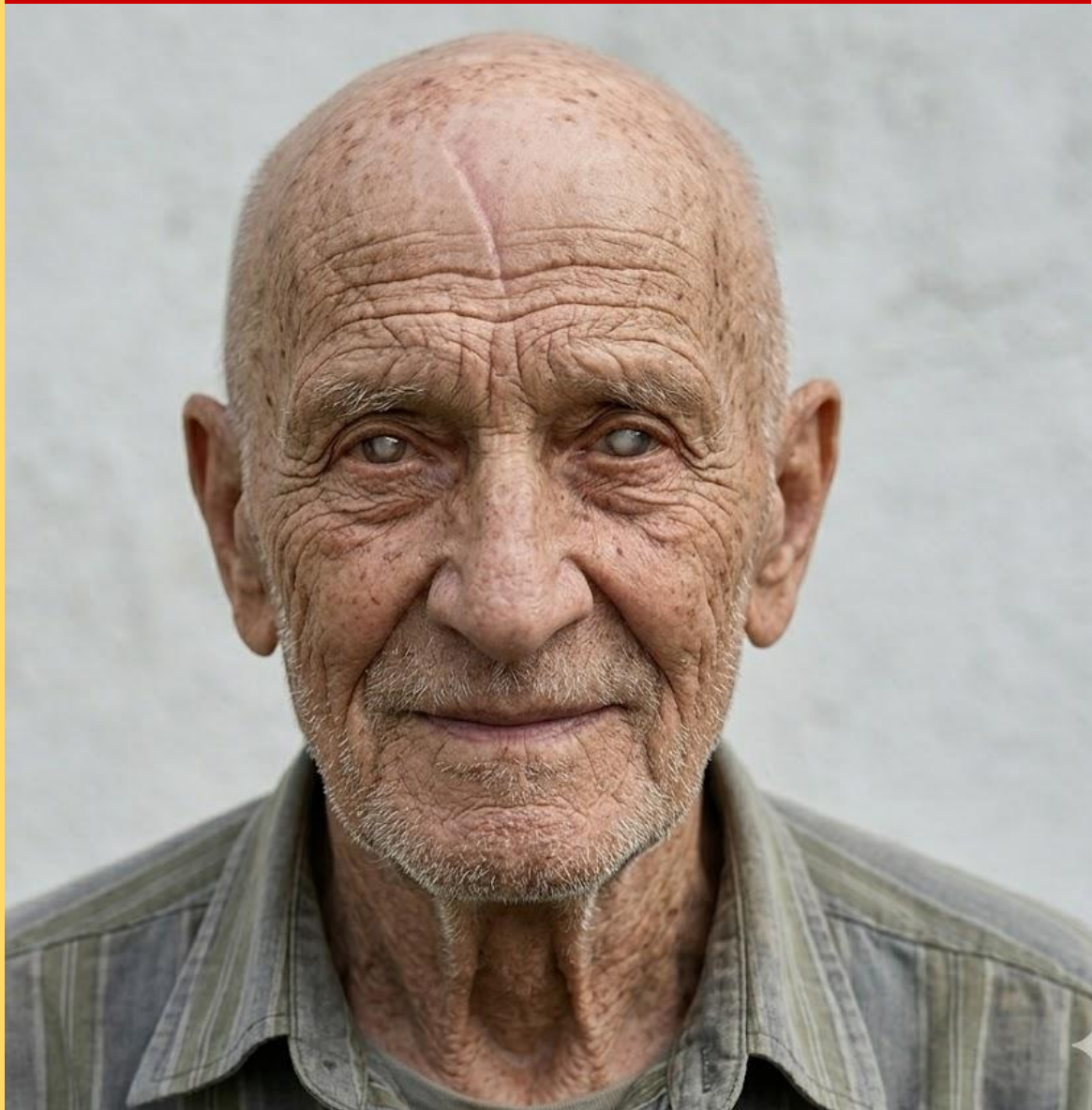
Nummer/Jahr

LdVC Science

Das LdVC Science-Journal

Forschung
Kurzberichte

M
I
N
T
-
P
r
o
f
i
l



Warum altern wir?

Editorial

Ein multidimensionales Altern: Zwischen biologischem Abbau und biografischem Gewinn

Wissenschaftlich wird Weisheit oft als die Fähigkeit definiert, Widersprüche auszuhalten, Ambivalenzen zu akzeptieren und Empathie empfinden zu können. Dieser Gewinn entsteht fast ausschließlich biografisch, weil er die Reflexion über die eigenen, oft jahrzehntelangen Fehler und Erfolge voraussetzt. Somit stellt das Altern etwas Großartiges dar!

Prof. Dr. David Sinclair ist einer der bekanntesten Altersforscher weltweit. Er formuliert provokant: „Altern ist kein unumgängliches Schicksal, sondern eine Krankheit, die man behandeln und irgendwann heilen kann“. Nach seiner „Informationstheorie des Alterns“ altern wir nicht, weil unsere DNA degeneriert, sondern weil Zellen die Information darüber verlieren, wie sie diese DNA richtig ablesen müssen. Epigenetische Faktoren, also DNA-Modifikationen, spielen hierbei eine zentrale Rolle. Ein Verlust epigenetischer Daten vergleicht er mit einem Kratzer auf einer CD, sodass diese unleserlich wird. Eine unterhaltsame Theorie über das Altern, aber ebenso abstrus, Altern als Krankheit verstehen zu wollen.

Prof. Dr. Venki Ramakrishnan erhielt einst den Chemie-Nobelpreis für die bis auf atomarer Ebene entschlüsselte dreidimensionale Struktur der Ribosomen. Er erklärt den Alterungsprozess durch den Zusammenbruch der Proteostase, da Ribosomen im Alter ungenauer arbeiten. Sie machen Fehler beim Ablesen der mRNA. Dadurch entstehen deformierte, unvollständige oder falsch gefaltete Proteine. Es gibt laut Ramakrishnan kein genetisches Programm, das uns gezielt sterben lässt. Das Altern ist vielmehr ein Versagen der Evolution: Die Natur investiert Energie in Wachstum und Fortpflanzung, vernachlässigt jedoch die dauerhafte Wartung unseres Körpers. Vielleicht leben wir aber durch unsere Nachkommen in einer sogar optimierten Variante unter veränderten äußeren Einflüssen weiter? Evolution ist nicht dumm. Sie denkt zwar nicht, tut aber immer das Richtige – zumindest biologisch betrachtet.

Der Alterungsprozess ist ein unglaublich komplexer Vorgang, der sich nicht durch eine gezielte „Heilung“ abschalten lässt. So spielen neben der Genetik auch die Ernährung, regelmäßige Bewegung, Schlaf, Stress, Rauchen und Alkoholkonsum, UV-Strahlung, Umweltbelastungen sowie soziale Kontakte und die allgemeine medizinische Versorgung eine entscheidende Rolle. Dennoch meinen einige sehr reiche Leute, dass man mit Geld jeglichen wissenschaftlich-medizinischen Fortschritt erzielen kann. Das ist ebenso erstrebenswert wie naiv. Jeff Bezos ist einer der Hauptinvestoren hinter *Altos Labs* – einem der am besten finanzierten Biotech-Unternehmen der Welt mit einem Startkapital von über 3 Milliarden Dollar. *Altos* forscht an der zellulären Reprogrammierung, um alte Zellen wieder in einen jugendlichen Zustand zurückzusetzen. Der Tech-Unternehmer Bryan Johnson versucht mit seinem Projekt *Blueprint* die Organe seines Körpers biologisch wie die eines 18-Jährigen funktionieren zu lassen. Dafür gibt er jährlich über 2 Millionen Dollar für sein Ärzteteam aus, nimmt über 100 Pillen am Tag, isst vegan nach extrem strengem Plan, filtert sein Blut und trackt jede Sekunde seines Schlafs. Seine Firma wird inzwischen sogar von sogenannten „Prominenten“ wie Kim Kardashian und Paris Hilton finanziert. Vielleicht wollen gerade reiche Menschen ein unendliches Leben – schließlich haben sie auch viel (Finanzielles) zu verlieren. Ein weiteres Indiz dafür, dass Geld nicht glücklich, sondern fanatisch macht. Überraschenderweise macht ausgerechnet Elon Musk bei dieser Sache nicht mit. Er investiert dort keinen Cent und sagt öffentlich: „Wenn wir zu lange leben, verkrustet die Gesellschaft, weil keine neuen Ideen mehr nachkommen“. Vielleicht denken Billionäre anders als Milliardäre? Warten wir ab, auch Elon Musk wird älter werden und eventuell noch in existenzielle Panikattacken verfallen. Ein armer Mensch!

Der Umgang mit Endlichkeit ist in unterschiedlichen Kulturen sehr verschieden verwurzelt. Wie wir alt werden und wie die Gesellschaft auf uns blickt, ist kein biologisches Schicksal, sondern tief in unseren kulturellen Werten verankert. Während die moderne westliche Welt das Altern oft als Defizit oder als logistisches Problem betrachtet, gilt das hohe Alter in vielen Teilen der Welt als der absolute Höhepunkt des Lebens. In ostasiatischen Ländern wie China, Japan und Korea, ist Respekt vor den Eltern das oberste moralische Gebot. So gibt es z.B. in China das „Gesetz zum Schutz der Rechte und Interessen von älteren Menschen“. Es verpflichtet Kinder dazu, ihre alternden Eltern regelmäßig zu besuchen und finanziell zu unterstützen. Japan feiert jedes Jahr im September den offiziellen Feiertag „Keirō no Hi“ (Tag des Respekts vor den Älteren). Seniorinnen und Senioren werden traditionell als Säulen der Weisheit betrachtet, und die Pflege zu Hause durch die Familie gilt bis heute als Ideal. Auch in Teilen der indischen Kultur ist das älteste Familienmitglied das unumstrittene Oberhaupt des Haushalts. Es trifft die wichtigen finanziellen und familiären Entscheidungen. Ebenso sind innerhalb vieler indigener Völker ältere Menschen die Hüter des Wissens, der Sprache, der Rituale und der Geschichte der Gemeinschaft. Natürlich wandelt sich dieses Bild momentan auch in diesen Kulturen. In Europa und Nordamerika steht der Individualismus mittlerweile klar im Vordergrund. Erfolg wird oft über Jugend, Produktivität und Selbstständigkeit definiert. Alt zu werden bedeutet hier häufig den Verlust von Erfolg. In kollektivistischen Kulturen (Wir-Kulturen) definiert sich der Wert eines Menschen über seine Rolle in der Gemeinschaft – und diese Rolle wird im Alter oft einflussreicher. In individualistischen Kulturen (Ich-Kulturen) sinkt der gesellschaftlich wahrgenommene Status oft mit dem Austritt aus dem Berufsleben. Alterungsvorgänge scheinen zum Leben dazuzugehören. Wahrscheinlich verleiht gerade die Endlichkeit unserem Leben überhaupt erst Wert und Dringlichkeit. Wäre alles unendlich verfügbar, würde dann nicht auch die Bedeutung von Momenten, Entscheidungen und Beziehungen schwinden?

Die Bibel hat einen bemerkenswerten und sehr wertschätzenden Blick auf das Altwerden. Im Gegensatz zu modernen Leistungsgesellschaften, die Jugend und Fitness oft idealisieren, wird das Altern in der biblischen Tradition als eine Phase der Würde, der Weisheit und des besonderen Segens angesehen – auch wenn die damit verbundenen Beschwerden nicht verschwiegen werden.

Hiob 12,12: „Bei den Alten ist Weisheit, und langes Leben bringt Einsicht.“

3. Buch Mose 19,32: „Vor grauem Haar sollst du aufstehen und die Person eines Alten ehren.“

Amen!

MD

Inhalt



Forschung

Inwiefern haben nox-Gene eine substanzielle Rolle in unterschiedlichen Alterungsprozessen?.....	Seite 1-29
Aquaponik & Ökoponik – Trend oder Zukunft?.....	Seite 30-77

Kurzberichte

Lichtfarbe beeinflusst Pflanzenwachstum.....	Seite 78-80
Autoimmunisierung des Körpers gegen Krebs.....	Seite 81-82
Unterschiedliche Legierungsarten.....	Seite 83-86

Inwiefern haben *nox*-Gene eine substanzielle Rolle in unterschiedlichen Alterungsprozessen?

Liliane Roder und Merle Hoffmann

Projektübersicht

Wir untersuchen, ob das *nox3*-Gen eine entscheidende Rolle in Alterungsprozessen spielt. Das *nox3*-Gen kodiert für ein Enzym namens NADPH-Oxidase 3, das reaktive Sauerstoffspezies (ROS) produziert. Diese ROS werden schon lange mit Alterungsprozessen in Verbindung gebracht. Unsere zentrale Frage lautet: Haben Spezies mit ähnlichen *nox3*-Gensequenzen auch ähnliche Lebenserwartungen?

Unser Ziel ist es herauszufinden, ob die genetische Übereinstimmung im *nox3*-Gen zwischen verschiedenen Säugetierarten mit ihrer Lebenserwartung korreliert. Wir wollten testen, ob dieses Gen als Biomarker für die Lebenserwartung dienen könnte und damit mehr über die molekularen Grundlagen des Alterns lernen.

Die Idee entstand aus unserem Interesse an der Alterungsforschung und der Frage, warum manche Tiere viel länger leben als andere. In der Literatur stießen wir auf die Freie-Radikale-Theorie des Alterns und auf NADPH-Oxidasen als wichtige Produzenten von reaktiven Sauerstoffspezies. Da bioinformatische Methoden immer zugänglicher werden, beschlossen wir, diese modernen Werkzeuge zu nutzen, um genetische Ähnlichkeiten zwischen Arten zu analysieren.

Wir haben einen bioinformatischen Ansatz gewählt und das BLAST-Tool (Basic Local Alignment Search Tool) verwendet, um mRNA-

Sequenzen des *nox3*-Gens verschiedener Säugetiere zu vergleichen. In einem ersten Durchgang verglichen wir das menschliche *nox3*-Gen mit dem von Schimpansen, Hunden, Katzen und Nagetieren. In einem zweiten Durchgang konzentrierten wir uns speziell auf Nagetiere und nutzten die Hausmaus als Referenz, wobei wir auch den Nacktmull einbezogen – ein Nagetier, das für seine außergewöhnlich hohe Lebenserwartung bekannt ist. Alle genetischen Daten stammen aus der NCBI-Datenbank.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass die genetische Übereinstimmung im *nox3*-Gen allein kein verlässlicher Indikator für die Lebenserwartung ist. Der Nacktmull hat die geringste Übereinstimmung mit der Hausmaus (83,57%), lebt aber zehnmal länger. Dies zeigt, dass Alterungsprozesse deutlich komplexer sind als zunächst angenommen. In zukünftigen Projekten möchten wir weitere Gene untersuchen und verstehen, welche genetischen Faktoren tatsächlich zur außergewöhnlichen Langlebigkeit des Nacktmulls beitragen. Auch eine Erweiterung auf andere NADPH-Oxidase-Gene (wie *nox1*, *nox2*, *nox4*) wäre interessant.

1. Fachliche Kurzfassung

Warum lebt ein Nacktmull 30 Jahre, während eine genetisch näherverwandte Hausmaus bereits nach zwei Jahren stirbt? Diese Frage führte uns zu einer starken Relativierung gegenüber unseren Erwartungen über die Rolle des nox3-Gens beim Altern.

Das nox3-Gen kodiert für die NADPH-Oxidase 3, ein Enzym, das reaktive Sauerstoffspezies (ROS) produziert. Da oxidativer Stress durch ROS mit Alterungsprozessen in Verbindung gebracht wird, stellten wir die Hypothese auf: Spezies mit hoher nox3-Genübereinstimmung weisen ähnliche Lebenserwartungen auf.

Unsere vergleichende Gensequenzanalyse verschiedener Tierarten mit dem Menschen als Referenz ergab zunächst einen möglichen Zusammenhang: Spezies mit höherer nox3-Genübereinstimmung zum Menschen, der eine relativ hohe Lebenserwartung hat, zeigten tendenziell längere Lebenserwartungen. Der Schimpanse erreichte mit 99,04 Prozent Übereinstimmung eine Lebenserwartung von 30 bis 40 Jahren, während Nagetiere mit etwa 81 bis 82 Prozent Übereinstimmung nur wenige Monate bis maximal drei Jahre leben.

Die entscheidende wissenschaftliche Erkenntnis lieferte jedoch der Nacktmull: Trotz der mit 83,57 Prozent geringsten Genübereinstimmung zur Hausmaus innerhalb der untersuchten Nagetiere erreicht er mit 20 bis 30 Jahren eine etwa zehnfach höhere Lebenserwartung als genetisch näherverwandte Mausarten. Dieses Ergebnis widerlegt also unsere Hypothese eines direkten Zusammenhangs zwischen nox3-Genähnlichkeit und Lebenserwartung eindeutig.

Wir schließen daraus, dass das nox3-Gen allein kein zuverlässiger Indikator für die Lebenserwartung ist, aber dennoch eine Tendenz zeigt. Andere genetische oder biologische Mechanismen müssen die Lebensdauer maßgeblich beeinflussen. Der außergewöhnlich langlebige Nacktmull zeigt, dass Spezies mit geringerer nox3-Genkonservierung dennoch hoch-effiziente Mechanismen zur Verlangsamung des Alterungsprozesses entwickelt haben können.

2. Motivation und Fragestellung

Wie kann man das Altern verlangsamen oder sogar stoppen? Diese Frage begegnet uns ständig – in den Nachrichten, in sozialen Medien, in Dokumentationen. Anti-Aging ist ein riesiges Thema, das die Menschen schon immer fasziniert hat. Von teuren Cremes bis zu aufwendigen medizinischen Behandlungen wird viel versprochen, doch die grundlegenden biologischen Mechanismen des Alterns sind noch längst nicht vollständig verstanden. Gleichzeitig war uns das Thema Genetik, das wir vor einiger Zeit im Biologieunterricht behandelt hatten, als besonders interessant im Kopf geblieben. Die Vorstellung, dass in unserer DNA der Code für so viele Eigenschaften und Prozesse liegt, fanden wir unglaublich spannend.

Als unser Biologielehrer uns Ende des letzten Schuljahres ansprach, ob wir Lust hätten, ein Forschungsprojekt zum Thema Altern zu machen, waren wir sofort begeistert. Hier war die Chance, zwei Dinge zu verbinden, die uns faszinierten: das allgegenwärtige Thema Altern und die spannende Welt der Genetik. Doch gleichzeitig stellte sich die Frage: Wie geht man ein so komplexes Thema überhaupt an? Altern wird von unzähligen Faktoren beeinflusst – von der Ernährung über Umweltbedingungen bis hin zu genetischen Anlagen. Wir brauchten einen konkreten Ansatzpunkt, etwas das wir mit den uns zur Verfügung stehenden Mitteln selbstständig erforschen konnten.

Wir begannen zu recherchieren und stießen dabei auf die nox-Gene, eine Familie von Genen, die für Enzyme kodieren, welche reaktive Sauerstoffspezies produzieren. In verschiedenen wissenschaftlichen Artikeln wurde beschrieben, dass diese Sauerstoffspezies mit Alterungsprozessen in Verbindung stehen könnten (z.B. Görlach & Krause, 2006). Das klang vielversprechend – hier schien es eine konkrete genetische Komponente zu geben, die wir untersuchen könnten. Nach weiterer Recherche entschieden wir uns, uns speziell auf das nox3-Gen zu konzentrieren, da zu diesem Gen Daten für verschiedene Tierarten verfügbar waren.

Der entscheidende Moment kam, als unser Biologielehrer uns das BLAST-Search-Programm (Basic Local Alignment Search Tool) zeigte – ein bioinformatisches Tool, mit dem man Gensequenzen verschiedener Tierarten vergleichen kann. Plötzlich eröffnete sich uns eine völlig neue Möglichkeit: Wir konnten Gensequenzen von Menschen, Mäusen, Hunden, Katzen und vielen anderen Tieren analysieren und vergleichen, ohne ein teures Forschungslabor zu benötigen. Besonders reizvoll fanden wir, dass für viele Lebewesen diese Daten bereits in öffentlichen Datenbanken wie der NCBI (National Center for Biotechnology Information) verfügbar sind. Außerdem motivierte uns die Aussicht, neue Fähigkeiten zu erlangen und zu lernen, wie man mit solchen bioinformatischen Methoden arbeitet – ein Bereich, der Biologie mit Informatik verbindet und in der modernen Forschung immer wichtiger wird.

Uns war bewusst, dass die Lebenserwartung einer Spezies nicht von einem einzigen Gen abhängt. Faktoren wie Stoffwechselrate, Ernährung, Lebensraum, Stress und viele weitere genetische Mechanismen spielen zweifellos eine bedeutende Rolle. Dennoch wollten wir gezielt einen konkreten genetischen Aspekt fokussieren, den wir systematisch und selbstständig untersuchen konnten. Unsere zentrale Fragestellung lautete daher: Hat das nox3-Gen eine substantielle Rolle in unterschiedlichen Alterungsprozessen? Anders formuliert: Lässt sich anhand der Ähnlichkeit des nox3-Gens zwischen verschiedenen Spezies etwas über deren Lebenserwartung aussagen? Die Überlegung dahinter war folgende: Wenn das nox3-Gen tatsächlich eine wichtige Rolle bei Alterungsprozessen spielt und dieses Gen bei zwei Spezies sehr ähnlich aufgebaut ist, dann könnten auch die damit verbundenen Alterungsmechanismen ähnlich funktionieren – und möglicherweise zu ähnlichen Lebensspannen führen. Daraus entwickelten wir unsere zentrale Hypothese: Spezies mit hoher nox3-Genübereinstimmung weisen ähnliche Lebenserwartungen auf. Unser methodischer Plan war es, die nox3-Gensequenzen von verschiedenen Säugetierarten mit deutlich unterschiedlichen Lebenserwartungen systematisch zu vergleichen und zu analysieren, ob sich ein erkennbares Muster zwischen genetischer Ähnlichkeit und Lebensdauer zeigt.

Dabei wollten wir sowohl Vergleiche mit dem Menschen als Referenzspezies durchführen als auch Vergleiche innerhalb einer nah verwandten Tiergruppe vornehmen, um mögliche Zusammenhänge besser identifizieren zu können.

3. Hintergrund und theoretische Grundlagen

Das nox3-Gen gehört zur Familie der NADPH-Oxidasen, einer Gruppe von Enzymen, die in verschiedenen biologischen Prozessen eine wichtige Rolle spielen. NADPH-Oxidasen produzieren reaktive Sauerstoffspezies (ROS) – chemisch hochreaktive Sauerstoffmoleküle, die sowohl nützliche als auch potenziell schädliche Funktionen im Körper erfüllen können.

Das nox3-Gen kodiert spezifisch für die NADPH-Oxidase 3. Banfi et al. (2004) konnten zeigen, dass nox3 hauptsächlich im Innenohr exprimiert wird, wo es eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung des Gleichgewichtsorgans spielt. Darüber hinaus ist nox3 an der Produktion von ROS beteiligt, die für verschiedene Signalübertragungsprozesse in Zellen notwendig sind.

Der Zusammenhang zwischen NADPH-Oxidasen und Alterungsprozessen wird in der wissenschaftlichen Literatur seit Jahrzehnten diskutiert. Die sogenannte "Freie-Radikale-Theorie des Alterns" wurde ursprünglich von Denham Harman (1956) formuliert und besagt, dass die kumulative Schädigung durch freie Radikale über die Lebenszeit hinweg zu den typischen Erscheinungen des Alterns beiträgt. Görlach und Krause (2006) haben diese Theorie weiterentwickelt und speziell auf die Rolle der NOX-Familie der NADPH-Oxidasen fokussiert. Ihre Arbeit zeigt, dass nicht nur zufällig entstehende freie Radikale, sondern auch enzymatisch kontrolliert produzierte ROS aus NADPH-Oxidasen für Alterungsprozesse relevant sein könnten.

Einerseits erfüllen ROS wichtige Funktionen bei der Zellkommunikation und Immunabwehr. Andererseits kann eine Überproduktion von ROS zu oxidativem Stress führen, bei dem Zellstrukturen wie DNA, Proteine und Lipide geschädigt werden. Weitere Studien zeigen,

dass NADPH-Oxidasen bei altersbedingten Erkrankungen eine Rolle spielen können, darunter neurodegenerative Erkrankungen, kardiovaskuläre Probleme und Lungenfibrose. Diese Erkenntnisse legen nahe, dass die Regulation von ROS-produzierenden Enzymen für die Gesundheitsspanne und möglicherweise auch für die Lebensspanne von Organismen relevant sein könnte.

Unsere Arbeit knüpft an diese Forschung an, indem wir einen neuartigen Ansatz wählen: Während bisherige Studien sich vorwiegend auf die Funktion und Rolle von NADPH-Oxidasen in Krankheitsprozessen innerhalb einzelner Spezies konzentrierten, untersuchen wir die evolutionäre Konservierung des nox3-Gens über Artgrenzen hinweg. Wenn das nox3-Gen tatsächlich eine zentrale Rolle in Alterungsprozessen spielt, wie die Freie-Radikale-Theorie nahelegt, dann sollte sich dies möglicherweise in der genetischen Ähnlichkeit zwischen Spezies mit vergleichbaren Lebensspannen widerspiegeln. Unser vergleichender Ansatz ermöglicht es uns zu prüfen, ob die genetische Konservierung dieses Gens mit der Lebenserwartung korreliert – eine Fragestellung, die in der bisherigen Literatur so noch nicht untersucht wurde. Damit verbinden wir evolutions-biologische Perspektiven mit Erkenntnissen aus der Altersforschung und nutzen die Möglichkeiten der Bioinformatik, um diese Verbindung systematisch zu analysieren.

4. Vorgehensweise, Materialien und Methoden

Unsere Untersuchung basierte auf einem bioinformatischen Ansatz, bei dem wir Gensequenzen aus öffentlich zugänglichen Datenbanken analysierten und verglichen. Alle nox3-Gensequenzen bezogen wir aus der NCBI-Datenbank (National Center for Biotechnology Information), einer der weltweit größten öffentlichen Datenbanken für biologische Sequenzinformationen. Dabei arbeiteten wir spezifisch mit den mRNA-Sequenzen (messenger RNA) des nox3-Gens, also der Boten-RNA, die als Vorlage für die Proteinsynthese dient. Die Verwendung von mRNA-Sequenzen hat den Vorteil, dass sie nur die kodierenden Bereiche des Gens enthalten und somit direkt die genetische Information repräsentieren, die in das funktionelle Protein übersetzt wird.

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Spezies achteten wir darauf, Säugetierarten mit möglichst unterschiedlichen Lebenserwartungen zu wählen, um einen breiten Vergleich zu ermöglichen. Wir konzentrierten uns auf Arten, für die mRNA-Sequenzen des nox3-Gens in der NCBI-Datenbank verfügbar waren. Die finale Auswahl umfasste Primaten (Mensch und Schimpanse), Raubtiere (Hund und Katze) sowie verschiedene Nagetiere (mehrere Mausarten, Ratte und Nacktmull). Diese Zusammenstellung ermöglichte es uns, sowohl Vergleiche über größere phylogenetische Distanzen hinweg als auch innerhalb einer engeren taxonomischen Gruppe durchzuführen.

Die Recherche der Lebenserwartungsdaten stellte dabei eine besondere Herausforderung dar. Für viele Tierarten existieren unterschiedliche Angaben je nach Quelle, und die Lebenserwartung kann sich zwischen Tieren in freier Wildbahn und in Gefangenschaft erheblich unterscheiden. Umweltfaktoren wie Prädation, Nahrungsverfügbarkeit, Parasiten und Krankheiten beeinflussen die Lebenserwartung in der Natur stark, während Tiere in Gefangenschaft unter optimalen Bedingungen – mit regelmäßiger Fütterung, medizinischer Versorgung und ohne natürliche Feinde – oft deutlich länger leben können. Für einige Spezies, insbesondere weniger gut untersuchte Arten wie die Sikkim-Maus (*Mus pahari*) oder die Ryukyu-Maus (*Mus caroli*), waren überhaupt nur begrenzte Informationen verfügbar.

Leider gab es nicht für jede Tierart verlässliche Daten unter gleichen Umständen, die wir aufgrund von Erwähnung in verschiedenen wissenschaftlichen Quellen als gleichermaßen glaubwürdig hätten einstufen können. Nach sorgfältiger Abwägung entschieden wir uns daher, jeweils die Lebenserwartungsangaben zu verwenden, die wir am häufigsten in verschiedenen Quellen fanden und die durch ihre mehrfache Erwähnung eine gewisse Verlässlichkeit suggerierten. Aus diesem Grund unterscheiden sich die Bedingungen in unserer Datensammlung: Für manche Spezies geben wir die Lebenserwartung in freier Wildbahn an (beispielsweise für die Wanderratte und die Sikkim-Maus), für andere die in Gefangenschaft oder unter optimalen Hal-

tungsbedingungen (beispielsweise für Schimpanse, Hausmaus und Ryukyu-Maus), je nachdem, welche Daten verfügbar und durch mehrfache Quellenennung gestützt waren. Bei mehr verfügbarer Zeit und Ressourcen hätten wir uns gerne intensiver mit den verschiedenen Angaben zu den Lebenserwartungen auseinandergesetzt, unterschiedliche Studien verglichen und möglicherweise sogar Experten kontaktiert, um uns zu annähernd 100 Prozent sicher in diesen Angaben fühlen zu können. Für den Rahmen dieses Projekts und mit den uns zur Verfügung stehenden Mitteln konzentrierten wir uns jedoch auf die am häufigsten genannten und am besten dokumentierten Werte. Unsere finale Auswahl umfasste folgende Spezies: *Homo sapiens* (Mensch, 80-85 Jahre – wobei zu beachten ist, dass die menschliche Lebenserwartung früher deutlich geringer war und durch medizinischen Fortschritt, Hygiene und Ernährung stark gestiegen ist), *Pan troglodytes* (Schimpanse, 30-40 Jahre in Gefangenschaft), *Canis lupus familiaris* (Haushund, 10-15 Jahre), *Felis catus* (Hauskatze, 12-15 Jahre), *Mus musculus* (Hausmaus, 2-3 Jahre in Gefangenschaft), *Rattus norvegicus* (Wanderratte, weniger als ein Jahr in freier Wildbahn), *Mus caroli* (Ryukyu-Maus, 2-3 Jahre bei idealen Bedingungen), *Mus pahari* (Sikkim-Maus, wenige Monate in freier Wildbahn) und *Heterocephalus glaber* (Nacktmull, 20-30 Jahre).

Für den eigentlichen Sequenzvergleich nutzten wir das BLAST-Programm (Basic Local Alignment Search Tool), ein bioinformatisches Standardwerkzeug, das in der genetischen Forschung weltweit verwendet wird. Speziell arbeiteten wir mit der Funktion "Nucleotide BLAST", die für den Vergleich von DNA- und RNA-Sequenzen konzipiert ist. Innerhalb dieser Funktion verwendeten wir die Option "Align two or more Sequences", die es ermöglicht, gezielt ausgewählte Sequenzen direkt miteinander zu vergleichen, anstatt eine Sequenz gegen eine große Datenbank zu suchen.

Unser Biologielehrer erklärte uns zu Beginn des Projekts in einer Einführungsstunde, wie man grundsätzlich mit diesem Programm arbeitet, wie man Sequenzen aus der NCBI-Datenbank lädt und welche Parameter beim Vergleich wichtig sind. Diese initiale Anleitung war für uns sehr hilfreich, um die technischen Grundlagen zu verstehen. Alle weiteren Schritte – das systematische Herausuchen der richtigen mRNA-Sequenzen für jede

Spezies, die Durchführung aller paarweisen Vergleiche, die Dokumentation der Ergebnisse und die Auswertung der Daten – führten wir vollständig selbstständig durch. Wir mussten dabei auch lernen, mit den teilweise komplex beschrifteten Datenbankeinträgen umzugehen und sicherzustellen, dass wir tatsächlich die korrekten mRNA-Sequenzen für das *nox3*-Gen jeder Spezies verwendeten.

BLAST arbeitet, indem es die vier Nukleobasen – Adenin (A), Thymin (T), Guanin (G) und Cytosin (C) – zwischen zwei Sequenzen Position für Position vergleicht und ermittelt, wie viele dieser Basen an den entsprechenden Positionen übereinstimmen. Das Programm berechnet daraus einen Wert, der als "Percent Identity" (Übereinstimmungsprozent) bezeichnet wird und angibt, wie viel Prozent der Nukleotide zwischen den beiden verglichenen Sequenzen identisch sind. Zusätzlich stellt BLAST die Übereinstimmungen auch visuell dar, wobei vertikale Striche zwischen den beiden Sequenzen übereinstimmende Basen markieren und Lücken Bereiche anzeigen, in denen die Sequenzen unterschiedlich sind oder unterschiedliche Längen aufweisen.

Wir führten unsere Analysen in zwei systematischen Durchgängen durch, um verschiedene Fragestellungen zu adressieren. Im ersten Durchgang wählten wir den Menschen (*Homo sapiens*) als Referenzspezies und verglichen seine *nox3*-mRNA-Sequenz paarweise mit den entsprechenden Sequenzen von Schimpanse, Haushund, Katze, Hausmaus und Wanderratte. Dieser Durchgang sollte zeigen, ob es einen Zusammenhang zwischen der genetischen Ähnlichkeit zum Menschen und der Lebenserwartung gibt, wobei wir verschiedene Säugetierfamilien einbezogen. Der zweite Durchgang fokussierte sich auf eine engere taxonomische Gruppe, um zu prüfen, ob sich das Muster auch innerhalb nah verwandter Arten zeigt. Hier wählten wir die Hausmaus (*Mus musculus*) als Referenzspezies und verglichen ihre *nox3*-Sequenz mit der von vier anderen Nagetieren: der Wanderratte (*Rattus norvegicus*), zwei weiteren Mausarten (*Mus caroli* und *Mus pahari*) sowie dem Nacktmull (*Heterocephalus glaber*).

Diese Strategie ermöglichte es uns, sowohl grobe phylogenetische Trends als auch feinere Unterschiede innerhalb einer Ordnung zu untersuchen.

Bei jedem einzelnen Vergleich dokumentierten wir sorgfältig das von BLAST berechnete Übereinstimmungsprozent und stellten es der bekannten Lebenserwartung der jeweiligen Spezies gegenüber. Diese systematische Vorgehensweise ermöglichte es uns anschließend, die Daten in Tabellenform zusammenzufassen und Muster oder Ausnahmen zu identifizieren.

5. Ergebnisse

In diesem Kapitel präsentieren wir die Ergebnisse unserer Sequenzvergleiche systematisch und ausführlich. Wir unterteilen die Darstellung nach den beiden Durchgängen unserer Analyse und gehen dabei detailliert auf die einzelnen Vergleiche, beobachtete Muster und bedeutsame Ausnahmen ein.

5.1 Erster Durchgang: Vergleich mit dem Menschen als Referenzspezies

Im ersten Durchgang unserer Untersuchung wählten wir den Menschen (*Homo sapiens*) als Referenzspezies und verglichen seine nox3-mRNA-Sequenz mit der von fünf weiteren Säugetierarten aus unterschiedlichen taxonomischen Familien.

Die Auswahl des Menschen als Referenz war be-

wusst gewählt, da der Mensch eine vergleichsweise hohe Lebenserwartung aufweist und uns als Ausgangspunkt für die Überprüfung unserer Hypothese diente. Gemäß unserer Hypothese sollten Spezies mit höherer genetischer Ähnlichkeit zum Menschen im nox3-Gen auch ähnlich lange Lebenserwartungen zeigen, während genetisch entferntere Spezies kürzere Lebensspannen aufweisen sollten.

Der Vergleich zwischen Mensch und Schimpanse (*Pan troglodytes*) ergab mit 99,04 Prozent die höchste Übereinstimmung aller untersuchten Spezies. Dieses Ergebnis überraschte uns nicht, da Schimpansen unsere nächsten lebenden Verwandten sind und sich unser letzter gemeinsamer Vorfahr vor etwa 6 bis 7 Millionen Jahren von der menschlichen Linie trennte. Die extrem hohe genetische Ähnlichkeit im nox3-Gen spiegelt diese enge Verwandtschaft wider. Der Schimpanse erreicht in Gefangenschaft eine Lebenserwartung von 30 bis 40 Jahren, was deutlich über der aller anderen von uns untersuchten nicht-menschlichen Spezies liegt. Dies schien unsere Hypothese zunächst zu unterstützen: Die höchste genetische Ähnlichkeit korrelierte mit der längsten Lebenserwartung unter den verglichenen Tieren. Die beiden untersuchten Raubtiere – Hund (*Canis lupus familiaris*) und Hauskatze (*Felis catus*) – zeigten beide

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse dieses ersten Durchgangs zusammen:

Spezies (lat.)	Bezeichnung (im Deutschen)	Nox3-Übereinstimmung	Lebenserwartung
<i>Homo sapiens</i>	Mensch	100% (Referenz)	80-85 Jahre*
<i>Pan troglodytes</i>	Schimpanse	99,04%	30-40 Jahre
<i>Canis lupus familiaris</i>	Haushund	86,84%	10-15 Jahre
<i>Felis catus</i>	Hauskatze	86,01%	12-15 Jahre
<i>Mus musculus</i>	Hausmaus	81,47%	2-3 Jahre
<i>Rattus norvegicus</i>	Wanderratte	81,99%	<1 Jahr

*Die heutige menschliche Lebenserwartung von 80-85 Jahren ist das Ergebnis moderner medizinischer Versorgung, Hygiene und Ernährung. Historisch gesehen lag die Lebenserwartung des Menschen deutlich niedriger.

eine mittlere Übereinstimmung von etwa 86 Prozent (86,84 Prozent beim Hund, 86,01 Prozent bei der Katze). Interessanterweise lagen diese Werte sehr nah beieinander, obwohl Hunde und Katzen zu verschiedenen Familien innerhalb der Ordnung Carnivora gehören. Beide Spezies weisen auch ähnliche Lebenserwartungen auf: 10 bis 15 Jahre beim Hund und 12 bis 15 Jahre bei der Katze. Diese Übereinstimmung sowohl in der genetischen Ähnlichkeit zum Menschen als auch in der Lebenserwartung verstärkte zu-nächst den Eindruck eines möglichen Zusammenhangs.

Bei den beiden Nagetieren – Hausmaus (*Mus musculus*) und Wanderratte (*Rattus norvegicus*) – beobachteten wir die geringsten Übereinstimmungswerte zum Menschen: 81,47 Prozent bei der Hausmaus und 81,99 Prozent bei der Wanderratte. Diese Werte sind immer noch bemerkenswert hoch und zeigen, dass das nox3-Gen über verschiedene Säugetierordnungen hinweg relativ gut konserviert ist. Beide Nagetiere haben im Vergleich zu den anderen untersuchten Spezies die kürzesten Lebenserwartungen: Die Hausmaus lebt in Gefangenschaft etwa 2 bis 3 Jahre, während die Wanderratte in freier Wildbahn oft weniger als ein Jahr alt wird.

Auf den ersten Blick zeigte sich ein klares Muster in unseren Daten: Der Schimpanse mit der höchsten Übereinstimmung (99,04 Prozent) lebte am längsten von allen nicht-menschlichen Spezies. Die Raubtiere mit mittlerer Übereinstimmung (etwa 86 Prozent) zeigten eine mittlere Lebenserwartung. Die Nagetiere mit der geringsten Übereinstimmung (etwa 81-82 Prozent) lebten am kürzesten. Da der Mensch als Referenzspezies eine vergleichsweise hohe Lebenserwartung hat, müsste gemäß unserer Hypothese eine höhere genetische Übereinstimmung mit dem Menschen auch mit einer höheren Lebenserwartung einhergehen – und genau dies schien sich in unseren Daten zu bestätigen.

Diese Beobachtung war zunächst sehr ermutigend und schien unsere Hypothese zu stützen. Allerdings bemerkten wir bereits zu diesem Zeitpunkt eine kleine Unregelmäßigkeit, die uns zum Nachdenken anregte: Die Wanderratte hatte mit 81,99 Prozent eine minimal höhere Übereinstimmung zum Menschen als die Hausmaus mit 81,47 Prozent.

Nach unserer Hypothese sollte die Wanderratte daher auch eine ähnliche oder sogar etwas längere Lebenserwartung haben als die Hausmaus. Tatsächlich beobachteten wir aber das Gegenteil: Die Wanderratte lebt in freier Wildbahn oft weniger als ein Jahr, während die Hausmaus in Gefangenschaft 2 bis 3 Jahre erreicht. Allerdings mussten wir hier die unterschiedlichen Bedingungen berücksichtigen – der Vergleich zwischen freier Wildbahn und Gefangenschaft ist nicht ideal. In Gefangenschaft können auch Wanderratten 2 bis 3 Jahre alt werden, was die Diskrepanz teilweise erklärt. Dennoch war dies ein erster Hinweis darauf, dass der Zusammenhang möglicherweise nicht so eindeutig ist, wie wir zunächst dachten.

5.2 Zweiter Durchgang: Vergleich mit der Hausmaus als Referenzspezies

Um unsere Hypothese gründlicher zu testen und zu überprüfen, ob sich das im ersten Durchgang beobachtete Muster auch innerhalb einer engeren taxonomischen Gruppe bestätigt, führten wir einen zweiten Durchgang durch. Diesmal wählten wir die Hausmaus (*Mus musculus*) als Referenzspezies und verglichen ihre nox3-Sequenz mit der von vier anderen Nagetieren. Die Idee hinter diesem Ansatz war, die phylogenetische Distanz zu verringern: Während im ersten Durchgang verschiedene Säugetierordnungen (Primaten, Carnivora, Rodentia) verglichen wurden, konzentrierten wir uns nun ausschließlich auf Nagetiere.

Wenn unsere Hypothese richtig wäre, sollte der Zusammenhang zwischen genetischer Ähnlichkeit und Lebenserwartung auch innerhalb dieser engeren Gruppe erkennbar sein.

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse dieses zweiten Durchgangs: Die Ryukyu-Maus oder Reisfeldmaus (*Mus caroli*) zeigte mit 98,27 Prozent eine extrem hohe Übereinstimmung zur Hausmaus. Dies ist nicht überraschend, da beide zur gleichen Gattung (*Mus*) gehören und daher sehr nah verwandt sind. Die Lebenserwartung der Ryukyu-Maus liegt bei idealen Bedingungen ebenfalls bei 2 bis 3 Jahren und entspricht damit fast exakt der der Hausmaus.

Tabelle 2: Ergebnisse des DNA-Sequenzvergleiches dieses zweiten Durchgangs:
Die Ryukyu-Maus oder Reisfeld-maus (*Mus caroli*)

Spezies (lat.)	Bezeichnung (im Deutschen)	Nox3-Übereinstimmung	Lebenserwartung
<i>Mus musculus</i>	Hausmaus	100% (Referenz)	2-3 Jahre
<i>Mus caroli</i>	Ryukyu-Maus	98,27%	2-3 Jahre
<i>Mus pahari</i>	Sikkim-Maus	95,53%	Wenige Monate
<i>Rattus norvegicus</i>	Wanderratte	93,38%	<1 Jahr
<i>Heterocephalus glaber</i>	Nacktmul	83,57%	20-30 Jahre

Dieser Befund passte perfekt zu unserer Hypothese: Sehr hohe genetische Ähnlichkeit (98,27 Prozent) korrelierte mit nahezu identischer Lebenserwartung.

Die Sikkim-Maus (*Mus pahari*), ebenfalls zur Gattung *Mus* gehörend, zeigte mit 95,53 Prozent immer noch eine sehr hohe Übereinstimmung zur Hausmaus. Gemäß unserer Hypothese hätten wir erwartet, dass auch diese Art eine ähnliche Lebenserwartung wie die Hausmaus aufweist. Tatsächlich fanden wir aber, dass die Sikkim-Maus in freier Wildbahn oft nur wenige Monate lebt. Dies war bereits ein deutlicher Hinweis darauf, dass hohe genetische Ähnlichkeit nicht automatisch zu ähnlichen Lebenserwartungen führt.

Allerdings mussten wir auch hier berücksichtigen, dass die Datenlage für diese wenig untersuchte Art begrenzt war und die kurze Lebenserwartung in freier Wildbahn möglicherweise stark von Umweltfaktoren beeinflusst wird.

Die Wanderratte (*Rattus norvegicus*) erschien auch in diesem Durchgang und zeigte zur Hausmaus eine Übereinstimmung von 93,38 Prozent. Dieser Wert ist niedriger als bei den beiden anderen *Mus*-Arten, was sich dadurch erklärt, dass die Wanderratte zu einer anderen Gattung (*Rattus*) gehört. Dennoch ist eine Übereinstimmung von über 93 Prozent immer noch sehr hoch. Die Lebenserwartung der Wanderratte in freier Wildbahn liegt bei weniger als einem Jahr, also deutlich unter der der Hausmaus. Auch hier zeigte sich wieder, dass trotz hoher genetischer Ähnlichkeit die Lebenserwartungen unterschiedlich sein können.

5.3 Der Nacktmull: Eine entscheidende und wissenschaftlich bedeutsame Ausnahme

Das überraschendste, faszinierendste und wissenschaftlich bedeutsamste Ergebnis unserer gesamten Untersuchung lieferte der Nacktmull (*Heterocephalus glaber*). Dieser ungewöhnliche Nager, der in unterirdischen Kolonien in Ostafrika lebt, hat in den letzten Jahrzehnten zunehmendes wissenschaftliches Interesse geweckt, da er für seine Körpergröße außergewöhnlich lange lebt und bemerkenswerte physiologische Besonderheiten aufweist.

Innerhalb der von uns untersuchten Nagetiere wies der Nacktmull mit nur 83,57 Prozent die geringste genetische Übereinstimmung zur Hausmaus im *nox3*-Gen auf. Dieser Wert liegt deutlich unter den Übereinstimmungen der anderen Nagetiere (98,27 Prozent, 95,53 Prozent und 93,38 Prozent) und zeigt, dass der Nacktmull evolutionär weiter von der Hausmaus entfernt ist, als die anderen untersuchten Arten. Dies entspricht auch den taxonomischen Klassifikationen: Während Hausmaus, Ryukyu-Maus und Sikkim-Maus alle zur Familie der Langschwanzmäuse (*Muridae*) und zur Unterfamilie der Altweltmäuse (*Murinae*) gehören, ist der Nacktmull die einzige Art der Familie Nacktmulle (*Heterocephalidae*).

Unsere Hypothese besagte, dass Spezies mit hoher *nox3*-Genübereinstimmung ähnliche Lebenserwartungen aufweisen sollten. Im Umkehrschluss bedeutet dies: Je geringer die genetische Übereinstimmung, desto unterschiedlicher soll-

ten die Lebenserwartungen sein. Da der Nacktmull die geringste Übereinstimmung zur Hausmaus innerhalb unserer Nagetiergruppe zeigte, hätten wir gemäß unserer Hypothese erwartet, dass seine Lebenserwartung sich von der der Hausmaus unterscheidet.

Tatsächlich beobachteten wir auch einen Unterschied – und zwar einen dramatischen. Jedoch war das Ausmaß und vor allem die Richtung dieses Unterschieds völlig unerwartet und ließ sich durch unsere Hypothese nicht erklären. Der Nacktmull erreicht eine Lebenserwartung von 20 bis 30 Jahren und lebt damit etwa zehnmal länger als die genetisch deutlich ähnlichere Hausmaus mit nur 2 bis 3 Jahren. Auch im Vergleich zur Ryukyu-Maus (98,27 Prozent Übereinstimmung, 2-3 Jahre) und zur Wanderratte (93,38 Prozent Übereinstimmung, weniger als 1 Jahr in freier Wildbahn) ist dieser Unterschied eklatant.

Um die Bedeutung dieses Befundes zu verdeutlichen: Bei einer Genübereinstimmung von immer noch 83,57 Prozent – was objektiv betrachtet eine sehr hohe genetische Ähnlichkeit darstellt – sollte der Unterschied in der Lebenserwartung nach unserer Hypothese moderat ausfallen. Die Differenz zwischen 98,27 Prozent (Ryukyu-Maus) und 83,57 Prozent (Nacktmull) beträgt lediglich etwa 15 Prozentpunkte. Zum Vergleich: Die Differenz zwischen Mensch und Schimpanse (99,04 Prozent) und Mensch und Hausmaus (81,47 Prozent) beträgt etwa 18 Prozentpunkte, und dort beobachteten wir einen Unterschied in der Lebenserwartung von etwa dem Dreifachen (80-85 Jahre versus 2-3 Jahre, wobei zu berücksichtigen ist, dass die menschliche Lebenserwartung kulturell und medizinisch beeinflusst ist). Beim Nacktmull sehen wir aber bei einer ähnlichen genetischen Distanz innerhalb der Nagetiere eine zehnfache Verlängerung der Lebenserwartung.

Noch bemerkenswerter ist die Tatsache, dass der Nacktmull nicht nur länger lebt als die genetisch ähnlichere Hausmaus, sondern sogar länger als viele genetisch viel näher mit dem Menschen verwandte Spezies aus unserem ersten Durchgang. Der Nacktmull übertrifft in seiner Lebenserwartung sowohl Hund (10-15 Jahre, 86,84 Prozent Übereinstimmung zum Menschen) als auch Katze (12-15 Jahre, 86,01 Prozent Übereinstimmung zum Menschen) und kommt sogar in den Bereich des Schimpansen (30-40 Jahre, 99,04 Prozent Übereinstimmung zum Men-

schen). Dieses Ergebnis steht in direktem und eindeutigen Widerspruch zu unserer Hypothese. Statt dass eine geringere genetische Übereinstimmung im nox3-Gen mit einer kürzeren oder nur moderat unterschiedlichen Lebenserwartung einhergeht, sehen wir hier die extremste Abweichung und gleichzeitig die längste Lebenserwartung aller untersuchten Nagetiere bei der Geringsten genetischen Ähnlichkeit.

Der Nacktmull beweist damit eindeutig, dass die Ähnlichkeit des nox3-Gens allein kein verlässlicher Indikator für die Lebenserwartung einer Spezies sein kann. Mehr noch: Er zeigt, dass Spezies mit relativ geringer Konservierung dieses spezifischen Gens dennoch außergewöhnlich effektive Mechanismen zur Verlangsamung des Alterungsprozesses entwickelt haben können.

5.4 Zusammenfassung und Synthese der Ergebnisse

Betrachten wir unsere Ergebnisse im Gesamtkontext, ergibt sich ein differenziertes Bild. Der erste Durchgang mit dem Menschen als Referenzspezies zeigte eine tendenzielle Korrelation zwischen nox3-Genähnlichkeit und Lebenserwartung: Je höher die genetische Übereinstimmung zum langlebigen Menschen, desto länger schien auch die Lebenserwartung der verglichenen Spezies zu sein. Dieses Muster ließ sich über verschiedene Säugetierfamilien hinweg beobachten und schien unsere Hypothese zunächst zu stützen.

Der zweite Durchgang innerhalb der Nagetiere zeichnete jedoch ein völlig anderes Bild. Hier brach das scheinbare Muster zusammen. Während die Ryukyu-Maus mit sehr hoher genetischer Ähnlichkeit zur Hausmaus auch eine ähnliche Lebenserwartung zeigte, passten weder die Sikkim-Maus noch die Wanderratte perfekt in das Muster. Der Nacktmull schließlich stellte eine so dramatische Ausnahme dar, dass er unsere Hypothese eindeutig widerlegte.

Die Gesamtheit unserer Daten legt nahe, dass andere genetische, physiologische oder biologische Faktoren eine wesentlich stärkere und direktere Rolle bei der Bestimmung der Lebensspanne spielen als die Sequenzähnlichkeit des nox3-Gens allein. Das nox3-Gen mag durchaus

Eine Rolle in bestimmten Alterungsprozessen spielen, wie die wissenschaftliche Literatur nahelegt, aber diese Rolle ist offensichtlich nicht so dominant oder direkt, dass sich anhand der Gensequenzähnlichkeit verlässliche Vorhersagen über die Lebenserwartung treffen ließen.

Der Nacktmull bleibt dabei das eindrucksvollste Beispiel dafür, dass die Natur komplexer ist als einfache genetische Korrelationen vermuten lassen. Seine außergewöhnliche Langlebigkeit muss auf anderen Mechanismen beruhen – möglicherweise auf einer Kombination von besonders effizienten DNA-Reparatursystemen, einzigartigen Stoffwechselanpassungen, verbesserter Protein-homöostase oder anderen noch nicht vollständig verstandenen biologischen Besonderheiten. Unsere Untersuchung zeigt damit die Grenzen eines einzelnen genetischen Markers auf und unterstreicht die Notwendigkeit umfassenderer, systembiologischer Ansätze in der Altersforschung.

6. Ergebnisdiskussion

Die Ergebnisse aus dem ersten Durchgang zeigten zunächst ein scheinbares Muster: Der Schimpanse mit 99 Prozent Übereinstimmung zum Menschen lebte deutlich länger als Hund und Katze mit etwa 86 Prozent, die wiederum länger lebten als Mäuse und Ratten mit etwa 81 bis 82 Prozent. Da der Mensch als Referenzspezies eine hohe Lebenserwartung hat, schien eine höhere genetische Übereinstimmung mit längerer Lebenserwartung einherzugehen.

Allerdings ist diese scheinbare Korrelation kritisch zu hinterfragen. Die beobachtete Tendenz könnte schlicht die phylogenetische Verwandtschaft widerspiegeln: Je näher zwei Spezies miteinander verwandt sind, desto ähnlicher ist ihr gesamtes Genom – einschließlich des nox3-Gens. Der Schimpanse ist unser nächster lebender Verwandter, daher sind seine Gene den unseren natürlicherweise am ähnlichsten. Die Korrelation zwischen Genähnlichkeit und Lebenserwartung könnte also ein Nebeneffekt der evolutionären Verwandtschaft sein statt ein kausaler Zusammenhang. Der zweite Durchgang mit den Nagetieren war entscheidend, um diese Frage zu klären.

Der Nacktmull widerlegte unsere Hypothese eindeutig. Obwohl seine nox3-Gensequenz mit

83,57 Prozent Übereinstimmung zur Hausmaus immer noch eine hohe genetische Ähnlichkeit aufweist, lebt er mit 20 bis 30 Jahren etwa zehnmal länger als die genetisch deutlich näheren Mausarten. Dies zeigt, dass Spezies trotz relativ geringer Unterschiede in der Konservierung des nox3-Gens außergewöhnlich effektive Mechanismen zur Verlangsamung des Alterungsprozesses entwickelt haben können. Unsere Ergebnisse legen nahe, dass andere genetische oder biochemische Mechanismen für die außergewöhnliche Langlebigkeit des Nacktmulls verantwortlich sein müssen.

Unsere Ergebnisse widersprechen nicht grundsätzlich der bestehenden Literatur über NADPH-Oxidasen und oxidativen Stress in Alterungsprozessen (Görlach & Krause, 2006). Sie zeigen lediglich, dass die bloße Sequenzähnlichkeit des nox3-Gens allein nicht ausreicht, um Lebenserwartungen vorherzusagen. Das nox3-Gen mag durchaus eine Rolle beim Altern spielen, diese Rolle wird aber durch viele andere Faktoren moduliert. Die wissenschaftliche Literatur konzentriert sich meist auf die Aktivität und Expression dieser Gene, nicht nur auf ihre Sequenz – was erklären könnte, warum unsere sequenzbasierte Analyse keine klare Korrelation ergab.

Bei der Bewertung unserer Ergebnisse müssen wir mehrere Einschränkungen berücksichtigen. Erstens haben wir nur einen einzelnen genetischen Marker untersucht. Das nox3-Gen ist nur eines von Tausenden Genen, die an Alterungsprozessen beteiligt sein könnten. Zweitens haben wir nur die Gensequenz verglichen, nicht aber die tatsächliche Expression oder Aktivität des nox3-Proteins. Zwei Spezies könnten sehr ähnliche Sequenzen haben, aber das Gen könnte unterschiedlich stark abgelesen werden oder das Protein unterschiedlich reguliert sein. Drittens sind die Lebenserwartungsangaben teilweise mit Unsicherheiten behaftet, insbesondere der Unterschied zwischen freier Wildbahn und Gefangenschaft.

Was bestimmt dann die Unterschiede in der Lebenserwartung zwischen verschiedenen Spezies? Die Altersforschung hat viele Mechanismen identifiziert: DNA-Reparaturmechanismen, Telomerlänge und Telomeraseaktivität (Telomere sind

schützende DNA-Abschnitte an Chromosomenenden, die sich bei jeder Zellteilung verkürzen; Telomerase kann sie verlängern), Proteinqualitätskontrolle und Autophagie, mitochondriale Funktion, Immunsystemfunktion sowie Stoffwechselrate. Wahrscheinlich ist es das Zusammenspiel all dieser Faktoren, das die Lebensspanne bestimmt. Der Nacktmull könnte besonders effektive DNA-Reparaturmechanismen oder außergewöhnlich gute Proteinhomöostase entwickelt haben.

Positiv war, dass wir mit BLAST eine etablierte, wissenschaftlich anerkannte Methode verwenden konnten und Zugang zu hochwertigen Gensequenzdaten hatten. Die technische Durchführung verlief reibungslos. Auch methodisch war unser zweistufiger Ansatz wertvoll – gerade der zweite Durchgang brachte das entscheidende Gegenbeispiel hervor.

Die größte Herausforderung bestand darin, verlässliche und vergleichbare Lebenserwartungsdaten zu finden. Für manche Spezies waren nur begrenzte Informationen verfügbar, und Angaben variieren je nach Quelle erheblich. Im Nachhinein hätten wir zusätzlich andere Gene aus der NOX-Familie oder andere mit Alterung assoziierte Gene untersuchen können. Auch eine Ausweitung auf mehr langlebige Spezies wie bestimmte Fledermausarten oder Grönlandwale wäre interessant gewesen.

Bei mehr Zeit würden wir mehrere Gene gleichzeitig untersuchen, funktionelle Analysen der Genexpression durchführen, systematisch weitere langlebige Spezies einbeziehen oder einen systembiologischen Ansatz verfolgen, der Genome, Genexpressionsmuster und Stoffwechselprofile integriert.

Obwohl unsere Hypothese widerlegt wurde, ist dieses Ergebnis wissenschaftlich wertvoll. Es zeigt, dass einfache genetische Marker allein nicht ausreichen, um komplexe Phänomene wie Alterung zu erklären. Dies unterstreicht die Notwendigkeit systembiologischer Ansätze. Unser Befund beim Nacktmull bestätigt, dass außergewöhnliche Langlebigkeit nicht durch die Konservierung einzelner Gene erklärt werden kann, sondern auf komplexen Anpassungen auf vielen Ebenen beruht. Trotz der verschiedenen Umstände, die unsere Vergleiche erschwerten, haben unsere Untersuchungen nicht nur uns, sondern auch unser Umfeld zum Nachdenken über dieses faszinierende Thema gebracht.

Und wer weiß? Vielleicht wird ja eines Tages in einer großen wissenschaftlichen Arbeit unsere Idee noch einmal unter besseren Umständen durchgeführt – mit umfangreicheren Ressourcen, größeren Datensätzen, einheitlichen Lebenserwartungsmessungen und der Möglichkeit, auch funktionelle Analysen einzubeziehen.

7. Fazit und Ausblick

Unsere zentrale Forschungsfrage lautete: Hat das nox3-Gen eine substantielle Rolle in unterschiedlichen Alterungsprozessen? Basierend auf unseren Ergebnissen lautet die Antwort: Das nox3-Gen allein ist kein verlässlicher Indikator für die Lebenserwartung einer Spezies.

Wir stellten die Hypothese auf, dass Spezies mit hoher nox3-Genübereinstimmung ähnliche Lebenserwartungen aufweisen. Diese Hypothese wurde durch unsere Daten eindeutig widerlegt, insbesondere durch den Nacktmull. Trotz der geringsten genetischen Übereinstimmung im nox3-Gen unter den untersuchten Nagetieren lebt er etwa zehnmal länger als die genetisch deutlich näheren Mausarten.

Haben wir unser Projektziel erreicht? Ja. Unser Ziel war es, systematisch zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen nox3-Genkonservierung und Lebenserwartung besteht.

Wir haben diese Frage mit sorgfältigen Analysen bearbeitet und sind zu einem klaren Ergebnis gekommen. In der Wissenschaft sind negative Ergebnisse genauso wertvoll wie positive.

Unser Projekt hat uns wichtige Einblicke in bioinformatische Forschungsmethoden gegeben und gezeigt, wie wertvoll öffentlich zugängliche Datenbanken sind. Wir haben gelernt, mit professionellen Tools wie BLAST zu arbeiten, Daten systematisch zu sammeln und kritisch zu interpretieren. Besonders wertvoll war die Erkenntnis, dass die Natur oft komplexer ist als einfache Hypothesen vermuten lassen.

Für zukünftige Untersuchungen ergeben sich mehrere vielversprechende Richtungen: die Untersuchung weiterer alterungsassoziierter Gene, funktionelle Analysen der Genexpression und Enzymaktivität, die Erweiterung auf weitere langlebige Spezies wie Fledermäuse oder Grönlandwale, oder ein systembiologischer Ansatz, der

multiple Datenebenen integriert. Abschließend können wir sagen: Wir haben gelernt, wie man komplexe biologische Fragestellungen systematisch untersucht, dass unerwartete Ergebnisse oft die lehrreichsten sind, und dass Evolution erstaunliche Lösungen für das Problem des Alterns gefunden hat. Der Nacktmull bleibt für uns ein faszinierendes Beispiel dafür, dass die Natur immer wieder Überraschungen bereithält, die einfache Erklärungsmodelle herausfordern.

8 Quellen- und Literaturverzeichnis

Wissenschaftliche Artikel

Banfi B, Molnár G, Maturana A, Steger K, Hegedűs B, Demaurex N, Krause K-H: "NOX3, a superoxide-generating NADPH oxidase of the inner ear" in Journal of Biological Chemistry, Band 279, Heft 44, 2004, S. 46065-46072

Görlach A, Krause K-H: "Aging: A revisited theory based on free radicals generated by NOX family NADPH oxidases" in Experimental Gerontology, Band 41, Heft 7, 2006, S. 713-718

Harman D: "Aging: A theory based on free radical and radiation chemistry" in Journal of Gerontology, Band 11, Heft 3, 1956, S. 298-300

Internetquellen/ nox3-Gensequenzen (NCBI GenBank)

National Center for Biotechnology Information (NCBI), Homo sapiens NADPH oxidase 3 (NOX3) mRNA Sequenz, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucore/NM_015718.3, zuletzt besucht am 23. Januar 2026

National Center for Biotechnology Information (NCBI), Pan troglodytes NADPH oxidase 3 (NOX3) mRNA Sequenz, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucore/XM_527546.5, zuletzt besucht am 23. Januar 2026

National Center for Biotechnology Information (NCBI), Canis lupus familiaris NADPH oxidase 3 (NOX3) mRNA Sequenz, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucore/NM_001101833.1, zuletzt besucht am 23. Januar 2026

National Center for Biotechnology Information (NCBI), Felis catus NADPH oxidase 3 (NOX3) mRNA Sequenz, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucore/XM_023254521.2, zuletzt besucht am 23. Januar 2026

National Center for Biotechnology Information (NCBI), Mus musculus NADPH oxidase 3 (NOX3) mRNA Sequenz, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucore/NM_198958.2, zuletzt besucht am 22. Januar 2026

National Center for Biotechnology Information (NCBI), Mus caroli NADPH oxidase 3 (NOX3) mRNA Sequenz, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucore/XM_021149518.1, zuletzt besucht am 23. Januar 2026

National Center for Biotechnology Information (NCBI), Mus pahari NADPH oxidase 3 (NOX3) mRNA Sequenz, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucore/XM_021221497.1, zuletzt besucht am 23. Januar 2026

National Center for Biotechnology Information (NCBI), Rattus norvegicus NADPH oxidase 3 (NOX3) mRNA Sequenz, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucore/NM_001004216.1, zuletzt besucht am 23. Januar 2026

National Center for Biotechnology Information (NCBI), Heterocephalus glaber NADPH oxidase 3 (NOX3) mRNA Sequenz, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucore/XM_021237957.1, zuletzt besucht am 24. Januar 2026

Internetquellen (Werkzeuge und Datenbanken)

National Center for Biotechnology Information (NCBI), BLAST (Basic Local Alignment Search Tool), <https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>, besucht im Dezember 2025 - Januar 2026

National Center for Biotechnology Information (NCBI), GenBank Datenbank für mRNA-Sequenzen, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>, besucht im Dezember 2025 - Januar 2026

Internetquellen (Hintergrundinformationen)

PubMed Central, The Role of NADPH Oxidases and Oxidative Stress in Neurodegenerative Disorders, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6321244/>, zuletzt besucht am 23.01.2026

PubMed Central, NADPH oxidases: Pathophysiology and therapeutic potential in age-associated pulmonary fibrosis, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7251244/>, zuletzt besucht am 23.01.2026

PubMed Central, NADPH oxidases: key modulators in aging and age-related cardiovascular dis-eases?, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4818578/>, zuletzt besucht am 23.01.2026

9. Anhang

Hier unsere Arbeitsnotizen:

Die Gensequenzen der verschiedenen Lebewesen:

Homo sapiens NADPH oxidase 3 (NOX3), mRNA -> nox3 gen von dem Mensch (80-85 Jahre median Lebenserwartung)

```

1  gagaagaaat  ttctgacag  ccgaagagca  acaagtatca  tgatggggtg  ctggattttg
61  aatgagggtc  tctcccatat  attagtactc  tcatggctgg  gaataaattt  ttatctgttt
121 attgacacgt  tctactggta  tgaagaggag  gagtctttcc  attacacacg  agttattttg
181 ggttcaacac  tggcttgggc  acgagcatcc  gcactgtgcc  tgaattttaa  ctgcatgcta
241 attctaatac  ctgtcagtcg  aaaccttatt  tcattcataa  gaggaacaag  tatttgctgc
301 agaggaccgt  ggaggaggca  attagacaaa  aacctcagat  ttacaaaact  ggctgcctat
361 gggatagctg  ttaatgcaac  catccacatc  gtggcgcttt  tcttaacct  ggaacgctac
421 cactggagcc  agtccgagga  ggcccaggga  cttctggccg  cactttccaa  gctgggcaac
481 acccctaacg  agagctacct  caacctgtc  cggaccttcc  ccacaaacac  aaccactgaa
541 ttgctaagga  caatagcagg  cgtcaccggt  ctggtgatct  ctctggcttt  agtcttgatc
601 atgacctcgt  caactgagtt  catcagacag  gcctcctatg  agttgttctg  gtacacacac
661 catgttttca  tcgtcttctt  tctcagcctg  gccatccatg  ggacgggtcg  gattgttcca
721 ggccaaaccc  aagacagtct  ctctctgcac  aacatcacct  tctgtagaga  ccgctatgca
781 gaatggcaga  cagtggccca  atgccccgtg  cctcaatttt  ctggcaagga  accctcggtc
841 tggaaatgga  ttttaggccc  tgtggtcttg  tatgcatgtg  aaagaataat  taggttctgg
901 cgatttcaac  aagaagttgt  cattaccaag  gtggaagcc  acccctctgg  agtctctgaa
961 cttcacatga  aaaagcgtgg  ctttaaatg  gcgccagggc  agtacatctt  ggtgcagtgc
1021 ccagccatat  cttcgctgga  gtggcacccc  ttaccctta  cctctgcccc  ccaggaggac
1081 ttttcagcg  tgcacatccg  ggcagcagga  gactggacag  cagcgtact  ggaggcctt
1141 ggggcagagg  gacaggccct  ccaggagccc  tggagcctgc  caaggctggc  agtggacggg
1201 ccctttggaa  ctgccctgac  agatgtattt  cactaccag  tgtgtgtgtg  cgttgccgcg
1261 gggatcggag  tcactccctt  cgctgctctt  ctgaaatcta  tatggtacaa  atgcagttag

```

1321 gcacagaccc cactgaagct gagcaagtg tattttact ggatttgccg ggatgcaaga
 1381 gcttttgagt ggtttgctga tctttactc tcctggaaa cacggatgag tgagcagggg
 1441 aaaactcact ttctgagta tcatatattt cttaccggct gggatgaaaa tcaggctctt
 1501 cacatagctt tacactggga cgaaaatact gacgtgatta caggcttaaa gcagaagacc
 1561 ttctatggga ggcccaactg gaacaatgag ttcaagcaga ttgcctacaa tcacccagc
 1621 agcagtattg gcgtgttctt ctgtggacct aaagctctct cgaggacact tcaaaagatg
 1681 tgccacttgt attcatcagc tgacccaga ggtgttcatt tctattacaa caaggagagc
 1741 ttctagactt tggaggtaa gtccaggcat tgtgttttca atcaagttat tgattccaaa
 1801 gaactccacc aggaattcct gtgacggcct gttgatatga gctcccagtt gggaactggt
 1861 gaataataat taactattgt gaacagtaca ctataccata cttccttagc ttataataa
 1921 catgtcatat acaacagaac aaaaacattt actgaaatta aaatatatta tgtttctcaa

*PREDICTED: Pan troglodytes NADPH oxidase 3 (NOX3), mRNA -> nox3 gen von dem gemeinen Schimpansen
 (30-40 Jahre median Lebenserwartung)*

1 gagaagaaat ttgtgacag ccgaagagca acaagtatca tgatggggtg ctggatttg
 61 aatgagggtc tctccaccat attagtactc tcatggctgg gaataaattt ttatctgttt
 121 attgacacgt tctactggta tgaagaggag gagtctttcc attacacacg agttattttg
 181 ggttaacac tggcttgggc acgagcgctc gactgtgcc tgaattttaa ctgcatgcta
 241 attctaatac ctgtcagtcg aaaccttatt tcattcataa gaggaacaag tatttgctgt
 301 ggaggaccgt ggaggaggca attagacaaa aacctcagat ttcacaaact ggtcgcctat
 361 gggatagctg ttaatgcaac catccacatc gtggcgcat tcttaacct ggaacgctac
 421 cactggagcc agtccgagga ggcccaggga cttctggccg cactttcaa gctgggcaac
 481 accctaacg agagctacct caacctgtt cggaccttc ccacaacac aacctgaa
 541 ttgctaagga caatagcggg cgtcaccggt ctggtgatct ctctggcttt agtcttgatc
 601 atgacctgt caaccgagtt catcagacag gcctcctatg agttgttctg gtacacacac
 661 catgttttca tcgtttctt tctcagcctg gccatccatg ggacgggtcg gattgttca
 721 ggccaaaccc aagacagtct ctctctgcac aacatcacct gctgtagaga ccgctatgca
 781 gaatggcaga cagtggccca atgccccgtg cctcaatttt ctggcaagga accctcggt

841 tggaaatgga ttttagggccc tgtggtcttg tatgcatgtg aaagaataat taggttctgg
901 cgatttcaac aagaagttgt cattaccaag gtggaagcc acccctctgg agtcctggaa
961 cttcacatga aaaagcgtgg ctttaaatg gcgccagggc agtacatctt ggtgcagtgc
1021 ccagccatat cttcgtgga gtggcacccc ttcaccctta cctctgcccc ccaggaagac
1081 ttttcagcg tgcacatccg ggcagcagga gactggacgg cagcgctact ggaggccttt
1141 ggggcagagg gacaggccct ccaggagccc cagagcctgc caaggctggc agtggacggg
1201 ccctttggaa ctgccctgac ggatgtattt cactaccag tgtgtgtgtg cgttgccg
1261 gggatcggag tcactccctt cgctgctctt ctgaaatcta tgtgttaca atgcagtga
1321 gcacagaccc cgctgaagct gagcaagtg tatttctact ggatttgccg ggatgcaaga
1381 gcttttgagt ggttgctga tctctactc tcactggaaa cacggatgag ttagcagggg
1441 aaaactcact ttctgagta tcatatattt cttaccggct gggatgaaaa tcaggctttt
1501 cacatagctt tacactggga cgaataact gacgtgatta caggcttaaa gcagaagacc
1561 ttctatggga ggcccaactg gaacaatgag ttcaagcaga ttgcctaca tcacccagc
1621 agcagtattg gcgtgttctt ctgtggacct aaagctctct cgaggacact tcaaaagatg
1681 tgccgcttgt attcatcagc tgacccca ggtgttcatt tctattaca caaggagagc
1741 ttctagactt tggaggta gtcaggcat tgtgttttca atcaagtat tgattccaaa
1801 gaactccacc aggaattcct gtgacggcct gttgatga gctcccagtt gggaactggt
1861 gaataataat taactattgt aaacagtaca ctataccata cttccttagc ttataataa
1921 catgtcatat acaacagaac aaaaacattt actgaaatta aaatatatta tgtttctaa
1981 aggccttcta tcttttgga ctgtcattt gccataaaag agaattaaat tgatctgaca
2041 tgatatgttt tgacaaaggc agcctcttaa gctctttaa gtattttaa attataaatt
2101 gatcacttct ttttcttat cctcagattc ttatgtgac ctgatgatt ctatgatg
2161 attgatttta taagttagga atattccatt catgtctaaa aaaattatct ctactatct
2221 tgcatggaa tttctcagta actgagga ttgcttaag catataattc aaactctact
2281 aatttgaata gaaccagtct ttctgtgaa tcattcccc atttaagttt aattcaggct
2341 tgcaaccag aaatgtctat agttaaatct aatcttact ttagcaggat attaaatga
2401 ttaaaatttt ttctcttggt catgttaat tattactttt ctttctgt ctactgaaa
2461 ataaaagtac ttttgatca tctaa

Canis lupus familiaris NADPH oxidase 3 (NOX3), mRNA -> nox3 gen von dem Grauwolf (10 – 12 Jahre median Lebenserwartung -> Freibahn)

```

1 atgatggggt gctggattt gaatgaaagt ctctctgtca tattagtact ctcattggctg
61 ggagtcaatt tatatctgtt tattgacacc ttctgttggt atgaagagga ggagtctttc
121 ctttacacac gagttattct gggttcaacg ctggcttggg cgcgagcatc tgcagtatgc
181 ctgaatttta actgtatgct aattctatta ccaatcagtc gaaaccttat ttcattcatg
241 agaggggacaa gtacctgctg cagaggactg tggaggagac agttagacaa aaatctcaaa
301 ttccacaaac tggtcgccta tgggatagcc gttaatgcaa ccatccacat cgtggcacat
361 ttgtgcaacc tgcagcgta cactggagc cagtcagctg aagtacaggg cttccggct
421 acactttcca aacttgcaa tgcacaaat gagagctacc tcaacccat ccggaccttc
481 cacacaaaca ccattactga attgctaaca acaatcgagg gtgttactgg cctgatcatc
541 tctctggctt tagtcttgat catgacctt tccaccgagt ccatcagaca ggtctcatat
601 gagttgttct ggtacacaca ccatgtgtt atcatcttct ttattgttct ggctatccat
661 ggggccggtc ggattgttcg aggccaaact cctgagagtc agctgctgca caacgtcacc
721 ttctgtagag accaccatgc tcaatggcag aagatggccc agtgcacccat gcctcaattt
781 tctggcaagg agccttcggc ttggaatgg gtttaggcc ctgtgttctt atatgcgtgt
841 gaaagaataa ttaggtttg gcggtttcaa caagaagttg tcattaccaa ggtggtgagc
901 catccgtctg gaggttctaga acttcacatg aaaaagcgga actttaaact ggcaccgggg
961 caatacatcc tggtagctg cccatccata tcgtggctgg aatggcacc cttcacctc
1021 acctccgcc ctcaggaaga cttctcagt ttgcacatcc gggtagccgg ggactggaca
1081 gaagctttat ggaaggcctt tgggtcagag ggacaagccc tgaaggaacc ctggagcctg
1141 ccaaggctgg ccgtggacgg gccatttga accaccctga cggacgtatt tcactatcca
1201 gtgagcgtgt gcatcgctgc aggaataggg gtcactccct tcgcctctct tctgaaatcc
1261 atatgttaca aatgtgagtc acaaaccag ctgaagctga gcaagtgta ttttactgg
1321 atttgccg atccaaaggc tttgagtgg ttgtctgac tcttactctc actggaaca
1381 cttatgagtg agcgagggaa agctcattt ctgagctatc atatattct caccagctgg
1441 gatgaaaatc aggtgttca cattgctta cattgggatg aaaatactga tgtgtcacg
1501 gggttaaagc agaaaacatt ctatggaaga cccaactgga gcaatgagtt ccggcagctg
1561 gcctatgctc accccagcag cagcattggc gtgttttct gtggaccaa agctctctcc
1621 aagacacttc aaaggatgtg ccacttata tcctcagccg acccccgggg cgtccatttt
1681 tattacaaca aagaagctt ctg

```

PREDICTED: Felis catus NADPH oxidase 3 (NOX3), mRNA -> nox3 gen von der Hauskatze (12-15 Jahre median Lebenserwartung)

```

1 atggcgttct ggattttgaa tgaaagtctc tccatcctat taggactctc gtggctggga
61 gtgaatttat atctgtttat cgacacattc tcttggtatg aagaggaaga gtccttcctt
121 tacacacgag ttattctggg ctcaacactg gcctgggcgc gagcgtctgc agtgtgcctc
181 aattttaact gcatgctaata tctcttaccg atcagtcgaa accttatttc attcatgaga
241 gggacaagta cttgctgcag aggaccgtgg aggaggcaat tagacaaaaa cctcaaattc
301 cacaaactgg tcgcctatgg gatagccatt aacgcaacca tccacatcgt ggcacatttg
361 tgcaacctgg agcactatcg ctggagccag tccacggaag cggaggggact tctggccgca
421 cttgccaagc ttggcaaaac cccaaatgag agctacctca accccatccg gaccttcac
481 acaaacacca tcaccgtgtt gctgacgaca actgctgggtg tcaactggcct gatcatctct
541 ctggctttca tcttgatcat gacctcttcc accgagttca tcagacaggt ctctatgag
601 ctgttctggt acacacacca tgtgttcac atcttcttta tcagtctggc tatccatggg
661 gcaggtcgga ttgttcgagg ccaaactccc gagagtcaac tgctccaca cgtcaccttc
721 tgcaaagacc actacgctca gtggcagacc gctgcccagt gcccacgcc tcaattttc
781 ggcaaggagc cttcggttg gaaatgggtc ttaggccctg tggcttata tacgtgtgaa
841 agaataatta ggttctggcg gtttcgaca gaagttgtca ttaccaaggt ggtgagccac
901 ccatctggag ttctagaact tcacatgaaa aagcgaaact taaaatggc gccggggcaa
961 tacgtcttga tacagtgcc gtccatcgc ttgctggaat ggcacccctt caccctcacg
1021 tcggcccctc aggagaactt cttcagtgtg cacatccggg tagcaggaga ctggacgaa
1081 gctctgtgta aggcctttgg ggcaggagga caggccgga aggagtcctg gagcttgcca
1141 aggctggcgg tggacgggcc gtttgaacc gcactgacgg acgtgttca ctaccagtg
1201 agcgtgtgcg ttgctgcagg aataggggtg actcccttcg cctctctct gaaatccata
1261 tggtagagat gtgagtcgca caccagctg aagctgagca aggtgtattt ttactggatt
1321 tgccgggata caagggttt tgaatggtt gctgatctct tactctcgt ggaacactc
1381 atgagtgagc gagggaaagc tcactttctg agttatcata ttttcttac caactgggat
1441 gaaaatcagg ctgttcacat agctttacat tgggatgcaa atactgatgt gatcacgggg
1501 ttaaagcaga aaacgttcta tgaagacct gactggaacc acgagttccg gcagttggcc
1561 tacaccatc ccagcagca catcggcgtg ttctctgtg gaccaaggc tctctcaag
1621 acgttcaaa ggatgtgccg ctgtattcc tcagccgacc ccaggggggt ccattttat
1681 taccacaaag aaagcttcta gacttcggag aaaaaattcc gtgtattaca tacgtggcta

```

1741 caatcacata ggtcagcgct cgggaaatgt ttctgtaaa gggctgtata gtaattatt
 1801 tagattctac agaccatag atctcagtaa caactactct actctgcat tcgaatgcat
 1861 caaaatagcc acaaacagta cgtcaaggta tgggcatggc tgtgtccaa taaaacttta
 1921 ttgtgggca ttgaagtaga atttatgta agtccctttt gtcattggaac cttcttttga
 1981 ttgtttcta atgattaaa aatgtaaaag tcattcttag ctcattgggct gtcccaaatt
 2041 cagatgatgt tccaggtttg gcccacaggt ggtaagtttg ctgacccct gatagacatc
 2101 attgttctca aactgtttt catgttcagc agtgcacca atatggagac tgataggct
 2161 gcctggctca gactctctt tagaagttgt tcatatttc tgcaccctg atggcagaga
 2221 catctgcctt gtatccaaac gtgatctttt ctgcttaac ttaagcttct ttgtgcttc
 2281 tttcatctt ctatagacct gagaaatcac caatgggggt tacctttcac gaaaaccctt
 2341 tatatgttga aagtataaa atcatctctt acctatcct ttttagtcc aaacaatact
 2401 aaattcttaa ctttcagcc taggatata atctagtcc ttcaatcatt ctgtgctct
 2461 tctcaaac tggttcatt cttcacatc ctttaaaat gtgttccta aatgagaca
 2521 taatattcta atagatacat gactagtatt ggggggaaaa gtgattttt tagatctcat
 2581 gtgcatgct tttcaataca actaaattct atattgcct ctcttcctt cttccatat
 2641 ttcttctga ttctcttta atccagactt tcatgcgga ttctctctt aatgtggact
 2701 tttttttt ttctcttt ttcttttt ttgtaagta agctctacac ccaacctggg
 2761 gcttgaactc acaacctga gatcaagagt cacatgctct accaactgag ccagtcaggg
 2821 gcccctactg tcacatttg atctatgac atcttgacac ttaagccca actcaactc
 2881 tgccccaca atatactgg aatttctt taattgata ctccactga ggcaatctat
 2941 tttatcatg cagtatttc cccccaaaa tgttccaaa gtattccca catcttacg
 3001 ttttcttag tagtattgat taaacttta gaattttct aacattcaa gattgtttg
 3061 aagttcagcc ccagataata atactagtat ttagcttcat gatatccca aatttaatta
 3121 gcaaaatctc aaatctttg tttagttt caaccaaatt attgaatcca agaactcca
 3181 ccatgaattc ttgcaactac ctgataat gagttccag ttgggaagag gtaaatgata
 3241 actagccatt gagaattgta cagcacacca tactcttta gttataatt aacatgcat
 3301 acacaacaga aaaaaacat ttctgaagt taaaattaca tttacaaat gctcttatc
 3361 ttgtagacc gtcattctgc caaaaagag gattaaattg gtctgacatg attgtttt
 3421 acaaagtaa gcaaccagt aagctcttc agagattct aaattataa ttgatcatt
 3481 ctttaactt atcctcagat actgactctg attctatgat tttagggcc tatttaata
 3541 tacactccag gaaaaaggt ggatatatt cctgatgtct caaaaattat ttctactgcc

3601 tctgaattgg aatttcttag tatctttaag tatcagttga tagatatcac tcaaactcta
 3661 ctaattttaa tatgtgcagt atttctgtgt gtttatttct ccattaagtt tgattcagtc
 3721 tttaacaaca gaactttctg caatgtatat atctaattct tagcaggaaa attaaatgta
 3781 ttaaaagatt tttcttggtt gtattcaatt attagtttt

Mus musculus NADPH oxidase 3 (Nox3), mRNA -> nox3 gen von der Hausmaus (3 – 18 Monate Wildbahn/ 2-3 Jahre Haustier median Lebenserwartung)

1 atgcaacgca caggctcaaa tggacggaaa ggaataacgt gttggagtaa gagaagtgct
 61 atgccggtgt gctggattct gaacgagagt gggctcctcg tgggtgctct cttatggctg
 121 gcagtaaacg cctatctgtt tattgacaca ttcttctggt atactgaaga ggaggctttc
 181 tttatacac gagttattct gggttccgca ttggcatggg cccgggcatc tgccgtgtgc
 241 ctgaatttta actgcatgct aattctgtta cctgtcagtc ggaacttcat ttcactgggtg
 301 agaggaacaa gtgtgtgctg tagaggacca tggagaagac aactagacaa aaacctcaac
 361 ttccacaaac tcgtgccta cgggatagct gtcaattcag ttatccacat tgggacacac
 421 ttgttcaacc tggagcgta tcacctgggt caggccaagg atgctgaagg gctgctggct
 481 gcactttcca aactggcga tgccccaat gagagctacc tcaatccagt ccgcaccttt
 541 gatatgggca caacctga gctattgatg acagtgtcag gaattactgg cctgggtatc
 601 tctctggctc tggcttctat catgacctct tcaaccgaat tcatcagaag gtcctcttat
 661 gagctcttct ggtacacaca ccatacttt gtcttcttct tcatcagtct ggccatccac
 721 ggaggaggtc gcatcattcg aggccaaact ccagagagtc tccggctgca caatgtcacg
 781 tactgcagag accactatgc tgaatggcag gcagctgcct tatgccctgt acctcaattt
 841 tctggcaagg aaccttcggc ctggaaatgg gctttgggtc ctgtggtctt gtatgcgtgt
 901 gaaagaataa ttaggttctg gagatctcac caagaagttg tcattacca ggtggtgagt
 961 caccatctg cagtctgga acttcacatg aagaagcgag acttcaagat ggcacctgga
 1021 cagtacatct tcatccagtg cccatctgtc tccccctgg agtggcacc cttcactctc
 1081 acctccgctc cccaggagga cttcttcagt gtacacatca gacctcagg agactggaca
 1141 gaggcgttat tgaaggcctt tagagtagag ggacaggctc ccagttagct ctgtagcatg
 1201 ccgaggctag cagtggatgg gccctttgga ggctctctgg cagatgtatt tcactacccc
 1261 gtgagcgtgt gcattgcaac gggaattgga gtcactccct tcgcctctct tctgaagtct
 1321 gtgtgtgata agtgtgtga atcacagagc ctgcctgagc tgagcaaggt gtacttctat

1381 tggatctgcc gggatgccgg agcatttgag tggtttgctg atctgttact gtcactggaa
 1441 acacggatga gtgaacaagg gaaggctcat ttactgagct accatatata tctcactggc
 1501 tgggatgaaa accaggcaat tcacatagct ttactctggg atgaaagtct ggatgtgata
 1561 acaggcttaa agcagaaggc tttctatggg cgacccaact ggaacgacga attcaagcag
 1621 attgcctaca atcacccag cagcagcatt ggcgtgttct tctgtggatc caaagccatg
 1681 tcaaagactc ttcaaaagat gtgtcgttg tactcatctg tggatccgag gggcgttcat
 1741 ttctattaca acaaggaaaa cttctagatg ttgggggtac agtcaatgca ct

*PREDICTED: Mus pahari NADPH oxidase 3 (Nox3), mRNA -> nox3 gen von der Sikkim-Maus (keine genauen
 angaben zur Lebenserwartung gefunden -> geschätzt wenige Monate in freier Wildbahn)*

1 gcagcacaca ggctcagatg aaaggaaagg aataacgtgt tgggtgtaag agaagtgcc
 61 tgcggctgtg ctggactttg aacgagggtg gctccttcgc ggttgccctc tcattggctgg
 121 cagtaaacac ctatctgttt attgacacat tcttctggta cactgaagag gaggctttct
 181 ttatacacg agttattctg ggttcacat tggcatgggc ccgggcatct gccgtgtgcc
 241 tgaattttaa ctgcatgcta attctgttac ctgtcagtcg gaacttcatt tcgctgggtga
 301 gaggaacaag tgtgtgctgt agaggacat ggagaagaca actggacaaa aacctccact
 361 tccacaaact cattgcctac gggatagctg tcaattcagt tatccacatt gtggcacact
 421 tgttaacct ggagtattat cacctgggtc aggccaagga tgctgaaggg ctgctggctg
 481 cactttcaa acttggtgat gcccctaatg agagctacct caatccagtc cgcacctctg
 541 atacgggcac aacctagag ctattaatga cagtctcggg aattactggc ctggggatct
 601 ctctggctct ggtcttgatc atgacctctt caactgagtt catcagaagg acctcttatg
 661 agctctctg gtacacacac catatcttcg tcttcttctt catcagtctg gccatccacg
 721 gaggaggtcg catcattcga ggccaaactc cagagagtct ccggctgcac aatgtcacgt
 781 tctgcagaga ccactatgct gaatggcagg cagctgcctt atgccctgta cctcagttt
 841 ctggcaagga accttcggcc tggaatggg gtttgggcc tgtggtcttg tatgcgtgtg
 901 aaagaataat taggttctgg agatctcacc aagaagttgt cattaccaag gtggtgagtc
 961 acccatctgc agtcttgga attcacatga agaagcgaga cttaaatg gtgcccggac
 1021 agtacatctt catccagtgc ccactgtct cggcctgga gtggcacctt ttactctta
 1081 cctctgctcc ccaggaggac ttcttcagt tacacatccg agcctcggga gactggacag
 1141 aggcattatt gaaggccttt ggggcagagg gacaggctcc cagtgcgtc ttagcatgc

1201 cgaggctcgc agtggatggg ccctttggag gctctctggc agatgtattt cactaccctg
 1261 tgagcatgtg cattgcaacg ggaattggag tcactccctt cgctctctt ctgaagtctg
 1321 tgtggtataa atgttgtgaa tcacagagcc tgcctcagct gagcaagggt tacttctact
 1381 ggatctgccg ggatgccgga gcatttgagt ggtttgctga tctgttgctt tcaactgaaa
 1441 cacggatgag tgagcaaggg aaggctcatt tgctgagcta ccatatata ctcactggct
 1501 gggatgagaa ccaggcaatt cacatagctt tacactggga tgaaagtctg gatgtgataa
 1561 caggtttaa gcagaagacg ttctatgggc gacccaactg gaatgatgaa ttcaagcaga
 1621 ttgctacaa tcacccagct agcagcattg gcgtattctt ctgtggatcc aaagccatgt
 1681 caaagactct taaaagatg tgcgtttgt actcatctgc ggatccgagg ggcgttcatt
 1741 tctattacaa caaggaaaac ttctagatga tggaggtaca gtcgatgcac t

*PREDICTED: Mus caroli NADPH oxidase 3 (Nox3), mRNA -> nox3 gen von der Ryukyu-Maus oder Reisfeldmaus
 (2-3 Jahre median Lebenserwartung bei idealen Lebensbedingungen)*

1 gcaacacaca ggctcaaatg aacgaaaagg aataacgtgt tggtagtaag agaagtgtca
 61 tgccggtgtg ctggattttg aacgagagtg ggtccttctg ggtgctctc tcatggctgg
 121 cagtaaagcg ctatctgttt attgacacat tcttctggta tactgaagag gaggctttct
 181 ttatacacg agttattctg ggtccacat tggcatgggc ccgggcatct gccgtgtgcc
 241 tgaattttaa ctgcatgcta attctgttac ctgtcagtcg gaacttcatt tcaactggtga
 301 gaggaacaag tgtgtgctgt agaggaccat ggagaagaca actagacaaa aacctcaact
 361 tccacaaact cgttcctac gggatagctg tcaattcagt tatccacatt gtggcacact
 421 tgttcaacct ggagcgttat cacctgggtc aggccaagga tgctgaaggg ctgctggctg
 481 cactttcaa acttggtgat gcccaaag agagctacct caatccagtc cgcacctttt
 541 atatgggcac aactactgag ctattgatga cagtgtcagg aattactggc ctgggtatct
 601 ctctggctct ggtcttcac atgacctctt caactgaatt catcagaagg tcctcttatg
 661 agctctctg gtacacacac catatctttg tcttctctt catcagtcg gccatccacg
 721 gaggaggtcg catcgttcga ggccaaactc cagagagtct ccggctgcac aatgtcacgt
 781 tctgcagaga ccactatgct gaatggcagg cagtgcctt atgccctgta cctcaatttt
 841 ctggcaagga accttcggcc tggaaatggg ctttgggtcc tgtgtcttg tatgcgtgtg
 901 aaagaataat taggttctgg agatctcacc aagaagttgt cattaccaag gtggtgagtc
 961 acccatctgc agtcttgga cttcacatga agaagcgaga cttaagatg gcacccggac

1021 agtacatctt catccagtgt ccatctgtct cccccctgga gtggcacccc ttcactctca
 1081 cctccgctcc ccaggaggac ttcttcagtg tacacatccg agcctcagga gactggacag
 1141 aggcgttatt aaaggccttt ggagcagagg gacaggctcc cagttagctc ttagcatgc
 1201 cgaggctagc agtggatggg ccctttggag gctctctggc agatgtattt cactaccccg
 1261 tgagtgtgtg cattgcaacg ggaattggag tcaactccct cgcctctctt ctgaagtctg
 1321 tgtggtataa gtgtgtgaa tcacagagcc tgcctgagct gagcaaggta tacttctatt
 1381 ggatctgccg ggatgccaga gcatttgagt ggtttgctga tctgttactt tcaactggaa
 1441 cacggatgag tgaacaaggg aaggctcatt tactgagcta ccatatata ctcactggct
 1501 gggatgaaaa ccaggcaatt cacatagctt tacactggga tgaaagtcta gatgtggtaa
 1561 caggcttaaa gcagaagact ttctatgggc gaccaactg gaacgatgaa ttcaagcaga
 1621 ttgctacaa tcacccagc agcagcattg gcgtgttctt ctgtggatct gaagccatgt
 1681 caaagactct tcaaaagatg tgcgtttgt actcatctgt ggatccaagg ggcgttcatt
 1741 tctattacaa caaggaaaac ttctagatgt tggaggtaca gtcaatgcac t

PREDICTED: Heterocephalus glaber NADPH oxidase 3 (Nox3), mRNA -> nox3 gen von dem Nacktmull (20->30

Jahre median Lebenserwartung)

1 atgtctgggt ttgcctgggg actttgccag aaagaaggct atcacctggt acagcccctt
 61 gaccttgac ctccagaatt gggaacaaa ctctcatggc ttggagtga tttgtctctg
 121 ttcatagaca cattccgttg gtatgaagag gaggagtctt tcttttatac acgagttatt
 181 ctgggttcaa ctctggcatg ggcacgagca tctgcactgt gcctgaattt taactgcatg
 241 ctaattctgt tacctgtcag tcggaaccta atctcatttg taagaggaa aagtacatgc
 301 tgtaaggagc cctggagcag gcaattagac aaaaatctca aattccacaa gctggttgcc
 361 tgtgggatag ctgttaatgc aacaatccac actgtggcac atttgttcaa tatggagcac
 421 ttccacttaa gccagtcaga ggatgccag ggacttgtgg ctgcactttc caaactggc
 481 aacaccccca atgagagtta cctcaaccct gtccgaacct tccacatgaa cacaatcact
 541 gagctgctaa cgacaatagc aggctttact ggctttgtga tctctctggc ttgatcttg
 601 atcatgactt ctgcagaca gttcatcaga cagtcctctt atgagctgtt ctggtataca
 661 caccatgttt tcatcatctt ctttatcagt ctggctatcc atggggcagg tcagatcatt
 721 cgaggccaaa ctccagagag tctcctgcta cacaatgtca ccctctgcag agacttctat
 781 gttgaatggc aggcggctgg cccatgccct gtgcctcaat tttctggcaa ggaaccttcg

841 gcttggaat ggttttggg ccctgtggtc gtgtatgcat gtgaagaat aattaggttc
 901 tggcgatttc aacaagaagt tgtcattacc aaggtggtta gtcacccatc tacagtctg
 961 gaacttcaca tgaaaaagcg tgacttcaag atggcaccgg ggcaatacat cctcctccag
 1021 tgcccagcca tctcaccact ggaatggcac ccattcacc tcacttctgc acccaggag
 1081 gacttcttca gtgtgcacat tcgggcagca ggagactgga cagaggcttt atttaaagcc
 1141 ttggagcag aaggacaagt cctccagggt ccctgcagcc tgccaaggct ggcagtggat
 1201 ggccatttg gggccactct gacagatgtg ttccactatc ccgtgagtgt gtgcattgca
 1261 gcagggttg gtagtactcc cttgcctca ctttgaaat ctatatgga taaatgcagt
 1321 gagtaccga gccagctgaa gctgagcaag gtgtattct actggatttg ccgggatgca
 1381 caggcatttg agtggttgc caaccttta gtctactgg aaacacagat gagtgagcga
 1441 gggaatgcgc actttctgag ttatcatata ttcttactg gctgggatga aaatcaggct
 1501 attcacatag cttacattg ggatgaaaac acagatgtga ttactggctt aaagcagaaa
 1561 accttttatg gacgacccaa ctggaacact gagtcaagg agatagccta caatcacct
 1621 agcagcagca ttggtgtgtt cttctgtgga cccaaggccc tgtcaaagac acttcaaag
 1681 atgtgccact tatattcatc agctgatccc cagggtgttc attttgta caacaatgaa
 1741 agcttctaga tgttgaggt aaaatgcac cattatgtag gtggagcaat catataggct
 1801 aagggtgaaga aaactttcc ccaaatagta atcaattgag gttttgtgga ttatacagtc
 1861 tcaatctcaa ttctcaact ctgccaattt aaggtgcca ggtagccaca tgaatgaaca
 1921 ggcttggttg aattccaata aaactttatt tgtgaacatt gaatgggaat tcatataat
 1981 tttatgtca tgaaa

Rattus norvegicus NADPH oxidase 3 (Nox3), mRNA -> nox3 gen von der Wanderratte (<1 Jahr median Lebenserwartung in freier Wildbahn)

1 atgccgacgt gctggatttt gaacgagagt gtgtccttcg tgggtgctct cttgtggctg
 61 gcaataaata tctatctgtt tattgacacg ttctgctggt atgctgaaga ggagtctttc
 121 tttatacac gagtattctt gggttccgca ttggcatggg cccgggcacg tgccgtgtgc
 181 ctgaatttta actgcatgct aattctgtta cctgtcagtc ggaacttcgt ttactgggtg
 241 agaggaacga gcgtgtgctg tagaggaccg tggagacggc aactagacaa aaacctcaag
 301 ttccacaagc tcgttgcccta cgggatagct gtaattcag ttatccacat tgtggcacac
 361 ttgttaacc tggagcgta tcacctgggt caggccaagg atgctgaagg gctgctggct

421 gcgctttcca aacttgcaa tgccccaat gaaagctacc tcaatccggt cgcaccttg
 481 tatacgggta caaccactca gctattaatg acagtctccg gaattactgg cctggtgatc
 541 tctctgctt tgatattgat catgacctt tcaactgagt ttatcaggca gtcctttat
 601 gagctattct ggtacacaca ccatatctt atcttctct tcatcagtct ggccatccac
 661 ggaggaggtc gcatcattcg aggtcaaact ccagagagtc tccggctgca caatgtcacc
 721 ttctgcagag accacttcga cgaatggcag gaagctgcct cgtgccctgt acctcaattt
 781 tctggcaagg agccgtcggc ctggaaatgg actttgggcc ctgtggtctt gtatgcgtgt
 841 gaaataataa ttaggttctg gagatctcac caagaagttg tcattaccaa ggtggtgagt
 901 caccatctg cagtcctgga acttcacatg aagaagcgtg acttcaagat ggcgcccgga
 961 cagtacatct ttatccagt cccatccatc tcccgcctgg agtggcacc cttactctc
 1021 acgtctgctc cccaggagga cttcttcagt gtacacatcc gagcctcagg agactggaca
 1081 gaggcggtac tgaaggcatt tggagcagag ggacaggctc ccagttagct ctgtagcatg
 1141 ccgagactgg cagtggaagg gcccttcgga ggctctctgg cagatgtatt tcactaccct
 1201 gtgagcgtgt gcattgcaac aggaattgga gtcacccctc tcgctctct tctgaagtct
 1261 gtgtggtata agtgttgta atcacagagt ctgcctggac tgagcaaggt gtacttctac
 1321 tggatctgcc gggatgctgc agccttgag tggttgccg atctgttact ttactggaa
 1381 acacagatga gtgaacaagg gaaggctcat ttgctgagtt accacatata tctactggc
 1441 tgggatgaat accaggcaat tcacatagct ttactctggg atgaaagtct ggatgtgatt
 1501 acaggcttaa agcagaagac cttctatggg cgacccaact ggaatgagga attcaagcag
 1561 attgcctaca atcacctag cagcagcatt ggctgttct tctgtggacc caaagccatg
 1621 tcaaagactc ttcaaaagat gtgccgttg tactatcct cagatcctag gggcgttcac
 1681 ttctattaca acaaggaaaa cttctag

Erster Durchgang -> Vergleich mit dem Menschen:

Homo sapiens verglichen mit Pan troglodytes:

Übereinstimmungsprozent -> 99.04%

Homo sapiens verglichen mit Canis lupus familiaris:

Übereinstimmungsprozent -> 86.84%

Homo sapiens verglichen mit Felis catus:

Übereinstimmungsprozent -> 86.01%

Homo sapiens verglichen mit Mus musculus:

Übereinstimmungsprozent -> 81.47%

Homo sapiens verglichen mit Rattus norvegicus:

Übereinstimmungsprozent -> 81.99%

Zweiter Durchgang -> Vergleich mit der Hausmaus (mus musculus)

Mus musculus verglichen mit Rattus norvegicus:

Übereinstimmungsprozent -> 93.38%

Mus musculus verglichen mit Mus pahari:

Übereinstimmungsprozent -> 95.53%

Mus musculus verglichen mit Mus caroli:

Übereinstimmungsprozent -> 98.27%

Mus musculus verglichen mit Heterocephalus glaber:

Übereinstimmungsprozent -> 83.57%

Nox3- Gene und Alterung bei verschiedenen Lebewesen Hat das etwas miteinander zu tun?

Merle Hoffmann & Liliane Roder

Warum leben manche Tierarten deutlich länger als andere? Der Nacktmull erreicht ein Alter von 30 Jahren, während eine genetisch verwandte Hausmaus bereits nach zwei Jahren stirbt. Diese enormen Unterschiede werfen die Frage auf, welche genetischen Faktoren dabei eine Rolle spielen könnten. Das nox3-Gen kodiert für ein Enzym, das reaktive Sauerstoffspezies produziert, welche mit Alterungsprozessen in Verbindung gebracht werden. Wir stellten uns daher die Frage: Inwiefern haben nox-Gene eine substantielle Rolle in unterschiedlichen Alterungsprozessen? Unsere Hypothese lautete: Spezies mit hoher nox3-Genübereinstimmung weisen ähnliche Lebenserwartungen auf.

Materialien und Methoden:

Wir bezogen alle mRNA-Sequenzen des nox3-Gens aus der NCBI-Datenbank. Mit dem BLAST-Programm verglichen wir die vier Nukleobasen (Adenin, Thymin, Guanin, Cytosin) zwischen verschiedenen Spezies und berechneten Übereinstimmungsprozentsätze.

Ergebnisse/ Diskussion:

- Erster Durchgang: Vergleich verschiedener Säugetiere (Schimpanse, Hund, Katze, Maus, Ratte) mit dem Menschen als Referenz.

Spezies (lat.)	Bezeichnung (im Deutschen)	Nox3-Übereinstimmung	Lebenserwartung
Homo sapiens	Mensch	100% (Referenz)	80-85 Jahre*
Pan troglodytes	Schimpanse	99,04%	30-40 Jahre
Canis lupus familiaris	Haushund	86,84%	10-15 Jahre
Felis catus	Hauskatze	86,01%	12-15 Jahre
Mus musculus	Hausmaus	81,47%	2-3 Jahre
Rattus norvegicus	Wanderratte	81,99%	<1 Jahr

- Zweiter Durchgang: Vergleich von Nagetieren mit der Hausmaus als Referenz.

Spezies (lat.)	Bezeichnung (im Deutschen)	Nox3-Übereinstimmung	Lebenserwartung
Mus musculus	Hausmaus	100% (Referenz)	2-3 Jahre
Mus caroli	Ryukyu-Maus	98,27%	2-3 Jahre
Mus pahari	Sikkim-Maus	95,53%	Wenige Monate
Rattus norvegicus	Wanderratte	93,38%	<1 Jahr
Heterocephalus glaber	Nacktmul	83,57%	20-30 Jahre

Was zeigt der Stammbaum?

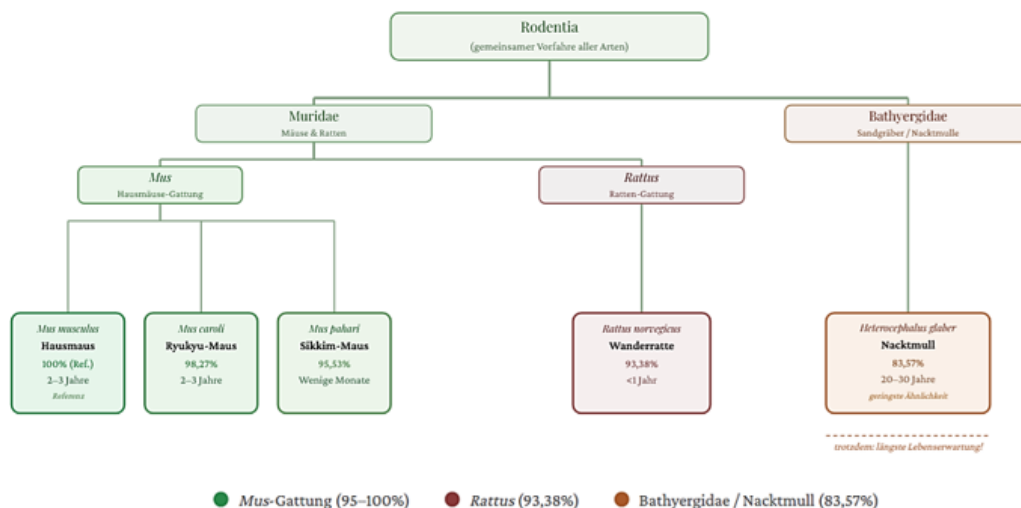
Der Stammbaum zeigt die Verwandtschaftsverhältnisse von fünf Nagetierarten der Ordnung *Rodentia*, basierend auf der Ähnlichkeit ihres *Nox3*-Gens mit der Hausmaus (*Mus musculus*, 100 % Referenz).

Wie liest man ihn?

Von oben nach unten wird die Verwandtschaft immer enger. Alle fünf Arten gehören zur Ordnung *Rodentia*. Diese teilt sich in zwei Familien: die Muridae (Mäuse und Ratten) und die Bathyergidae (Sandgräber), zu denen der Nacktmull gehört. Die Muridae gliedern sich weiter in die Gattung *Mus* – also *Mus musculus*, *Mus caroli* und *Mus pahari* – sowie die Gattung *Rattus* mit der Wanderratte.

Stammbaum

Basierend auf *Nox3*-Genähnlichkeit · *Mus musculus* als Referenz (100%)



Unsere Hypothese wurde eindeutig widerlegt. Der Nacktmull lebt zwar trotz geringster *nox3*-Genübereinstimmung (83,57%) zur Hausmaus zehnmal länger (20-30 Jahre). Dies ist ein zu großer Unterschied, sodass unsere Hypothese nicht stimmen kann. Das *nox3*-Gen allein ist kein verlässlicher Indikator für die Lebenserwartung. Andere Mechanismen wie DNA-Reparatursysteme, Telomerase-Aktivität oder Stoffwechselanpassungen müssen die Lebensdauer maßgeblich beeinflussen. Der Nacktmull zeigt: Spezies mit geringerer Genkonservierung können dennoch hocheffiziente Anti-Aging-Mechanismen entwickelt haben.

Aquaponik & Ökaponik – Trend oder Zukunft?

Inwiefern unterscheiden sich die Nährstoffgehalte von Pflanzen aus Aquaponik-Systemen im Vergleich zum traditionellen Anbau in der Erde?

Der klassische Landanbau gerät durch Klimawandel, Bevölkerungswachstum und Flächenversiegelung zunehmend unter Druck. Aquaponik-Systeme bieten eine Alternative. Sie kommen ohne Erde aus und ermöglichen Pflanzen und Fischen ressourcenschonend in einem geschlossenen Kreislauf zu wachsen. Häufig wird kritisiert, Pflanzen aus Aquaponik erhielten nicht alle wichtigen Nährstoffe. Diese Arbeit untersucht, ob diese Kritik berechtigt ist.

Es wurden wissenschaftliche Studien zu Nährstoffgehalten ausgewertet. Zusätzlich wurde ein eigenes Ökaponik-System aufgebaut und über mehrere Monate beobachtet. Nach anfänglicher Überdüngung stabilisierte sich das System eigenständig. Bei der Endmessung zeigten sich stabile Wasserwerte (pH 7, Nitrat 5 mg/L) und gesunde Pflanzen. Dies verdeutlicht: Erst bei stabilen Bedingungen können alle physiologischen Prozesse optimal ablaufen.

Pflanzen aus Aquaponik-Systemen können ähnliche oder sogar höhere Nährstoffgehalte aufweisen als Pflanzen aus dem Bodenanbau: Basilikum enthielt mehr Stickstoff (6,32 % vs. 4,89 % im Boden) und Phosphor (1,70 % vs. 0,99 %), Tomaten wiesen mehr als doppelt so viel Lycopin (0,16 vs. 0,06 mg/100 mL) und höhere β -Carotin-Werte auf, zudem war die Wassernutzungseffizienz deutlich höher als im Bodenanbau. Die Nährstoffaufnahme funktioniert in Aquaponik effizienter, da Nährstoffe bereits im Wasser gelöst vorliegen und nicht erst durch Ionenaustausch freigesetzt werden müssen.

Aquaponik funktioniert besonders gut bei Kräutern und Blattgemüse. Anspruchsvollere Pflanzen benötigen häufig zusätzliche Nährstoffe. Die Systemkomplexität erfordert kontinuierliche Überwachung von pH-Wert, Nitrat und Leitfähigkeit. Ein ungelöstes Problem ist das Styropor-Trägermaterial, das die Nachhaltigkeit einschränkt.

Pflanzen aus Aquaponik-Systemen können genauso nährstoffreich oder sogar nährstoffreicher sein als Pflanzen aus dem Bodenanbau, vorausgesetzt, dass stabile Wasserwerte gewährleistet sind. Die eingangs erwähnte Kritik ist nicht berechtigt. Für urbane Gebiete bietet Aquaponik erhebliches Potenzial: wenig Platz, Wassereinsparung, ganzjährige Produktion und höhere Erträge (Basilikum: 1,8 kg/m² vs. 0,6 kg/m² im Boden). Damit stellt Aquaponik eine realistische Alternative dar. Forschungsbedarf besteht bei nachhaltigen Alternativen zu Styropor, optimaler Nährstoffversorgung ohne Supplementierung und langfristiger Wirtschaftlichkeit. Dennoch zeigt sich: Aquaponik hat das Potenzial, nachhaltig und mit minimalen Eingriffen zu funktionieren.

Bundes Umwelt Wettbewerb 2026

Aquaponik & Ökaponik – Trend oder Zukunft?

Verfasserin: Merle Hoffmann

Fachgebiet: Biologie/ Chemie

Leonardo-da-Vinci-Gesamtschule Nauen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Aquaponik- und Ökaponik-Systeme	6
2.1	Aufbau und Funktionsweise	6
2.2	Vergleich beider Systeme	9
2.3	Vorteile, Nachteile und Nachhaltigkeit.....	9
3	Nährstoffaufnahme bei Pflanzen.....	11
3.1	Grundlagen der Nährstoffaufnahme	11
3.2	Unterschiede je nach Anbausystem (Wasser vs. Erde).....	13
3.3	Einfluss von pH-Wert, Makro- und Mikronährstoffen, Wasserqualität etc.	15
4	Vergleich der Nährstoffgehalte in Pflanzen: Aquaponik vs. Erde	18
4.1	Ergebnisse aktueller Studien	18
4.2	Analyse ausgewählter Pflanzen (z. B. Salat, Kräuter, Tomaten)	18
4.3	Darstellung und Auswertung (Tabellen).....	19
4.4	Diskussion der Ergebnisse	20
5	Bewertung und Diskussion.....	20
5.1	Chancen und Grenzen von Aquaponik-Systemen.....	20
5.2	Relevanz für Ernährung und Umwelt	21
5.3	Aquaponik im urbanen Raum – kann sie mit dem traditionellen Anbau mithalten?	22
5.4	Kritische Betrachtung offener Fragen	23
5.5	Exkurs: Eigener Versuch – Stabilität eines geschlossenen Ökaponik-Systems	25
5.5.1	Zielsetzung und Versuchsaufbau	25
5.5.2	Messergebnisse und Beobachtungen.....	26
5.5.3	Interpretation im Kontext der Nährstoffverfügbarkeit	27
6	Fazit.....	28
7	Literaturverzeichnis	30
8	Anhang	33
9	Eigenständigkeitserklärung	47

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass der klassische Landanbau immer stärker unter Druck gerät. Durch den Klimawandel, das rasante Bevölkerungswachstum und die daraus resultierende zunehmende Versiegelung von Flächen wird es immer schwieriger, genügend Anbauflächen zur Verfügung zu stellen. Gleichzeitig steigt der Bedarf an frischen, regionalen und nachhaltig hergestellten Lebensmitteln. Neue und nachhaltige Anbaumethoden werden daher immer wichtiger. Aquaponik-Systeme bieten hier eine interessante Alternative, denn sie kommen ohne Erde aus und ermöglichen es Pflanzen und Fischen, ressourcenschonend in einem geschlossenen Kreislauf zu wachsen. Dieses System könnte vor allem in urbanen Gebieten eine wichtige Rolle spielen, da es wenig Platz benötigt, flexibel ist, unabhängig von der Bodenqualität funktioniert und sehr wassersparend ist. Außerdem kann es zur Begrünung von Städten beitragen, was besonders in Zeiten des Klimawandels sehr wichtig ist. Zudem fördern Aquaponik-Systeme die regionale Lebensmittelproduktion, da es das ganze Jahr über Erträge liefern kann. So müssten Länder weniger importieren, was wiederum positiv für das Klima wäre.

Was ist Aquaponik/ Ökoaponik?

Aquaponik ist ein kombiniertes System aus der Fischzucht (Aquakultur) und Pflanzenanbau ohne Erde, also der Hydroponik. Beide Bereiche sind eng miteinander verknüpft, da Fische und Pflanzen voneinander profitieren aber auch abhängig sind (hochkomplexe Wechselwirkungen zwischen Fischen, nützlichen Bakterien und Pflanzen). Die Aquakultur und die Hydroponik treffen zwar in der Aquaponik aufeinander, jedoch spricht man bei der Aquaponik von einem sterilen System, da beide Bereiche noch immer separiert sind. Das hat aber den Vorteil, dass die Aquaponik sehr gut kontrollierbar ist. Das System ist ein in sich geschlossener Wasserkreislauf und kann nahezu überall eingesetzt werden.

Die Ökoaponik geht einen Schritt weiter. Sie ist ein sich selbst erhaltender, geschlossener Wasserkreislauf, der durch das Zusammenspiel von Fischen, Wasserlebewesen, Pflanzen, Bodenbewohnern und Mikroorganismen funktioniert. Durch diese komplexen Wechselwirkungen entsteht ein stabiler und nachhaltiger Kreislauf, der natürliche Prozesse nachahmt und so besonders ressourcenschonend ist.

Ein ökoaponisches System reguliert sich weitgehend selbst und stellt dabei ein Gleichgewicht her, indem sich alle Bestandteile frei entfalten können. Komplexe biologische Prozesse laufen hier auf kleinstem Raum ab und es entstehen vielfältige, gut beobachtbare Wechselwirkungen.

[Q6]

Leitfrage

„Inwiefern unterscheiden sich die Nährstoffgehalte von Pflanzen aus Aquaponik-Systemen im Vergleich zum traditionellen Anbau in der Erde?“

Diese Leitfrage entstand aus einer intensiven Auseinandersetzung mit der Kritik an Aquaponik-Systemen. Dabei wurde schnell deutlich, dass viele denken, Pflanzen aus Aquaponik-Anlagen würden nicht alle wichtigen Nährstoffe erhalten bzw. enthalten und deshalb auch nicht alle wichtigen Vitamine herstellen, die für unseren Körper essentiell sind.

Im Gegensatz dazu sind viele überzeugt, dass Pflanzen aus dem klassischen Anbau in der Erde alles bekommen, was sie brauchen. Denn ihre Wurzeln liegen in der Erde, und die Erde speichert Nährstoffe und gibt sie an die Pflanzen weiter, je nachdem, was sie gerade braucht. So, sagen die Kritiker, entsteht ein voller Nährstoffgehalt in der Pflanze, mit allen Vitaminen und Mineralien.

Bei der Aquaponik ist das anders. Die Wurzeln liegen dort im Wasser, ohne Erde. Kritiker bezweifeln deshalb, dass Pflanzen in Aquaponik-Systemen denselben Nährstoffgehalt entwickeln können wie Pflanzen in der Erde.

Das soll mit dieser wissenschaftlichen Arbeit genauer untersucht werden. Ziel ist es herauszufinden, ob die Kritik berechtigt ist oder ob Pflanzen aus Aquaponik-Systemen am Ende doch einen vergleichbaren oder vielleicht sogar höheren Nährstoffgehalt aufweisen als Pflanzen aus dem Bodenbau.

Diese Fragestellung ist besonders relevant, weil Aquaponik als nachhaltige Anbaumethode gilt, aber natürlich nur dann, wenn die Pflanzen dabei auch wirklich nährstoffreich bleiben und eine gesunde Ernährung ermöglichen.

Aufbau der Arbeit

Im weiteren Verlauf werde ich verschiedene wissenschaftliche Quellen und Fachzeitschriften miteinander vergleichen, um die Leitfrage zu beantworten.

Zunächst erfolgt eine Beschreibung des Aquaponik- und Ökotonik-Systems, einschließlich ihres Aufbaus, ihrer Funktionsweise und ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile. Danach werden beide miteinander verglichen. Anschließend folgt ein Kapitel über die Nährstoffaufnahme bei Pflanzen, um zu verstehen, wie Pflanzen Nährstoffe in der Erde bzw. im Wasser aufnehmen und welche Faktoren dabei eine Rolle spielen. Darauf aufbauend werden Studien zu den Nährstoffgehalten ausgewählter Pflanzenarten aus beiden Anbausystemen (Aquaponik-System vs. Klassischer Landanbau) verglichen. Die Ergebnisse werden dann analysiert und schließlich kritisch diskutiert. Zum Schluss erfolgt eine Bewertung, in der die Chancen und Grenzen von

Aquaponik-Systemen für Umwelt und Ernährung eingeordnet werden und geprüft wird, inwiefern sie im urbanen Raum eine ernstzunehmende Alternative zum klassischen Anbau darstellt. Des Weiteren helfen die Durchführung und Dokumentation eines eigenen Ökoponik-Versuches dabei, die bisherigen Ergebnisse praktisch zu überprüfen, nachzuvollziehen und besser zu verstehen.

2 Aquaponik- und Ökaponik-Systeme

2.1 Aufbau und Funktionsweise

In dieser Arbeit wurden eine Aquaponik- und eine Ökaponik-Anlage in kleinem Maßstab nachgebaut. Die folgende Erklärung des Aufbaus bezieht sich auf die im kleinen Maßstab nachgebauten Modelle der beiden Anlagen. Das Grundprinzip bleibt dabei unverändert und wird ebenso deutlich wie in den Originalanlagen.

Für den Aufbau einer funktionsfähigen Aquaponik-Anlage benötigt man ein Aquarium, ein Rohrsystem zur Pflanzenzucht und eine Pumpe für die Wasserzirkulation. Das Rohrsystem besteht aus drei Etagen, wobei die einzelnen Rohre in regelmäßigen Abständen Löcher besitzen. Kleine Plastiktöpfe werden in diese Löcher, welche zusätzlich jeweils mit einem Schaumstoffwürfel gefüllt sind, eingesetzt. Diese Würfel haben in der Mitte ein kleines Loch, in das Samen einer Kräutermischung ausgesät werden. Das Loch in den Schaumstoffwürfeln ermöglicht es den Pflanzen, die in dieser Anlage heranwachsen, dass ihre Wurzeln Wasser aus dem Rohrsystem aufnehmen können. Neben dem Rohrsystem steht ein Aquarium, das mit Wasser gefüllt wird. Normalerweise befinden sich dort Fische, aber aufgrund einiger Faktoren war dies in diesem Modell jedoch nicht möglich. Stattdessen wurde dem Wasser im Aquarium als Ersatz für die Fischeausscheidungen ein Nitratdünger hinzugegeben. Das Aquarium und das Rohrsystem sind mit Schläuchen verbunden und durch das Anschließen einer Unterwasserpumpe wird eine Wasserzirkulation zwischen Aquarium und Rohrsystem erzeugt. [Q3] [siehe Abb. 1]

Bei der Aquaponik wurden zwei verschiedene Systeme vereint, die Aquakultur und die Hydroponik. Die beiden Systeme liegen im Aquaponik-System noch immer sehr separiert vor. Das Einzige, was sie verbindet, sind Schläuche und eine Pumpe, die für die nötige Wasserzirkulation zwischen den beiden Systemen sorgen. Das Prinzip einer Aquaponik-Anlage ist sehr einfach gehalten. Die Fische in einem Aquarium scheiden Ammonium aus. Bevor dieser Fischkot zu den Pflanzen gelangt, muss dieser noch ein Becken, in dem sich Bakterien befinden, passieren. Diese Bakterien wandeln das Ammonium des Fischkot in Nitrat um, um alle giftigen Stoffe für die Pflanze abzutöten. Das Nitrat dient den Pflanzen als Dünger. Die Wurzeln der Pflanzen liegen im Wasser des Rohrsystems und können so das Nitrat aus dem Wasser entnehmen. Dadurch sollen die Pflanzen wichtige Nährstoffe erhalten, um zu wachsen. Während des Wachstums der Pflanze verlieren sie dann Wurzelstücke und andere Pflanzenreste, die dann durch die Wasserzirkulation wieder zu den Fischen transportiert werden und diesen als Nahrung dienen. Dann beginnt der Kreislauf der Aquaponik wieder von vorne. Daher nennt man das Ganze auch ein geschlossenes Ökosystem. [Q3]

Der Aufbau des Ökaponik-Systems orientiert sich an einem Uferabschnitt eines kleinen Baches und ist so gestaltet, dass er die natürlichen Bedingungen eines Gewässers nachbildet, um eine optimale Umgebung für Landtiere, Wasserlebewesen und Pflanzen zu schaffen. Eine

Grundvoraussetzung für das System ist ein Aquarium (Beispielmaße: Länge 1m, Höhe 0,48m, Tiefe 0,35m). Auf halber Höhe wird eine Plexiglasscheibe angebracht (die Plexiglasscheibe bedeckt nicht die ganze Fläche des Aquariums, um später das nötige Licht zu gewährleisten, für die Pflanzen und Lebewesen unterhalb der Plexiglasscheibe), die durch das Hinzufügen von Holzstützen die nötige Stabilität erhält. Die hinteren Füße sind etwas höher als die vorderen, sodass ein leichtes Gefälle entsteht. Das Aquarium muss in der Nähe eines Fensters stehen, um genügend Tageslicht zu erhalten. Zusätzlich bietet es sich an, über dem unbedeckten Bereich der Plexiglasscheibe eine künstliche Lichtquelle zu montieren. Auf den Grund des Aquariums werden Steine gelegt. Die Steine bieten später den Tieren einige Rückzugsorte und sind behilflich bei der Herstellung einer natürlichen Bachumgebung. Das Aquarium wird bis zur Hälfte mit Leitungswasser gefüllt. Der Bereich oberhalb der Plexiglasscheibe dient als Landfläche. Die Wasserzirkulation wird hier durch eine Unterwasserpumpe gewährleistet (EHEIM Aquarienpumpe compactON 300). Hierbei wird das Wasser auf die Plexiglasscheibe gepumpt, aufgrund des Gefälles läuft es ab und zurück ins Aquariumwasser. Durch den Rückfluss des Wassers in das Aquariumwasser gelangt etwas Sauerstoff in den Kreislauf. Wichtig hierbei ist, dass die Pumpe dauerhaft in Betrieb ist, damit immer eine Strömung gewährleistet wird. Auf der Plexiglasscheibe fließt das Wasser über einen gebauten "Fluss" zurück ins Aquarium. Der Fluss wird durch Steine, die aus einem See entnommen wurden, begrenzt. Nur mit Hilfe dieser Steine ist es möglich, die notwendigen Bakterien in das Ökoponik-System zu bringen. Zum Beispiel die nitrifizierenden Bakterien, welche für die Umwandlung von Ammonium zu Nitrat verantwortlich sind. Auf der Plexiglasscheibe um den Fluss werden noch Pflanzen (z.B. Basilikum) angebracht, von denen zuvor gründlich die Erde entfernt worden ist. Zusätzlich wird auf der Plexiglasscheibe Moos ausgelegt, das im besten Fall noch kleine Insekten enthalten kann. Zudem werden im Aquariumwasser Wasserpflanzen (z.B. Wasserpest) angesiedelt. Vollständig wird das System erst mit größeren Lebewesen, weshalb es notwendig ist, Schnecken (z.B. Rennschnecken) anzusiedeln. Nachdem ein stabiles Ökosystem aufgebaut ist, werden dann auch Fische hinzugefügt. [Q4] [siehe Abb. 2]

Geeignete Landtiere sind Schnecken, sie sind im Vergleich zu Fischen wesentlich pflegeleichter. Zudem ernähren sie sich hauptsächlich von Algen und rühren die anderen Wasserpflanzen (sind für die Sauerstoffproduktion sehr wichtig) nicht an. Sie sind außerdem eine vorragende Nahrung für die Wasserbewohner. Auch Asseln sind eine gute Wahl da sie ihren nährstoffreichen Kot auf dem Land verteilen und das System so mit wichtigen Nährstoffen versorgen. Für das Wasser eignen sich Wassertschnecken wie die Posthornschncke, da sie fast alles fressen, was im Aquarium anfällt, und so das System sauber halten. Auch Garnelen wie Macrobrachium Assamense sind ideal, da sie das Wasser reinigen und verletzte Fische beseitigen, wodurch die Gesundheit des Systems unterstützt wird. Geeignete Fische sind die Gara Rufa, da sie sich hervorragend in Strömungsreichen Bereiche fortbewegen können und ihr komple-

xes Kommunikationsverhalten das System bereichert. Wichtig: Die Fischwahl muss passend zu dem System ausgewählt werden, nicht umgekehrt! Und eine Geeignete Pflanze ist Jamaika-Thymian, da sie sowohl Dürre als auch Überschwemmungen gut überstehen und Schädlinge vertreiben. [Q5]

Ein funktionierendes Ökosystem wird durch Temperatur, Licht und Strömung ermöglicht. Ist einer dieser Aspekte nicht vertreten, kann das Ökoponik-System nicht funktionieren. Da sich Ökosysteme an Gewässern orientieren, haben sie also Flüsse und Seen als Vorbild. Ein signifikantes Merkmal, das diese Gewässer ausmacht, ist, dass sie verschiedene Zonen besitzen, die Uferzone, mitteltiefe Zone und tiefe Zone. Diese verschiedenen Zonen beherbergen unterschiedliche Tiere, die unterschiedliche Aufgaben haben. Werden diese drei Zonen in einem Ökosystem gewährleistet, dann wird das ganze System produktiver. Die Tiere ordnen bzw. separieren sich auf die bevorzugte Zone und üben dort ihre Funktionen aus. Hier wird für viele Tiere der optimale Lebensraum gewährleistet, weshalb es in einem Ökoponik-System eine große Artenvielfalt geben kann. Zudem verdeutlicht dies, warum in so einem System so viele komplexe Wechselwirkungen bzw. biologische Prozesse stattfinden. Je komplexer, desto besser! [Q7]

Die Uferzone ist sehr wichtig, da hier der Nährstoffursprung liegt. Da auf die Algen, die sich in dieser Zone befinden, Sonnenlicht trifft, findet Fotosynthese statt. Die nährstoffreiche Alge kann dann von einer Schnecke gefressen werden und die Schnecke, die die Nährstoffe der Alge aufgenommen hat, kann dann wiederum von einem Fisch gefressen werden. [Q7]

Als Nahrungsgrundlage der Pflanzen dient das Aquariumwasser, welches durch tierische Ausscheidungen Ammonium enthält. Die Ausscheidungen der Schnecken und Fische werden mit dem Aquariumwasser durch die Pumpe auf die Plexiglasscheibe gepumpt und fließen dort über den "Fluss" wieder ab. Die Pflanzen auf der Plexiglasscheibe werden dabei von diesem Wasser umspült. Das Moos sorgt dafür, dass das Wasser darin gespeichert und so gewährleistet wird, dass es auf der Plexiglasplatte immer feucht bleibt. Zudem sorgen die Bakterien von den Steinen dafür, dass das Ammonium in Nitrat umgewandelt wird, sodass die Pflanzen wichtige Nährstoffe erhalten. Abfallende Pflanzenteilchen dienen unter anderem als Nahrung für Insekten, Fische, Schnecken etc.. Die Pflanzen auf der Plexiglasscheibe bzw. im Wasser dienen der Sauerstoffproduktion. Damit die Sauerstoffproduktionen erfolgen kann, benötigt man eine Lichtquelle. Diesen Prozess kann man sehr gut am Beispiel der Wasserpest betrachten. Wird diese mit Licht bestrahlt, kann man eine Gasbildung beobachten. [Q4]

2.2 Vergleich beider Systeme

Sowohl das Aquaponik-System als auch das Ökaponik-System sind geschlossene Systeme. Da es sich bei beiden Systemen um sehr junge Technologien handelt, liegen bisher wenige Erfahrungswerte vor. Eindeutig ist jedoch, dass beide Systeme ähnliche Ziele verfolgen. [Q7]

Der Aufbau einer Ökaponik-Anlage ist sehr aufwendig, da man sehr viele verschiedene Materialien benötigt. Jedoch kann und muss man das System sich selbst überlassen, weshalb es auf längere Sicht sehr leicht zu handhaben ist. Es finden zwar viele komplexe biologische Prozesse statt, aber es ist nicht nötig, diese aktiv zu kontrollieren. Ein Ökaponik-System ist wesentlich komplexer als ein Aquaponik-System, da gewährleistet wird, dass sich alle Bestandteile in diesem System frei entfalten können. Durch die aktive Kombination von Gewässern und Uferzonen entsteht ein leistungsstarkes und stabiles System, dass in der Lage ist, sich selbst zu regulieren und Fehler zu verzeihen. [Q7]

Der Aufbau einer Aquaponik-Anlage ist dagegen sehr leicht und übersichtlich. Auch das Grundprinzip des Systems ist auf den ersten Blick leicht nachvollziehbar. Betrachtet man jedoch den Betrieb über einen längeren Zeitraum, zeigt sich, dass Aquaponik-Anlagen einen höheren Kontrollaufwand haben und es eine höhere Fehleranfälligkeit gibt. Das liegt daran, dass Aquaponik eine Kombination von Aquakultur und Hydroponik ist. Diese zwei sehr limitierten, sterilen Umgebungen ergeben eine komplexe Vielfalt an Funktionen und Mechanismen, die das System aber so selbst überhaupt nicht abdecken bzw. gerecht werden kann. Daher ist Aquaponik im Gegensatz zu Ökaponik auch kontrollierbarer, da die Aquakultur und Hydroponik sozusagen zusammengewürfelt wurden und in einer Aquaponik-Anlage immer noch steril und separiert vorliegen. [Q7]

Ein Ökosystem ist nicht empfindlich, es kann in einem Zuhause an beliebigen Stellen stehen z.B. in der Küche. Es ist möglich bzw. erwünscht, übrig gebliebene Lebensmittelreste in das System zu werfen, die dann den Lebewesen als Nahrung dienen und sie zersetzen. "Fremdkörper" und Schädlinge in einem Aquaponik-System müssen hingegen sofort bekämpft werden, da die Aquakultur und Hydroponik sehr steril vorliegen und dies auch so bleiben muss. Wenn in einem Ökaponik-System z.B. ein Algenüberwuchs vorhanden ist, dann ist das ein Zeichen für ein nicht funktionierenden Kreislauf. Entfernt man die Algen, geht man das eigentliche Problem nicht an. Einen Algenwuchs sollte man allgemein nie bekämpfen oder als "Fremdkörper" ansehen, da er die Grundlage des Systems bietet (Nährstoffursprung). [Q7]

2.3 Vorteile, Nachteile und Nachhaltigkeit

In originalen Aquaponik-Anlagen sitzen die Pflanzen nicht in mehrstöckigen Rohrsystemen, da diese bei zunehmender Größe nicht mehr stabil wären. Stattdessen werden große Becken

verwendet, in denen die Pflanzen auf schwimmenden Trägern angebaut werden. Diese Art der Aquaponik wird als Raft-Hydroponik (auch Floating-Raft-System) bezeichnet. Hier sitzen die Pflanzen in Löchern von Styropor- oder Kunststoffplatten. Diese Platten schwimmen in einem Wasserbecken. Die Wurzeln können hier dauerhaft im Wasser hängen und nehmen dort Nährstoffe und Sauerstoff auf. [Q1] Das Material bringt jedoch einige Probleme mit sich. Auf den ersten Blick haben die Styroporplatten zwar nur Vorteile, denn das Material ist so leicht, dass es problemlos auf dem Wasser schwimmt. Es lässt sich zudem leicht anheben, dadurch wird die Kontrolle unterhalb der Platte erheblich erleichtert. Die Platten sorgen auch für Schatten, daher bleibt das Wasser kühl. Ein großer Nachteil von Styropor besteht jedoch darin, dass Pflanzenwurzeln nicht nur nach unten ins Wasser wachsen, sondern auch in das Material hinein, die Wurzeln können so unter anderem auch die schädlichen Stoffe aufnehmen. Und bei beschädigtem Styropor besteht die Gefahr, dass Abrieb das Wasser verunreinigt. [siehe Anhang: Notizen] Bei dem Besuch einer Aquaponik-Anlage in Berlin wurde von einer am Aufbau der Anlage beteiligten Person erklärt, dass geplant ist, so schnell wie möglich auf ein anderes Material umzusteigen, da andernfalls ein Verkauf der Pflanzen als zu riskant eingeschätzt wird. Aber eine geeignete Alternative zu finden ist sehr schwer. [siehe Anhang: Notizen] Die Pflanzen, die die schädlichen Stoffe des Styropors aufnehmen, können nicht verkauft werden, da sie für den Menschen schädlich sind und daher können diese Pflanzen auch nicht als nachhaltig bezeichnet werden. [siehe Abb. 3]

Als Nachteil einer Aquaponik-Anlage werden auch der Stromverbrauch und Stromkosten angesehen. Jedoch kann auf eine Pumpe, die im Dauerbetrieb ist, in so einem System nicht verzichtet werden, da sie die Grundlage mit bildet. Zusätzlich erfordert das System Fachwissen, um die Abhängigkeit von Strom für Pumpen und Belüftung richtig zu managen. [Q2] Somit ist zwar der Stromverbrauch vorhanden, aber er ist immer noch deutlich geringer als bei vielen anderen landwirtschaftlichen Methoden. Man wird nie eine hundertprozentige Nachhaltigkeit erreichen, aber eine Aquaponik-Anlage kommt in Bezug auf den Stromverbrauch der Nachhaltigkeit deutlich näher als andere Optionen. [siehe Anhang: Notizen]

Ein großer Vorteil von Aquaponik-Anlagen ist, dass sie enorm wassereinsparend sind, denn Wasser bleibt in einem Kreislauf, wird also recycelt, wodurch weniger Wasser verbraucht wird. [Q1] Zudem benötigt das System keine Erde, weshalb es auch sehr für die Stadt (Urbanes Gebiet) geeignet ist. Außerdem spart das System Platz, da Pflanzen und Fische auf relativ kleiner Fläche kombiniert werden können. [Q2] So lassen sich Städte, in denen der Beton überwiegt, ein wenig grüner gestalten. Ein weiterer Vorteil von Aquaponik-Anlagen ist, dass höhere Erträge pro Quadratmeter, als bei der konventionellen Landwirtschaft erzielt [Q17] und gleichzeitig ganzjährig Lebensmittel produziert werden können. [Q1]

Aquaponik wird als Zukunftstechnologie angesehen, die viele neue Möglichkeiten mit sich bringt und es ermöglicht, Nahrungsmittel mitten in der Stadt zu produzieren. Insgesamt ist das

System ein komplexes Zusammenspiel mit viel Potenzial, vor allem im Hinblick auf Wassersparnis, urbane Landwirtschaft und Nachhaltigkeit. [Q7]

Bei Ökotonik-Anlagen gibt es nur wenige Nachteile. Neben dem bereits bei Aquaponik-Anlagen erwähnten Stromverbrauch zählen dazu vor allem die hohen Anschaffungskosten, die durch die Verwendung vieler verschiedener Materialien entstehen können. Ein großer Vorteil besteht darin, dass man bei der Auswahl von Tieren und Pflanzen sehr experimentierfreudig sein kann, da in dieser Anlage so viele biologische Prozesse stattfinden. Feste Regeln dafür, welche Pflanzen und Tiere ins System integriert werden können, gibt es nicht, so dass es immer wieder zu Überraschungen kommt. Zudem wird Ökotonik als sehr nachhaltig angesehen, da Lebensraum aus der Natur im eigenen Zuhause imitiert wird. [Q5]

3 Nährstoffaufnahme bei Pflanzen

3.1 Grundlagen der Nährstoffaufnahme

Die folgenden Grundlagen zur Nährstoff- und Wasseraufnahme sowie Transport in Pflanzen basieren auf schulischem Unterrichtsmaterial.

Pflanzen nehmen Nährstoffe über ihre Wurzeln aus dem Boden bzw. aus einer Nährlösung auf. Die Nährstoffe liegen dabei in Wasser gelöst als Ionen (z. B. Nitrat, Phosphat, Kalium und viele andere Mineralien) vor und werden zusammen mit dem Wasser von der Pflanze aufgenommen. [Q12]

Die Aufnahme von Wasser stellt den grundlegenden ersten Schritt der Nährstoffaufnahme dar. Dies geschieht hauptsächlich durch Osmose. Bei der Osmose bewegen sich Wassermoleküle vom Ort hoher Wasserkonzentration zum Ort niedriger Wasserkonzentration durch eine semi-permeable Membran. In der Erde rund um die Wurzeln herum befindet sich mehr Wasser als in der Wurzel selbst. Es herrscht dort also eine höhere Wasserkonzentration, weswegen sich die Wassermoleküle durch die Zellmembran der Wurzelhaare ins Innere der Wurzel bewegen, wo eine geringere Wasserkonzentration herrscht. Das Wasser muss von den Wurzelhaaren bis ins Innere der Wurzel zu den Leitbündeln der Sprossachse gelangen. Auch das geschieht durch Osmose und durch Diffusion. Die Diffusion sorgt für eine gleichmäßige Verteilung von Stoffen innerhalb der Zellen. Die Osmose hingegen sorgt für den Transport von Wasser durch die Membran. Die inneren Wurzelzellen haben eine geringere Wasserkonzentration als die Wurzelhaarzellen, da diese gerade viel Wasser aufgenommen haben. Deswegen strömt das Wasser durch die verschiedenen Schichten der Wurzel immer von Zellen mit hoher Wasserkonzentration zu Zellen mit niedriger Wasserkonzentration auch abhängig von Ionenkonzentration. Die Diffusion sorgt also dafür, dass das Wasser gleichmäßig in den Zellen verteilt wird.

während die Osmose das Wasser überhaupt erst in die Wurzelzellen bringt. Durch die Osmose erreicht das Wasser schließlich die Leitbündel des Zentralzylinders. Dort gelangt es weiter bis in den Spross. Über die Leitgefäße, genauer gesagt über das Xylem, wird das Wasser bis in den oberen Bereich der Pflanze transportiert. [siehe Abb. 4]

Das Xylem besteht aus verholzten Tracheen und Tracheiden, die zur Verstärkung mit Lignin ausgekleidet sind. Die Trennwände zwischen den Zellen sind aufgelöst, wodurch ein zusammenhängendes Leitungssystem entsteht. [Q10]

Für die Aufnahme der gelösten Nährstoffe reichen diese passiven Wasservorgänge allein jedoch nicht aus. Wasser gelangt in die Wurzel nicht nur durch passive Transportvorgänge, wie bereits oben beschrieben. Beim passiven Transport wird keine Energie benötigt. Stoffe bewegen sich dabei entlang ihres Konzentrationsgefälles von einer höheren zu einer niedrigeren Konzentration. Beispiele dafür sind einfache Diffusion und Osmose. Es gibt auch den aktiven Transportvorgang. Hierfür wird Energie (ATP) benötigt, um Stoffe gegen ihren Konzentrationsgradienten zu transportieren. Also wenn außerhalb der Wurzel eine geringere Konzentration als innerhalb der Wurzel herrscht, dann werden Stoffe mithilfe von Energie trotzdem nach innen transportiert (ein Gradient wird aufgebaut). An aktiven Transportvorgängen sind immer Transmembranproteine involviert. Zudem ist die ATP-Hydrolyse direkt an den Transport gekoppelt. Die Wurzel besteht aus vielen Wurzelzellen und diese besitzen jeweils eine Membran (Biomembran = Phospholipid-Doppelschicht). In dieser Membran befinden sich unter anderem Proteine, z. B. Kanalproteine und Carrier. Da nur wenige kleine, ungeladene Moleküle direkt durch die Membran diffundieren können, benötigen andere Stoffe spezielle Transportproteine. Wasser ist ein polares Molekül und kann die Membran grundsätzlich durch Osmose passieren, allerdings nur langsam. Deshalb wird der Wasserdurchtritt in Pflanzen häufig durch spezielle Kanalproteine, sogenannte Aquaporine, passiv erleichtert. Die gelösten Nährstoffe liegen als Ionen vor und können nicht direkt durch die Lipiddoppelschicht diffundieren, weshalb sie über erleichterte Diffusion oder aktiven Transport mithilfe von Membranproteinen bewegt werden. Ein Kanalprotein besitzt dabei einen hydrophilen Innenbereich, der den Durchtritt geladener Teilchen und von wässrigen Lösungen erleichtert. Kleine Ladungen (+) im Kanalinneren erleichtern zusätzlich den Durchtritt. Auf diese Weise gelangen Wasser und die gelösten Nährstoffe schrittweise durch die Wurzelzellen bis zum Xylem.

Da Nährstoffe im Wasser gelöst sind, werden sie gemeinsam mit dem Wasser transportiert. Dieser Transport innerhalb der Pflanze beruht auf passiven und aktiven Mechanismen, wie dem Transpirationssog, dem Kapillareffekt und dem Wurzeldruck.

In einer Pflanze arbeiten Blätter und Wurzeln ähnlich wie eine Saug- und Druckpumpe zusammen. Die Blätter erzeugen durch Verdunstung (Transpiration) einen Sog, der wie eine Saugpumpe Wasser aus den Wurzeln nach oben zieht. Das bedeutet, umso mehr Blätter vorhanden

sind, desto mehr Oberfläche ist auch vorhanden und es findet umso mehr Verdunstung statt. Der Kapillareffekt (Adhäsion und Kohäsion) unterstützt diesen Prozess. Denn durch Zusammenhalt der Wassermoleküle (Kohäsion) und die Anziehung zwischen Wasser und den Gefäßwänden der Pflanzen (Adhäsion) kann Wasser gegen die Schwerkraft von den Wurzeln bis in die Blätter transportiert werden. Sowohl der Transpirationssog als auch die Kapillarkräfte sind passiv. Die Wurzeln hingegen erzeugen durch den Wurzeldruck einen Druck, der das Wasser aktiv in die Pflanze transportiert, ähnlich einer Druckpumpe. Der Wurzeldruck entsteht durch osmotischen Wassertransport. Durch die Anreicherung von Stoffen, z.B. Mehrfachzuckern wie Stärke, in den Wurzelzellen, entsteht eine höhere Konzentration an Zucker in den Wurzelzellen als außerhalb. Dadurch strömt Wasser aufgrund des Diffusionsgleichgewichts (Osmose) in die Zellen. [Q10] Durch den Wassereinstrom sammelt sich immer mehr Wasser in der Wurzel an, wodurch sich ein Druck aufbaut, der als Wurzeldruck bezeichnet wird. Da das Wasser nicht nach außen entweichen kann, sucht es sich einen anderen Weg, um den Druck zu normalisieren. Der einzige verbleibende Ausweg führt nach oben. Dieser Weg führt über die Leitbündel, sodass der Wurzeldruck das Wasser in die Sprossachse und weiter nach oben in die Pflanze drückt. [Q9]

Sobald die Nährstoffe in der Pflanze sind, werden sie dazu genutzt, um wichtige Prozesse wie das Wachstum, die Photosynthese und die Zellbildung zu unterstützen. Zum Beispiel wird Stickstoff für die Bildung von Proteinen und Chlorophyll verwendet, Phosphor hilft bei der Energieübertragung und Kalium reguliert den Wasserhaushalt der Zelle. [Q21]

3.2 Unterschiede je nach Anbausystem (Wasser vs. Erde)

Pflanzen nehmen Nährstoffe über das Wasser auf. Genauer gesagt erfolgt die Nährstoffaufnahme der Pflanzen über ihre Wurzeln, unabhängig davon, ob sie in der Erde oder im Wasser gezüchtet werden. [Q16]

Pflanzen, die im Boden heranwachsen, erhalten ihre Nährstoffe durch einen Mechanismus, der Ionenaustausch genannt wird. Grundsätzlich gibt hier die Wurzel Protonen (H^+ -Ionen) ab, wodurch Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor, Kalium und andere Mineralstoffe von den Bodenpartikeln gelöst werden. Dieser Prozess funktioniert folgendermaßen: Bodenpartikel z.B. Ton- und Humusteilchen sind negativ geladen und Nährstoffionen (Kationen) wie Kalium (K^+), Kalzium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}) sind positiv geladen. Aufgrund des Ladungsunterschiedes und die daher herrschenden Anziehungskräfte sind die Kationen an die negativ geladenen Bodenpartikel gebunden. Die Pflanzenwurzel gibt H^+ -Ionen in den Boden ab die auch positiv geladen sind. Diese H^+ -Ionen verdrängen die Nährstoffionen von den Bodenpartikeln. Die

Nährstoffionen lösen sich daher von den Bodenpartikeln und gehen in das Bodenwasser über. Jetzt können sie von der Pflanze aufgenommen werden. [Q10] [Q8]

Da Pflanzen Nährstoffe als Ionen aufnehmen (z. B. NO_3^- , K^+ , Ca^{2+}), ist es absolut notwendig, dass sowohl der Boden als auch das Aquaponikwasser Kationen und Anionen enthalten. Das sind die geladenen Formen von Pflanzennährstoffen, die Pflanzen aus dem Boden aufnehmen müssen, um zu wachsen. Kationen sind oft an Bodenpartikeln gebunden und werden durch den Ionenaustausch freigegeben, während Anionen meist frei in der Bodenlösung schweben. [Q11]

Das Aquaponikwasser enthält eine Vielzahl von gelösten Ionen, sowohl Kationen (positiv geladen) als auch Anionen (negativ geladen). Da in einem Aquaponik-System keine Erde vorhanden ist, gibt es auch keine Bodenpartikel, an die Nährstoffe (Kationen) gebunden sind. Deshalb gibt es auch keinen Ionenaustausch mit dem Boden. Die Nährstoffe sind bereits im Wasser gelöst und direkt verfügbar. Trotzdem geben die Wurzeln der Pflanzen im Aquaponik-System H^+ -Ionen ins Wasser ab, obwohl das auf den ersten Blick nicht notwendig erscheint. Dies geschieht, damit die Ladung ausgeglichen bleibt und passiert unabhängig davon, ob die Pflanzen in der Erde oder in der Aquaponik wachsen. Daraus ergibt sich, dass in der Aquaponik die Nährstoffverfügbarkeit höher ist, da die Nährstoffe in gelöster Form vorliegen, während in der Erde die Nährstoffe oft an Partikel gebunden sind und erst freigesetzt werden müssen. [Q12]

Da die Nährstoffe in Aquaponik-Systemen immer gelöst vorliegen, können die Pflanzen sie sofort aufnehmen. In der Erde hingegen müssen die Nährstoffe erst durch Wasser gelöst werden, damit die Pflanzen sie nutzen können. Bei Trockenperioden oder mangelhafter Bewässerung stehen die Nährstoffe zwar im Boden bereit, können aber nicht in das fehlende Bodenwasser übergehen und bleiben somit für die Pflanze vorübergehend unzugänglich. Dadurch variieren die Nährstoffverfügbarkeiten in bodengebunden Systemen, während in Aquaponik-Systemen die Nährstoffe direkt verfügbar sind, was eine schnellere Aufnahme ermöglicht und den Pflanzenwachstumsprozess beschleunigen kann. [Q15] [Q19]

Ein Beispiel aus der Praxis: Wenn man eine Pflanze aufpäppeln möchte, kann man sie in ein Glas mit einer Nährstofflösung stellen. Über Wochen hinweg kann man beobachten, wie sich die Wurzeln ausbilden, und das ganz ohne Erde. Mit einer richtig abgestimmten Nährstofflösung wird sichergestellt, dass die Pflanze wieder stark und kräftig wächst. So zeigen Nährlösungen deutlich, dass sie die Aufnahme von Nährstoffen enorm vereinfachen. Dies wird als hydroponische Pflanzenzucht bezeichnet.

In Aquaponik-Systemen dienen die Ausscheidungen der Fische als natürlicher Dünger, der von Bakterien in nutzbare Nährstoffe umgewandelt wird. So gelangen die Nährstoffe direkt ins

Wasser. Diese nimmt die Pflanze dann auf, während das Wasser durch eine Luftheberpumpe in Bewegung gehalten wird. Im Gegensatz zu herkömmlichen Anbaumethoden im Erdboden ist der Nährstofftransport im Wasser effizienter und wird nicht durch die Bodenverdichtung behindert. [Q5] [Q18]

3.3 Einfluss von pH-Wert, Makro- und Mikronährstoffen, Wasserqualität etc.

Makro- und Mikronährstoffe

Für das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen sind verschiedene Nährstoffe notwendig, die je nach benötigter Menge in Makro- und Mikronährstoffe unterteilt werden. Makronährstoffe braucht die Pflanze in großen Mengen. Sie müssen daher regelmäßig über Boden, Wasser oder Dünger bereitgestellt werden. Die Makronährstoffe unterscheidet man in Hauptnährstoffe und Sekundäre Makronährstoffe. Zu den Hauptnährstoffen zählen Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K). Diese Elemente benötigt die Pflanze unbedingt, da sie essenziell für das Pflanzenwachstum sind. Zu den Sekundären Makronährstoffen zählen Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Schwefel (S). Mikronährstoffe, auch als Spurenelemente bezeichnet, benötigt die Pflanze nur in sehr kleinen Mengen. Sie sind meist im Boden vorhanden und werden nur bei Mangel gezielt ergänzt, darunter zählen Eisen (Fe), Mangan (Mn), Zink (Zn), Kupfer (Cu), Bor (B), Molybdän (Mo), Chlor (Cl) und Nickel (Ni). [Q20] Ein Mangel an Mikro- oder Makronährstoffen kann zu Wachstumsstörungen führen. Überdüngung, besonders durch Mikronährstoffe, kann giftig sein. Somit sind Makronährstoffe für die Pflanzen essenziell, während Mikronährstoffe die Pflanzengesundheit unterstützen. [Q17] Neben Makro- und Mikronährstoffen nehmen Pflanzen noch weitere Elemente, die als "nützliche Elemente" bezeichnet werden, auf. Hierbei handelt es sich um Stoffe, die Pflanzen zwar aufnehmen und die Erträge, Qualität oder auch Stresstoleranz verbessern können, aber nicht lebensnotwendig für ihr Wachstum sind. Ihr Fehlen führt meist zu keinen eindeutigen Mangelsymptomen. Zu den natürlichen Elementen zählen Natrium (Na), Cobalt (Co), Selen (Se), Aluminium (Al) und Silizium (Si). [Q20]

Nitrat, Ammoniak/ Ammonium und Phosphat zählen zu den Haupt-Makronährstoffen, da sie Stickstoff und Phosphor liefern, also die Nährstoffe, die die Pflanze wirklich braucht. Pflanzen können nicht direkt elementaren Stickstoff (N₂) aus der Luft nutzen. Daher nehmen sie Stickstoff nur in bestimmten chemischen Formen auf. Nitrat oder auch Ammonium sind also die Form, in der der Nährstoff im Boden oder Wasser verfügbar ist. [Q22]

pH-Wert und Nährstoffverfügbarkeit

Die Konzentration von Makro- und Mikronährstoffen hat einen signifikanten Einfluss auf die Stabilität eines Aquaponik-Systems und gleichzeitig auf die Stabilität des Bodens in herkömmlichen Anbausystemen. Die Konzentration von Makro- und Mikronährstoffen wird vor allem durch den pH-Wert beeinflusst. [Q1] Bei einem hohen pH-Wert sinkt die Verfügbarkeit von Mikronährstoffen wie Eisen, Mangan, Zink und Kupfer, so dass sie bei einem zu hohen pH-Wert sogar ganz ausfallen können. Während bei einem niedrigen pH-Wert die Verfügbarkeit von Kalium, Schwefel, Calcium und Magnesium eingeschränkt sein kann. Bei einem niedrigen pH-Wert sind also viele Makronährstoffe schlechter verfügbar. [Q12]

Der pH-Wert gibt an, wie sauer oder basisch das Wasser oder der Boden ist. Er spielt in vieler Hinsicht eine wichtige Rolle, da er unter anderem das Gleichgewicht zwischen Anionen und Kationen im Boden bzw. Wasser beeinflusst, was sehr wichtig ist. Durch die Abgabe von Wasserstoff (H^+) durch die Pflanzen kann der lokale pH-Wert im Boden bzw. im Wasser sinken, wodurch bestimmte Kationen wie Kalium, Magnesium, Calcium und Ammonium freigesetzt werden. [Q11]

In sauren Böden/ Wasser gibt es von Natur aus oder durch Umwelteinflüsse sehr viele H^+ -Ionen. Die Pflanze selbst gibt auch H^+ -Ionen ab, aber das Problem in sauren Böden/ Wasser ist die hohe Menge der H^+ -Ionen insgesamt, nicht nur was die Pflanze abgibt. Denn H^+ -Ionen konkurrieren mit Nährstoff-Ionen (wie Nitrat, Kalium, Calcium) um Bindestellen an den Bodenpartikeln. Wenn zu viele H^+ -Ionen vorhanden sind, werden zu viele Nährstoffe gleichzeitig aus den Partikeln gelöst, aber dadurch gehen einige Nährstoffe in Formen über, die Pflanzen schlechter oder gar nicht mehr aufnehmen können. Außerdem arbeiten Bodenmikroorganismen (z.B. nitrifizierende Bakterien), die z.B. Nitrat bilden, weniger effizient. Im neutralen pH-Bereich (~ 7) läuft der Austausch kontrolliert ab. Es werden genug Nährstoffe gelöst, aber sie bleiben aufnehmbar für die Pflanzen. In sauren Böden/ Wasser ist der "Konkurrenzkampf" zwischen H^+ -Ionen und Nährstoffen zu stark, so dass das chemische Gleichgewicht gestört ist. Pflanzen bekommen dadurch weniger verfügbaren Stickstoff und andere Nährstoffe. Der pH-Wert des Bodens bzw. Wassers entscheidet, ob Nährstoffe verfügbar sind. [Q23]

Ein zu saurer oder zu alkalischer (basisch) pH-Wert führt zu Blockierungen. Daher ist es wichtig, den pH-Wert von seinem Anbausystem regelmäßig zu überprüfen, da pH-Abweichungen die Hauptursache für ein nicht funktionierendes System sind.

Der pH-Wert spielt eine zentrale Rolle dabei, wie gut Pflanzen Nährstoffe aufnehmen können. Er beeinflusst, wie gut Nährstoffe im Boden oder Wasser gelöst werden können und steuert damit deren Verfügbarkeit und Freisetzung. Nur wenn der pH-Wert im optimalen Bereich liegt,

sind die Nährstoffe für die Wurzeln tatsächlich verfügbar. [Q14] Neben dem pH-Wert beeinflussen auch andere Faktoren, wie die Bodenbeschaffenheit, die Nährstoffaufnahme. [Q20]

Wasserqualität in Aquaponik-Systemen

Die Wasserqualität kann die Nährstoffverfügbarkeit ebenfalls beeinflussen, beispielsweise durch die elektrische Leitfähigkeit des Wassers. [Q10] Für Aquaponik-Anlagen ist Leitungswasser besonders geeignet, da es wichtige Faktoren erfüllt, wodurch es sowohl für Pflanzen als auch für Fische geeignet ist. Leitungswasser ist meist sehr sauber und enthält keine Giftstoffe oder Schadstoffe. Zudem sind wichtige Mineralien enthalten, die für die Nährstoffversorgung der Pflanzen beitragen. Diese Mineralien sind im Leitungswasser konstant verfügbar. [Q24] Das Wasser enthält gelöste Salze, also Mineralien wie Calcium, Magnesium und Natrium. Diese sind auch für die elektrische Leitfähigkeit entscheidend. Da diese Mineralien als gelöste Ionen Strom leiten, gilt: Je mehr gelöste Mineralien vorhanden sind, desto höher ist die Leitfähigkeit. Die Leitfähigkeit ist dabei ein gutes Anzeichen dafür, dass Nährstoffe im Wasser vorhanden sind. [Q25] Zudem besitzt Leitungswasser einen geeigneten pH-Wert, der zwischen 7 und 8,5 liegt. Denn ein optimaler pH-Wert für Pflanzen liegt zwischen 6,5 und 7,5. [Q15] Um den optimalen pH-Wert bei einer Aquaponik-Anlage zu halten, wird dieser durch die Zugabe von Ca(OH)_2 und KOH reguliert. [Q1] In der Anlage werden durch den Einsatz verschiedener Säuren bestimmte Bakterienkulturen gefördert, die für die Umwandlung von Ammoniak aus dem Fischkot in Nitrat zuständig sind. Das ist wichtig für die Pflanzenernährung und die Wasserqualität. So bleibt die Wasserwerte stabil. [siehe Anhang: Notizen] Damit die Wasserqualität von Aquaponik-Anlagen zudem gut bleibt, müssen Gase wie Methan (CH_4), Kohlendioxid (CO_2), Schwefelwasserstoff (H_2S) und Stickstoff (N_2) regelmäßig ausgelüftet werden, z.B. durch eine Wasserpumpe. Denn die Wasserqualität beeinflusst die Gesundheit der Fische und die Effizienz des Systems. [Q1] zusätzlich kann die Wasserqualität, insbesondere ein erhöhter Gehalt an unerwünschten Ionen wie Natrium oder Bicarbonat, das Pflanzenwachstum beeinträchtigen. [Q12]

Destilliertes Wasser ist Wasser, das sich für kein System eignet, indem man in irgendeiner Art und Weise Pflanzen anbaut, da es keine Mineralien also Salze (Ionen) enthält.

Generell gilt: Ein gesunder Boden mit Humus und aktiven Mikroorganismen (Bodenlebewesen) sorgt für bessere Nährstoffaufnahme. Das gleiche Prinzip gilt für Aquaponik, auch hier ist eine gute nährstoffreiche Wasserqualität entscheidend. [Q26]

Damit wird deutlich, dass pH-Wert, Nährstoffgehalte und weitere Wasserparameter entscheidend für das Pflanzenwachstum und die Effizienz von Anbausystemen sind. [Q17]

4 Vergleich der Nährstoffgehalte in Pflanzen: Aquaponik vs. Erde

4.1 Ergebnisse aktueller Studien

Neuere Forschungen zeigen deutlich: Zwischen dem klassischen Anbau in Erde und erdlosen Systemen wie Aquaponik oder Hydroponik gibt es erhebliche Unterschiede. Diese zeigen sich vor allem beim Nährstoffgehalt, bei antioxidativen Inhaltsstoffen sowie bei der Effizienz, mit der Wasser und Nährstoffe genutzt werden. [Q17] [Q16]

Die Studien von Alizaeh et al. (2025) sowie Albadwawi et al. (2022) zeigen, dass Pflanzen aus Aquaponik-Systemen häufig höhere Werte an Makronährstoffen wie Stickstoff (N), Phosphor (P) und Magnesium (Mg) aufweisen, während Mikronährstoffe je nach Element variieren. Auffällig ist vor allem der höhere Stickstoffgehalt in Pflanzen aus Aquaponik-Anlagen (6,32% vs. 4,89% im Boden). Das liegt daran, dass die Pflanzen kontinuierlich mit Nährstoffen aus dem Fischkreislauf versorgt werden. Zusätzlich sorgt das geschlossene System für eine gleichmäßigere Verfügbarkeit der gelösten Nährstoffe im Wurzelbereich. Dadurch können die Pflanzen die Nährstoffe effizienter aufnehmen. [Q17] [Q15]

Die vergleichende Studie von Verdoliva et al. (2021) bestätigt diese Tendenzen am Beispiel von Tomaten. Unter kontrollierten Umweltbedingungen wurden Tomaten in Boden, Tropfbewässerungs-Hydroponik (DI) und Deep-Water-Culture (DWC) kultiviert. Die Erträge (Frischgewicht) waren in allen Systemen vergleichbar. Allerdings zeigten sich bei hydroponischen Systemen eine deutlich höhere Wassernutzungseffizienz (WUE) und teilweise auch höhere Werte an sekundären Pflanzenstoffen, vor allem bei Lycopin und β -Carotin. [Q16]

Insgesamt belegen die Untersuchungen, dass Aquaponik und Hydroponik ressourcenschonender sind und gleichzeitig das Potenzial haben, Pflanzen mit vergleichbarer oder sogar besserer Nährstoffqualität zu produzieren als der traditionelle Anbau in Erde. [Q17] [Q16]

4.2 Analyse ausgewählter Pflanzen (z. B. Salat, Kräuter, Tomaten)

Basilikum und Blattgemüse

In der Studie von Albadwawi et al. (2022) wurde Basilikum in Aquaponik- und Bodensystemen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass Basilikum aus Aquaponik-Systemen deutlich höhere Werte an Stickstoff (6,32 %) und Phosphor (1,70 %) aufwies als Bodenpflanzen. Gleichzeitig waren die Werte an Mikronährstoffen wie Eisen (Fe) und Mangan (Mn) im Bodenanbau teilweise höher. Daraus lässt sich schließen, dass Aquaponik vor allem das Wachstum und die Proteinbildung begünstigt. Wie gut einzelne Spurenelemente aufgenommen werden, hängt dagegen stärker davon ab, in welchem Material die Pflanze wächst. Die Zusammensetzung

des Wurzelbereiches spielt ebenfalls eine Rolle. Denn aquaponische Systeme enthalten aktive Mikroorganismen, die die Verfügbarkeit von Nährstoffen beeinflussen können. [Q17]

Tomaten

Die kontrollierte Vergleichsstudie von Verdoliva et al. (2021) liefert besonders aussagekräftige Ergebnisse für Tomaten. Während Ertrag, Zuckergehalt (TSS) und Biomasse in allen Systemen ähnlich waren, unterschieden sich die Systeme deutlich beim Wasserverbrauch und bei den antioxidativen Inhaltsstoffen. [Q16]

Tomaten aus dem DWC-System zeigten im Gewächshausversuch: Einen mehr als doppelt so hohen Lycopingehalt (0,16 mg/100 mL) im Vergleich zu bodengebundenem Anbau (0,06 mg/100 mL), deutlich höhere β -Carotin-Werte und eine deutlich höhere Wassernutzungseffizienz. [Q16]

Die Ergebnisse machen deutlich, dass erdlose Systeme keineswegs zu Qualitätsverlusten führen müssen. Im Gegenteil können sie die Bildung gesundheitsfördernder Inhaltsstoffe sogar gezielt anregen. [Q16]

4.3 Darstellung und Auswertung (Tabellen)

In den Tabellen der ausgewerteten Studien werden die Unterschiede zwischen den Anbausystemen anhand von Messwerten deutlich. [Q17] [Q16]

Die Makronährstofftabelle aus der Basilikum-Studie von Albadwawi et al. (2022) zeigt, dass Aquaponik-Systeme insbesondere bei Stickstoff (N: 6,32% vs. 4,89% im Boden) und Phosphor (P: 1,70% vs. 0,99% im Boden) gut abschneiden, während Calcium (Ca) und einige Mikronährstoffe im Bodenanbau höhere Werte erreichen. Das deutet darauf hin, dass Nährstoffe in den verschiedenen Systemen unterschiedlich verfügbar sind und sich unterschiedlich verhalten. [Q17] [siehe Tab. 1]

Die Daten in der Studie von Verdoliva et al. (2021) machen deutlich: Tomatenpflanzen im Bodenanbau verbrauchten in beiden Versuchen am meisten Wasser (bis zu 102,9 L pro Pflanze), während DWC-Systeme durchweg mit den niedrigsten Werten abschnitten. Gleichzeitig blieb der Ertrag vergleichbar, wodurch sich die Wassernutzungseffizienz deutlich verbesserte. [Q16] [siehe Tab. 2]

Die Tabellenwerte zu Lycopin, β -Carotin und TAA zeigen, dass hydroponisch angebaute Tomaten – insbesondere im DWC-System – stärker antioxidativ wirken. Diese Unterschiede sind statistisch signifikant und lassen sich nicht durch zufällige Schwankungen erklären. [Q16] [siehe Tab. 3]

4.4 Diskussion der Ergebnisse

Die ausgewerteten Studien zeigen insgesamt, dass Aquaponik- und Hydroponik-Systeme dem klassischen Bodenanbau in mehreren wichtigen Punkten überlegen sind. Das zeigt sich besonders beim effizienten Umgang mit Ressourcen, vor allem mit Wasser, sowie bei der gezielten Kontrolle der Nährstoffzufuhr. [Q17] [Q16]

Die höheren Werte an Lycopin und β -Carotin in hydroponisch angebauten Tomaten lassen sich möglicherweise durch leichten abiotischen Stress erklären, der die Bildung antioxidativer Schutzstoffe anregt. Leichter Stress dieser Art begünstigt die Produktion sekundärer Pflanzenstoffe, ohne das Pflanzenwachstum negativ zu beeinträchtigen. Dabei blieb der Ertrag der Pflanzen unverändert, was zeigt, dass sich diese Stressreaktionen nicht negativ auf das Wachstum auswirken. [Q16]

Die Ergebnisse widerlegen die häufige Annahme, dass der Anbau in Erde grundsätzlich „natürlicher“ oder qualitativ besser sei. Tatsächlich können kontrollierte erdlose Systeme Pflanzen produzieren, die mindestens gleichwertig oder sogar nährstoffreicher sind. Gerade Aquaponik zeigt durch den geschlossenen Nährstoffkreislauf, wie sich ökologische Nachhaltigkeit und hohe Produktqualität in einem System vereinen lassen. [Q17] [Q16]

Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die ausgewerteten Studien unter bestimmten klimatischen und experimentellen Rahmenbedingungen abliefen. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Pflanzenarten oder Anbaugelände ist daher nur begrenzt möglich und bedarf weiterer Forschung. [Q17] [Q16]

Zusammenfassend zeigt sich, dass Aquaponik im Vergleich zum traditionellen Bodenanbau vielversprechende Perspektiven für die zukünftige Pflanzenproduktion eröffnet. Das gilt sowohl für die Nachhaltigkeit als auch für den Nährwert der produzierten Pflanzen. [Q17] [Q16]

5 Bewertung und Diskussion

5.1 Chancen und Grenzen von Aquaponik-Systemen

Aquaponik bietet verschiedene Chancen. Eine einfache Bauweise der Anlage ist besonders wichtig, damit mehr Menschen in die Aquaponik einsteigen können, ohne abgeschreckt zu werden. Komplexität sollte möglichst vermieden werden, um das System zugänglicher zu machen. Außerdem gibt es viele unterschiedliche Arten von Aquaponik, was bedeutet, dass fast jeder ein passendes System finden kann – je nach Platz, Klima oder Zielsetzung. Neben der

klassischen Aquaponik existieren auch Varianten wie Wurmponik oder Erzponik, wodurch das System sehr flexibel einsetzbar ist. [\[siehe Anhang: Notizen\]](#)

Ein weiterer Vorteil ist die potenziell höhere Pflanzenqualität und das bessere Wachstum, das durch die konstante Nährstoffverfügbarkeit erreicht wird. [\[Q17\]](#) Darüber hinaus werden weniger Pestizide benötigt, da das System in sich geschlossen ist. [\[Q19\]](#)

Eine weitere Chance, die sich durch die besondere Kennzeichnung von Aquaponik-Produkten im Supermarkt ergibt – zum Beispiel mit dem Hinweis „Aus einer Aquaponik-Anlage aus Deutschland“ – ist, dass die Aufmerksamkeit auf nachhaltige Produktion gelenkt und die Akzeptanz erhöht wird. Durch die bewusste Unterstützung solcher Produkte könnte die Aquaponik-Branche wachsen. Mehr Menschen würden sich für diese Anbaumethode interessieren und langfristig könnten Aquaponik-Anlagen sogar ganzjährig frische Lebensmittel liefern – auch im Winter, unabhängig von natürlichen Boden- oder Wetterbedingungen. [\[siehe Anhang: Notizen\]](#)

Trotz dieser Chancen gibt es auch einige Grenzen. Der Start einer Aquaponik-Anlage ist sehr zeitintensiv, was viele potenzielle Nutzer abschrecken kann. Besonders in der Anfangsphase sind Geduld und Aufmerksamkeit erforderlich. Zudem muss man sich intensiv mit dem Thema auseinandersetzen, da das System sonst langfristig nicht stabil funktioniert. Dazu gehört unter anderem der richtige Umgang mit den nützlichen Bakterien, insbesondere deren gezielte Aktivierung in der Anfangsphase, um den Stickstoffkreislauf korrekt in Gang zu setzen. Wer selbst eine Anlage startet, sollte sich bewusst sein, dass zu Beginn viel ausprobiert werden muss, bis alle Prozesse stabil laufen. Die Lernkurve ist steil und Fehler gehören insbesondere in der Anfangsphase zum Lernprozess dazu. [\[siehe Anhang: Notizen\]](#)

Hinzu kommen die hohen Anschaffungskosten, die als Hürde wirken können. [\[Q2\]](#) Die Anfangsinvestitionen in die Systeminfrastruktur sind erheblich und können abschreckend sein. [\[Q17\]](#) [\[Q18\]](#) Außerdem besteht eine Abhängigkeit von kontrollierten Bedingungen und externen Ressourcen wie Strom für Pumpen und Belüftung. [\[Q2\]](#) [\[Q17\]](#) Die Systemkomplexität zeigt sich auch in der Notwendigkeit einer genauen Nährstoffüberwachung und der möglichen Abhängigkeit von einer Nährstoffsupplementierung für optimale Erträge. [\[Q18\]](#) [\[Q19\]](#) Potenziell niedrigere Nährstoffkonzentrationen in Aquaponik-Systemen können zudem das Pflanzenwachstum verlangsamen. [\[Q19\]](#)

5.2 Relevanz für Ernährung und Umwelt

Aquaponik-Systeme spielen für die Ernährung eine wichtige Rolle, da sie die Produktion von Pflanzen und Fischen gleichzeitig ermöglichen. Man erhält also hochwertige Kräuter und Ge-

müse sowie Fisch aus einem System, welches natürlich zur Nahrungsmittelproduktion beiträgt und die Ernährungssicherheit unterstützt. [Q1] [Q17]

Im Vergleich zur herkömmlichen Landwirtschaft stellen Aquaponik-Systeme eine nachhaltige Alternative dar. Sie wirken sich positiv auf Umwelt und Ressourcen aus, weil Wasser und Nährstoffe effizienter genutzt werden. [Q2] [Q18] Dadurch sinkt nicht nur der Ressourcenverbrauch, sondern auch die Umweltbelastung insgesamt. [Q18]

Was die Umwelt betrifft, bringen Aquaponik-Systeme einige Vorteile mit sich. Besonders hervorzuheben ist die Wassereinsparung, (statt es einfach versickern zu lassen, bleibt es im Kreislauf und wird immer wieder verwendet) und der reduzierte Einsatz von Düngemitteln (die Fische produzieren durch ihre Ausscheidungen selbst den Dünger für die Pflanzen), wodurch der Umweltschutz gefördert wird. [Q17] Durch die Verringerung des Wasser- und Düngemittelverbrauchs sowie die Minimierung von Wasserverschmutzung erweist sich das System als besonders umweltfreundlich. [Q19] Hinzu kommt, dass kaum Abfall anfällt, da Fische und Pflanzen in einem geschlossenen System zusammenleben und alle anfallenden organischen Stoffe bzw. Nährstoffe gegenseitig verwertet werden: Fischabfälle dienen den Pflanzen, pflanzliche Reste kommen den Fischen zugute, was die Umwelt zusätzlich entlastet. [Q1]

Darüber hinaus fördert Aquaponik die lokale Nahrungsmittelproduktion, da sie nicht viel Platz benötigt und überall aufgestellt werden kann. Dadurch werden Importe und lange Transportwege reduziert und somit weniger CO₂-Emissionen erzeugt, was sowohl zur Ernährungssicherheit als auch zum Umweltschutz beiträgt. [Q2] Insgesamt lässt sich festhalten, dass Aquaponik-Systeme für Ernährung und Umwelt eine sinnvolle und nachhaltige Lösung darstellen.

5.3 Aquaponik im urbanen Raum – kann sie mit dem traditionellen Anbau mithalten?

Vor dem Hintergrund wachsender Städte und begrenzter landwirtschaftlicher Flächen gewinnt Aquaponik im urbanen Raum zunehmend an Bedeutung. Aus Sicht des Betreibers hat das System großes Potenzial, weil es wenig Platz benötigt und ganz ohne Erde auskommt. [siehe Anhang: Notizen] Die Platzersparnis ist dabei ein wichtiger Punkt, denn Aquaponik-Anlagen lassen sich platzsparend aufbauen und können deshalb auch in städtischen Gebieten oder auf begrenztem Raum eingesetzt werden. [Q2]

Im städtischen Bereich kann Aquaponik tatsächlich eine realistische Alternative zum traditionellen Anbau sein. Die Platzausnutzung funktioniert sehr effizient, weil man auf kleinstem Raum ein Gartenbeet und eine Fischzucht kombinieren kann. In Städten lassen sich solche Anlagen sogar auf Dächern oder in Leerständen – also ungenutzten Flächen, die dadurch revitalisiert werden – installieren, wodurch das Potenzial noch weiter erhöht wird. [Q2] Dabei

braucht Aquaponik wirklich nur sehr wenig Land – etwa 0,05 Hektar reichen bereits aus – und bietet gleichzeitig immer die gleichen Produktionsbedingungen. Dies ist ein großer Vorteil. Außerdem passt sich das System an verschiedene Betriebsgrößen an, wodurch es sehr flexibel einsetzbar ist. [Q1] Besonders für Länder oder Regionen mit wenig Anbauflächen (z.B. Wüstenregionen), schnellen Umweltveränderungen oder zunehmender Ernährungsunsicherheit ist Aquaponik deshalb empfehlenswert. [Q15]

Was die Leistung im Vergleich zum traditionellen Anbau angeht, kann Aquaponik diesen durchaus übertreffen, sowohl beim Ertrag als auch bei der Pflanzenqualität. Ein konkretes Beispiel ist Basilikum. Unter Aquaponik-Bedingungen bringt die Pflanze 1,8 kg pro Quadratmeter, im Bodenanbau sind es dagegen nur 0,6 kg. Gerade in urbanen Gebieten, wo die landwirtschaftliche Fläche begrenzt ist, können durch Aquaponik also höhere Erträge erzielt werden. [Q17] Auch Blattsalat profitiert davon, denn er wächst im Aquaponik-System besser als in anderen Anbausystemen. Generell lässt sich sagen, dass Aquaponik im urbanen Raum uneingeschränkt einsetzbar ist und eine realistische Alternative darstellt, vor allem für Kräuter und Blattsalate. [Q18]

Allerdings gibt es auch Einschränkungen. Aquaponik funktioniert vor allem gut bei Blattgemüse mit kurzer Anbauzeit, das keine Früchte bildet. Salat ist dafür ein gutes Beispiel. Bei solchen Pflanzen sind die Nährstoffe aus dem Fischwasser ausreichend, sodass keine weiteren Zusätze notwendig sind. Das bedeutet aber auch, dass Aquaponik nicht unbedingt für alle Pflanzenarten gleich gut geeignet ist, vor allem anspruchsvollere Arten oder Pflanzen, die Früchte tragen, stoßen an ihre Grenzen. [Q13]

Alles in allem zeigt sich, dass Aquaponik im urbanen Raum eine realistische und vielversprechende Alternative zum klassischen Anbau ist, die ähnliche oder sogar bessere Erträge liefert und dabei ressourceneffizient arbeitet.

5.4 Kritische Betrachtung offener Fragen

Trotz der vielen Vorteile, die Aquaponik mit sich bringt, gibt es auch noch einige Probleme und offene Fragen, die man nicht einfach ignorieren sollte und kann.

Probleme bei Aquaponik

Ein besonders wichtiges Problem, das nach wie vor ungelöst ist, betrifft die Styroporplatten, die in vielen Raft-Systemen als Trägermaterial verwendet werden. Wie bereits erwähnt, nehmen die Wurzeln der Pflanze giftige Stoffe aus dem Styropor auf, und bei beschädigtem Material kann sich Mikroplastik im Wasser absetzen. Das macht die Pflanzen unverkäuflich und zeigt, dass Aquaponik nicht automatisch nachhaltig ist. Allerdings ist das ein Problem, das nicht bei jeder Anlage auftritt – viele Betreiber nutzen gar kein Styropor – aber die meisten

verwenden dann trotzdem keine echte Alternative ohne Plastik. Das Hauptproblem besteht darin, dass es momentan keine vernünftige Alternative gibt, die alle Vorteile von Styropor mit sich bringt, aber ohne schädliche Stoffe auskommt. Hier besteht dringender Forschungsbedarf. [\[siehe Anhang: Notizen\]](#)

Neben diesem speziellen Problem gibt es noch weitere Herausforderungen. Ein großes Thema ist die Nährstoffversorgung bei anspruchsvollen Pflanzen. Auch wenn Aquaponik-Pflanzen im Vergleich zum Bodenanbau oft gut mit Nährstoffen versorgt sind, reichen die Konzentrationen für maximales Wachstum manchmal nicht aus, besonders bei Pflanzen, die Früchte tragen. [\[Q13\]](#) In solchen Fällen muss man häufig Nährstoffe zusätzlich hinzufügen, um optimale Erträge zu erzielen. [\[Q18\]](#) Das Fischwasser allein liefert dann nicht genug. [\[Q13\]](#) Im Vergleich zu reinen Hydroponik-Systemen, wo die Nährstofflösung präzise angepasst werden kann, sind die Nährstoffkonzentrationen in einem Aquaponik-System oft niedriger. [\[Q19\]](#)

Dazu kommt, dass das System richtig abgestimmt sein muss. Es muss gleichzeitig darauf geachtet werden, dass es den Fischen gut geht und die Pflanzen wachsen, was eine große Herausforderung darstellt. Die Wasserqualität muss dabei ständig im Blick behalten werden. [\[Q18\]](#) Man benötigt eine Überwachung in Echtzeit und muss die Nährstofflösungen regelmäßig testen, damit das System stabil läuft. [\[Q15\]](#) Auch der pH-Wert kann schwanken, was sowohl für die Fische als auch für die Pflanzen zum Problem werden kann. [\[Q13\]](#) Auch ein Stromausfall kann das ganze System zusammenbrechen lassen, weil Pumpe und Belüftung durchgehend laufen müssen. [\[Q2\]](#)

Offene Fragen bei Aquaponik

Es gibt noch einige offene Punkte, die die Forschung klären muss. Eine zentrale Frage ist die optimale Nährstoffversorgung: Wie stellt man die Nährstoffe so ein, dass alle Pflanzen optimal wachsen? Die Phosphornutzung in Kreislaufsystemen ist zum Beispiel noch nicht ausreichend erforscht. [\[Q2\]](#) Auch die Problematik, wann und ob es überhaupt nötig und sinnvoll ist, Nährstoffe hinzuzufügen, ist noch offen, vor allem bei Pflanzen, die Früchte tragen. [\[Q13\]](#) Geht es vielleicht auch ohne extra Nährstoffe, wenn man das System besser optimiert? [\[Q18\]](#)

Ein weiteres offenes Thema ist die Regulierung des pH-Werts, des Nitratspiegels sowie die optimale Fischdichte und Konkurrenz zwischen den Fischen. [\[Q2\]](#)

Die langfristige Wirtschaftlichkeit und die Frage, ob sich Aquaponik problemlos vergrößern lässt (Skalierbarkeit), sind ebenfalls noch große Fragezeichen. [\[Q2\]](#) [\[Q18\]](#) Die wirtschaftliche Tragfähigkeit sollte genauer untersucht werden. [\[Q19\]](#)

Außerdem gibt es noch viele offene Punkte dazu, wie verschiedene Fischarten das Pflanzenwachstum beeinflussen. Welche Fische-Pflanzen-Kombinationen passen am besten zusammen? Auch die vergleichende Forschung zu verschiedenen Systemtypen ist noch nicht abgeschlossen. [Q18] Es wäre sinnvoll, die Mineralien im Aquaponik-System kontinuierlich zu überwachen, um besser zu verstehen, wie effizient der Nährstoffkreislauf wirklich funktioniert. [Q19]

Abschließend zeigt sich, dass Aquaponik zwar großes Potenzial hat, aber es müssen noch einige technische, ökologische und wirtschaftliche Fragen geklärt werden, bevor das System wirklich flächendeckend eingesetzt werden kann.

5.5 Exkurs: Eigener Versuch – Stabilität eines geschlossenen Ökaponik-Systems

5.5.1 Zielsetzung und Versuchsaufbau

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein einfaches Ökaponik-System aufgebaut, um das Verhalten eines geschlossenen Kreislaufs zu untersuchen, insbesondere seine Fähigkeit zur Selbstregulation nach einer gezielten Störung. Denn direkt zu Beginn des Experiments wurde absichtlich eine Überdüngung durchgeführt, um zu beobachten, ob das System in der Lage ist, sich langfristig ohne weitere Eingriffe selbst zu stabilisieren.

Das Ziel war es, herauszufinden, unter welchen Bedingungen Pflanzen optimal mit Nährstoffen versorgt werden und ob sich ein solches System mit der Zeit eigenständig regulieren kann. Über einen Zeitraum von mehreren Monaten (vom 21.11.2024 bis zum 12.11.2025) wurden regelmäßig verschiedene Wasserparameter gemessen. Dazu gehörten: der pH-Wert, der Nitratgehalt, der Phosphatgehalt, der Ammoniumgehalt sowie die elektrische Leitfähigkeit (EC) und die Temperatur. Die Messungen erfolgten mit dem VISOCOLOR School Analysenkoffer sowie einem Leitwertmessgerät EC-3.

Am 05.12.2024 wurden die ersten Schnecken in das System eingesetzt. Fische kamen erst einige Monate später, im Frühjahr 2025 (etwa zwischen März und Mai), dazu. In den Monaten ohne Fische wurde der Fischkot durch Dünger imitiert, damit die Pflanzen alle nötigen Nährstoffe erhalten konnten. Mit dem Einsetzen der Fische wurde bewusst gewartet, bis das Wasser wärmer und besser geeignet war, um die Fische nicht unnötig zu belasten.

Die vollständigen Messdaten, sowie Fotos des Versuchsaufbaus und der Pflanzenentwicklung finden sich im Anhang. [siehe Eigenanteil]

5.5.2 Messergebnisse und Beobachtungen

Die Messergebnisse zeigten einen wechselhaften Verlauf der Systementwicklung. Nach der anfänglichen Überdüngung war der Nitratwert über mehrere Wochen erhöht und zeigte keine nennenswerte Abnahme. Am 18.12.2024 lag der Nitratwert bei 5 mg/L, stieg am 03.01.2025 auf 8 mg/L und erreichte am 13.02.2025 sogar einen Spitzenwert von 25 mg/L. Der pH-Wert stieg im gleichen Zeitraum zunächst an, von anfänglich 7,5 auf 9 am 03.01.2025, und fiel dann wieder leicht auf 8 am 13.02.2025. Die elektrische Leitfähigkeit stieg ebenfalls kontinuierlich an und deutete auf ein dauerhaft hohes Salzgehaltsniveau hin: von 0,87 ms am 21.11.2024 auf 1,24 ms am 27.03.2025. Die Wassertemperatur blieb über die Monate hinweg relativ konstant und schwankte nur gering zwischen 19°C und 22°C.

Die mit „–“ gekennzeichneten Werte in der Messtabelle wurden nicht gemessen, da Temperatur und Leitfähigkeit sehr ähnlich zum vorherigen Messtag waren und daher davon ausgegangen wurde, dass Ammonium, Nitrat, Phosphat und der pH-Wert den letzten Messdaten entsprechen. Ein signifikanter Unterschied war nicht zu erwarten.

In dieser instabilen Phase zeigten die Pflanzen auf der Plattform oberhalb des Wassers Probleme. Am 23.01.2025 waren viele dieser Pflanzen bereits abgestorben, während sich gleichzeitig ein deutlicher Schneckenüberschuss entwickelte.

Eine überraschende Wendung ergab sich nach den Sommerferien am 17.09.2025: Über sechs Wochen hinweg wurde sich nicht um das Ökoponik-System gekümmert – keinerlei Eingriffe, keine Messungen, keine Düngerzugabe. Bei der rein visuellen Überprüfung stellte sich heraus, dass kaum Fische gestorben waren und die Wasserqualität insgesamt sehr gut aussah (das Wasser war klar und frei von Trübungen). Alle Pflanzen unter Wasser, insbesondere die Wasserpest, wirkten gesund und zeigten einen kräftigen Grünton. Die Pflanzen auf der Plattform oberhalb des Wassers waren dagegen vollständig abgestorben, vermutlich, weil sie für dieses System nicht geeignet waren. Abgesehen davon, sah das Ökoponik-System zu diesem Zeitpunkt noch nie so gut und gesund aus wie zu diesem Zeitpunkt. Dies war der längste Zeitraum, in dem nicht in das System eingegriffen wurde und es zeigte deutlich, dass es sich tatsächlich um ein geschlossenes, sich selbst regulierendes System handelt.

Bei der Endmessung am 12.11.2025 zeigten sich stabile Werte, die auf ein Gleichgewicht hindeuteten: Der Nitratwert lag bei 5 mg/L, der Ammoniumwert bei 0,75 mg/L, der Phosphatwert bei 1 mg/L und die Leitfähigkeit bei 1,02 ms. Der pH-Wert hatte sich bei 7 stabilisiert, und die Wassertemperatur betrug 20,6°C. Die Blätter der Wasserpflanzen wirkten sehr kräftig und stabil, hatten zahlreiche neue Blätter gebildet und zeigten ein schönes, dunkles Grün. Die Pflanzen wuchsen weiterhin in die Höhe und erschienen insgesamt sehr gesund und stabil.

5.5.3 Interpretation im Kontext der Nährstoffverfügbarkeit

Die Ergebnisse dieses Versuchs liefern wichtige Erkenntnisse für die Bewertung von Aquaponik-Systemen im Hinblick auf Nährstoffverfügbarkeit und Systemstabilität.

Zunächst zeigte sich, dass das System nach der Überdüngung über mehrere Monate hinweg keine Selbstregulierung erreichte. Der anhaltend hohe Nitratwert, die pH-Schwankungen und die steigende Leitfähigkeit deuteten darauf hin, dass das System ohne aktive Kontrolle nicht in der Lage war, sich zu stabilisieren. Diese Phase unterstreicht die Notwendigkeit einer aktiven Systemkontrolle bei solchen Kreislaufsystemen – insbesondere dann, wenn kein biologisches Filtersystem wie in der Aquaponik vorhanden ist.

Die entscheidende Erkenntnis kam jedoch nach den Sommerferien: Über sechs Wochen ohne jegliche Eingriffe hatte sich das System offenbar selbst stabilisiert. Die Wasserqualität war sehr gut, die Unterwasserpflanzen wuchsen gesund und kräftig. Dies zeigt, dass geschlossene Ökaponik-Systeme durchaus in der Lage sind, sich selbst zu regulieren, allerdings unter bestimmten Bedingungen und möglicherweise erst nach einer längeren Einlaufphase. Erst als das Ökosystem sich selbst reguliert hatte und im Gleichgewicht war, konnten die Pflanzen gesund wachsen. Dies deutet darauf hin, dass erst bei einem stabilen System alle Prozesse optimal ablaufen können.

Für den Vergleich von Nährstoffgehalten in Pflanzen, wie er in Kapitel 4 dieser Arbeit durchgeführt wurde, bedeutet dies: Nur Systeme mit stabilen Wasserparametern liefern verlässliche Ergebnisse. Die Schwankungen in den ersten Monaten hätten vermutlich zu uneinheitlichen Nährstoffgehalten in den Pflanzen geführt. Erst als sich das System selbst reguliert hatte (erkennbar an der gesunden Pflanzenentwicklung und den relativ stabilen Werten bei der Endmessung) waren aussagekräftige Vergleiche mit dem traditionellen Bodenanbau möglich.

Diese Erkenntnisse lassen sich auf Aquaponik-Systeme übertragen: Nur wenn stabile Wasserwerte herrschen, können Pflanzen in Aquaponik-Systemen genauso nährstoffreich wachsen wie im traditionellen Landanbau. Die anfänglichen Schwierigkeiten mit hohen Nitratwerten und pH-Schwankungen verdeutlichen, warum eine präzise Überwachung und Steuerung notwendig ist. Gleichzeitig zeigt die spätere Stabilisierung des Systems, dass solche Kreislaufsysteme, wenn sie einmal im Gleichgewicht sind, durchaus das Potenzial haben, nachhaltig und mit minimalen Eingriffen zu funktionieren.

6 Fazit

Diese Arbeit hat untersucht, inwiefern sich die Nährstoffgehalte von Pflanzen aus Aquaponik-Systemen im Vergleich zum traditionellen Anbau in der Erde unterscheiden. Die Analyse aktueller Studien sowie ein eigener Versuch mit einem Ökaponik-System haben gezeigt, dass die Antwort auf diese Frage differenziert betrachtet werden muss.

Zentrale Erkenntnis

Die wichtigste Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass Aquaponik-Systeme nur dann ihr volles Potenzial entfalten können, wenn stabile Wasserwerte herrschen. Der eigene Versuch mit dem Ökaponik-System hat dies eindrücklich gezeigt. Denn erst als sich das System nach mehreren Monaten von selbst stabilisiert hatte (erkennbar an ausgeglichenem pH-Wert, konstanter Leitfähigkeit und stabilen Nährstoffkonzentrationen) entwickelten sich die Pflanzen wirklich gesund und kräftig. Instabile Bedingungen in der Anfangsphase hingegen führten zu deutlichen Wachstumsproblemen und vermutlich auch zu uneinheitlichen Nährstoffgehalten in den Pflanzen.

Nährstoffgehalte – Aquaponik kann mithalten

Die ausgewerteten Studien zeigen, dass Pflanzen aus Aquaponik-Systemen durchaus ähnliche oder sogar höhere Nährstoffgehalte aufweisen können als Pflanzen aus dem Bodenanbau. Basilikum aus Aquaponik wies beispielweise signifikant höhere Werte bei Stickstoff und Phosphor auf, während Tomaten in hydroponischen Systemen deutlich mehr Lycopin und β -Carotin enthielten. Dies gilt allerdings nur dann, wenn das System stabil läuft und die Wasserparameter kontrolliert werden. Im Vergleich zur reinen Hydroponik, wo die Nährstofflösung gezielt angepasst werden kann, sind die Nährstoffkonzentrationen in Aquaponik zwar etwas niedriger, jedoch immer noch klar über denen des Bodenbaus.

Die Nährstoffaufnahme funktioniert in Aquaponik-Systemen sogar effizienter als im Boden, da die Nährstoffe bereits im Wasser gelöst vorliegen und nicht erst durch Ionenaustausch freigesetzt werden müssen. Der Fischkot liefert dabei alle wesentlichen Nährstoffe, die sonst im Boden gespeichert wären. Diese direkte Verfügbarkeit ermöglicht eine schnelle Aufnahme und beschleunigt so das Pflanzenwachstum.

Grenzen und Herausforderungen

Trotz dieser Vorteile gibt es auch Grenzen. Aquaponik funktioniert besonders gut bei Kräutern und Blattgemüse, während anspruchsvollere Pflanzen, die Früchte tragen, häufig zusätzliche Nährstoffe brauchen. Die Systemkomplexität erfordert dabei Fachwissen und kontinuierliche Überwachung vor allem von pH-Wert, Nitrat und Leitfähigkeit. Hier können Sensoren eine wichtige Rolle spielen, um Wasserwerte durchgehend zu überwachen und das System stabil zu halten. Zudem bleibt das bisher ungelöste Problem der Styroporplatten als Trägermaterial, welches die Nachhaltigkeit von Aquaponik einschränken kann.

Potential für urbane Räume und Nachhaltigkeit

Für urbane Gebiete bietet Aquaponik erhebliches Potenzial. Sie benötigt wenig Platz, kommt ohne Erde aus, spart erheblich Wasser und ermöglicht eine ganzjährige lokale Lebensmittelproduktion. Die Erträge können den traditionellen Anbau dabei sogar übertreffen, z.B. Basilikum liefert in der Aquaponik etwa dreimal so viel Ertrag pro Quadratmeter wie im Bodenanbau. Damit stellt Aquaponik durchaus eine realistische Alternative dar, gerade in Zeiten des Klimawandels und wachsender Städte.

Ausblick

Die Leitfrage dieser Arbeit lässt sich so beantworten: Pflanzen aus Aquaponik-Systemen können genauso nährstoffreich oder sogar nährstoffreicher sein als Pflanzen aus dem Bodenanbau, vorausgesetzt, dass stabile Wasserwerte gewährleistet sind. Diese Stabilität ist essenziell, damit alle Prozesse im System optimal ablaufen können. Die eingangs erwähnte Kritik gegenüber Aquaponik-Pflanzen ist somit nicht berechtigt, Aquaponik kann bei stabilen Bedingungen durchaus eine nährstoffreiche und gesunde Ernährung gewährleisten.

Für die Zukunft besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Es müssen nachhaltige Alternativen zu Styropor gefunden, die optimale Nährstoffversorgung ohne Supplementierung erforscht und die langfristige Wirtschaftlichkeit größerer Anlagen untersucht werden. Dennoch zeigt sich schon jetzt, dass Aquaponik, sobald sie einmal im Gleichgewicht ist, das Potenzial hat, nachhaltig und mit minimalen Eingriffen zu funktionieren und damit einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Lebensmittelproduktion zu leisten.

Diese Arbeit hat mir verdeutlicht, wie wichtig es ist, nicht pauschal zu urteilen, nicht allein an Vertrautem festzuhalten und bereit zu sein, über traditionelle Grenzen hinauszudenken und sich auf Neues einzulassen. Nur so können wir zukunftsfähige Lösungen entwickeln.

7 Literaturverzeichnis

Monografien:

[Q1]

- James Rakocy et al.; Design and Operation of the UVI Aquaponic System; University of the Virgin Islands; St. Croix; o. J.; https://uvi.edu/files/documents/Research_and_Public_Service/WRRI/UVIAquaponicSystem.pdf (letzter Zugriff: 31.01.2026)

[Q2]

- Josef Triebl, Thomas Schützenhofer; Aquaponik - Ein innovatives Kreislaufsystem in der Land- und Fischereiwirtschaft; HBLFA Raumberg-Gumpenstein; Irdning-Donnersbachtal; 2023; https://raumberg-gumpenstein.at/downloads/FODOK/2023/fodok_0_28737_da_aquaponik_final_final.pdf (letzter Zugriff: 01.02.2026)

Zeitschriften:

[Q3]

- Neele Aris, Max Baumgardt; Aquaponik - Eine Alternative zur üblichen Landwirtschaft?; in: LdVC Science; Ausgabe 1; 2023; S. 49-58; https://www.ldvc.de/wp-content/uploads/2024/10/2023_LdVC-Science-Journal_01-23.pdf (letzter Zugriff: 20.12.2025)

[Q4]

- Deian Fitkievych; Ökoponik: Analyse eines Ökosystems; in: LdVC Science; Ausgabe 3; 2025; S. 1-12; https://www.ldvc.de/wp-content/uploads/2025/09/2025_LdVC-Science-Journal_03-25.pdf (letzter Zugriff: 20.12.2025)

[Q12]

- Noah James Langenfeld et al.; Principles of Nutrient and Water Management for Indoor Agriculture; in: Sustainability; Band 14; Ausgabe 16; 2022; <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/16/10204> (letzter Zugriff: 24.01.2026)

[Q15]

- Parviz Alizaeh et al.; Comparing yield, nutrient uptake and water use efficiency of Nasturtium officinale cultivated in aquaponic, hydroponic, and soil systems; in: Heliyon; Band 11; Ausgabe 3; 2025; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844025007194> (letzter Zugriff: 01.02.2026)

[Q16]

- Salvatore Gaetano Verdoliva et al.; Controlled comparisons between soil and hydroponic systems reveal increased water use efficiency and higher lycopene and β -carotene contents in hydroponically grown tomatoes; in: Scientia Horticulturae; Band 279; 2021; <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7885021/> (letzter Zugriff: 27.01.2026)

[Q17]

- Maryam A. O. K. Albadwawi et al.; A Comparative Evaluation of Aquaponic and Soil Systems on Yield and Antioxidant Levels in Basil, an Important Food Plant in Lamiaceae; in:

Agronomy; Band 12; Ausgabe 12; 2022; <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/12/3007>
(letzter Zugriff: 31.01.2026)

[Q18]

- Emmanuel Ayipio et al.; Comparisons between Aquaponic and Conventional Hydroponic Crop Yields: A Meta-Analysis; in: Sustainability; Band 11; Ausgabe 22; 2019; <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/22/6511> (letzter Zugriff: 01.02.2026)

[Q19]

- Nomnqophiso Zantanta et al.; Comparing Crop Yield, Secondary Metabolite Contents, and Antifungal Activity of Extracts of Helichrysum odoratissimum Cultivated in Aquaponic, Hydroponic, and Field Systems; in: Plants; Band 11; Ausgabe 20; 2022; <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/20/2696> (letzter Zugriff: 01.02.2026)

Videos:

[Q7]

- Lucas macht den Fisch; Die Probleme der Aquaponik (und wie man sie lösen kann); YouTube; 2021; <https://www.youtube.com/watch?v=zf49RqKmPG8> (letzter Zugriff: 30.12.2025)

[Q9]

- EinfachSchule; Wassertransport in Pflanzen - Wie trinken Pflanzen? - Wassertransport in Pflanzen einfach erklärt; YouTube; 2021; <https://www.youtube.com/watch?v=jS203rop-MUY> (letzter Zugriff: 03.01.2026)

Internetquellen:

[Q5]

- Verein Ökopolitik; Das System; ökopolitik.ch; o. J.; <https://ökopolitik.ch/die-anlage/> (letzter Zugriff: 13.01.2026)

[Q6]

- Verein Ökopolitik; Ein Ökosystem für zu Hause; ökopolitik.ch; o. J.; <https://ökopolitik.ch/> (letzter Zugriff: 04.11.2025)

[Q8]

- Alexander Stahr; Ionenaustausch; Ahabc.de; o. J.; <http://www.ahabc.de/bodeneigenschaften/ionenaustausch/> (letzter Zugriff: 13.01.2026)

[Q10]

- Pflanzenforschung.de; Nährstoff-/ Wasseraufnahme und -transport; o. J.; <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/naehrstoff-wasseraufnahme-und-transport-347> (letzter Zugriff: 24.01.2026)

[Q11]

- Huert HBG Dünger AG; Nährstoff-Elemente: So nehmen die Pflanzen sie auf; Huert; o. J.; <https://www.huert.com/ch-de/angebot/unternehmen/ratgeber/detail/naehrstoff-elemente-so-nehmen-die-pflanzen-sie-auf> (letzter Zugriff: 24.01.2026)

[Q13]

- Aqu@teach; Nutrient supply in aquaponics; Farm Hub; 2020; <https://learn.farmhub.ag/re-sources/aquateach/5-nutrient-water-balance/nutrient-supply-in-aquaponics> (letzter Zugriff: 01.02.2026)

[Q14]

- Katharina; pH-Wert & Pflanzenverfügbarkeit: Unser Crashkurs macht dich zum Bodenexperten!; Bloomify; 2021; <https://wissen.bloomify.de/wissen/artikel/ph-wert-pflanzenverfuegbarkeit> (letzter Zugriff: 24.01.2025)

[Q20]

- K+S Minerals and Agriculture GmbH (KALI Akademie); Alles rund um Nährstoffe und Nützliche Elemente – Makronährstoffe, Mikronährstoffe und nützliche Elemente; 2020; <https://www.kpluss.com/downloads/agriculture-wissensspeicher/de-wissensspeicher-naehrstoffe-mit-deckblatt.pdf> (letzter Zugriff: 24.01.2026)

[Q21]

- Pflanzenforschung.de; Primäre Makronährstoffe; o. J.; <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/primaeere-makronaehrstoffe> (letzter Zugriff: 03.01.2026)

[Q22]

- Pflanzenforschung.de; Stickstoffkreislauf; o. J.; <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/stickstoffkreislauf-291> (letzter Zugriff: 24.01.2026)

[Q23]

- Dr. Frank Lorenz; Grundlage der Bodenfruchtbarkeit – die Kalkung; Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Heimat; 2020; <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/bodenfruchtbarkeit-kalkung-grundlagen.html> (letzter Zugriff: 24.01.2026)

[Q24]

- Umweltbundesamt; Trinkwasser; 2019; <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/trinkwasser> (letzter Zugriff: 24.01.2026)

[Q25]

- test-wasser; Elektrische Leitfähigkeit im Wasser; o. J.; <https://www.test-wasser.de/elektrische-leitfaehigkeit-wasser> (letzter Zugriff: 24.01.2026)

[Q26]

- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL); Bedeutung des Humus für die Bodenfruchtbarkeit; o. J.; <https://www.lfl.bayern.de/iab/boden/031125/> (letzter Zugriff: 24.01.2026)

8 Anhang

1. Abbildung: eigene Aquaponik-Anlage

Foto 1 (Quelle: Eigene Aufnahme)



Foto 2 (Quelle: Eigene Aufnahme)



Foto 3 (Quelle: Eigene Aufnahme)



2. Abbildung: eigene Ökoponik-Anlage

Foto 1 (Quelle: Eigene Aufnahme)



Foto 2 (Quelle: Eigene Aufnahme)



3. Abbildung: Besuch einer Aquaponik-Anlage (03.07.2025) → Styroporplatten

Foto 1 (Quelle: Eigene Aufnahme)



4. Abbildung: Sprossachse

(Quelle: Schulisches Arbeitsblatt, eigene Beschriftung)

Das folgende Bild zeigt einen schematischen Querschnitt durch eine Sprossachse.

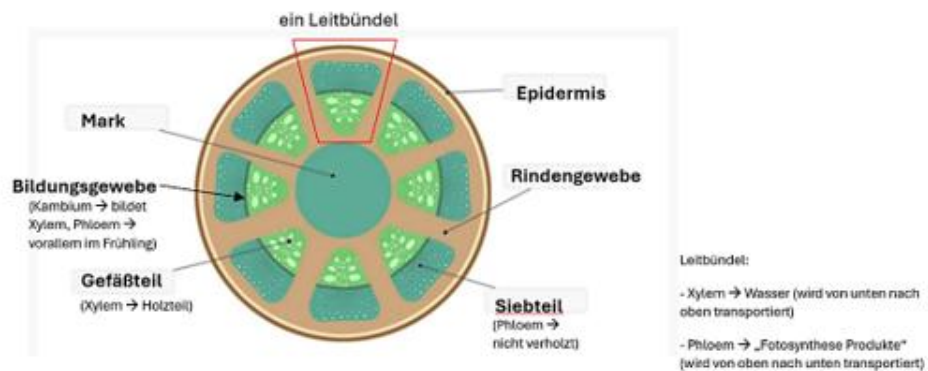


Tabelle 1: Makronährstoffe Basilikum [Q17]

Table 3. Macronutrients (%) and micronutrients (mg kg⁻¹) in basil leaves under soilless (aquaponic) and soil systems at 70 DAS.

Nutrients	Growth Systems	
Macronutrients (%)	Aquaponics	Soil
Nitrogen (N)	6.32 ± 0.09 ^a	4.89 ± 0.11 ^b
Phosphorus (P)	1.70 ± 0.05 ^a	0.99 ± 0.0 ^b
Potassium (K)	0.69 ± 0.02 ^a	0.71 ± 0.02 ^a
Magnesium (Mg)	0.59 ± 0.01 ^a	0.38 ± 0.0 ^b
Calcium (Ca)	2.81 ± 0.11 ^a	2.87 ± 0.13 ^a
Sulphur (S)	0.29 ± 0.01 ^a	0.29 ± 0.01 ^a
Micronutrients (mg kg ⁻¹)		
Boron (B)	41.9 ± 1.70 ^a	34.9 ± 1.10 ^b
Copper (Cu)	13.4 ± 0.86 ^a	13.8 ± 0.64 ^a
Iron (Fe)	95.2 ± 4.10 ^a	97.2 ± 2.70 ^b
Manganese (Mn)	99.8 ± 10.50 ^a	87.7 ± 2.40 ^b
Sodium (Na)	88.6 ± 13.50 ^a	74.0 ± 6.10 ^b
Zinc (Zn)	51.1 ± 5.30 ^a	61.1 ± 1.80 ^b

Values are given as mean ± SD of seven samples in each group. Values that do not share a common superscript (a,b) differ significantly at $p \leq 0.05$ using *t*-test.

Tabelle 2: WUE-Vergleich Tomaten [Q16]

Table 2.

Total water consumed, water use efficiency (WUE), product water use (PWU) and transpired water in tomatoes growing in soil (S), deep water culture (DWC) and drip irrigation (DI) in a polytunnel (2018) and glasshouse (2019).

Parameter	Growth environment			Growth environment		
	Polytunnel experiment (2018)			Glasshouse experiment (2019)		
	DWC	DI	S	DWC	DI	S
Water Consumption (L plant⁻¹)	41.7 ± 8.14 ^c	70.34 ± 12.55 ^b	87.44 ± 3.97 ^a	48.07 ± 8.3 ^b	92.53 ± 13.64 ^a	102.89 ± 4.14 ^a
WUE (Kg L⁻¹)	0.0059 ± 0.0050	0.0072 ± 0.0029	0.0035 ± 0.0022	0.0124 ± 0.0046 ^a	0.0099 ± 0.0033 ^a	0.0044 ± 0.0008 ^b
PWU (L Kg⁻¹)	325.1 ± 89.9 ^{ab}	192.5 ± 68.5 ^b	497.7 ± 298.4 ^a	120.2 ± 23.7 ^c	224.98 ± 30.7 ^b	275.9 ± 41.1 ^a
Water Transpired (L plant⁻¹)	31.8 ± 15.3 ^b	57.16 ± 9.9 ^a	70.83 ± 3.24 ^a	35.83 ± 11.38 ^b	49.77 ± 30.28 ^b	87.64 ± 5.65 ^a

[Open in a new tab](#)

Lower case letters indicate significant differences after Tukey's *post hoc* test (significance level $p < 0.05$). Means with standard errors were calculated from 7 replicates.

Tabelle 3: Antioxidantien in Tomaten (Lycopin & β -Carotin) [Q16]

Table 4.

Composition of lycopene, β -carotene, total soluble solids (TSS) and total antioxidant activity (TAA) content of tomatoes growing in soil, and two hydroponic systems; deep water culture and drip irrigation.

Parameter	Growth environment			Growth environment		
	Polytunnel experiment (2018)			Glasshouse experiment (2019)		
	DWC	DI	S	DWC	DI	S
Lycopene (mg/100 m L ⁻¹)	0.008 ± 0.007 ^b	0.02 ± 0.006 ^a	0.016 ± 0.01 ^{ab}	0.16 ± 0.03 ^a	0.14 ± 0.01 ^a	0.06 ± 0.02 ^b
β -carotene (mg/100 m L ⁻¹)	n.d.	n.d.	n.d.	0.098 ± 0.03 ^a	0.039 ± 0.03 ^b	0.028 ± 0.01 ^b
TSS (Brix°)	2.9 ± 0.9 ^b	4.2 ± 0.3 ^a	3.6 ± 0.6 ^{ab}	3.4 ± 0.6	3.7 ± 0.24	3.0 ± 0.8
TAA (%)	20.2 ± 10.1 ^b	53.2 ± 26.1 ^a	67.3 ± 9.0 ^a	79.1 ± 9.1	77.3 ± 16.7	65.9 ± 25.1

[Open in a new tab](#)

n.d. = β -carotene levels in tomatoes were not assessed in the polytunnel experiment. Means with standard errors were calculated from 7 replicates.

Besuch einer Aquaponik-Anlage am 03.07.2025 in Berlin.

Notizen:

- Schwarze Soldatenfliegen spielen eine Rolle im Kreislauf, sie werden z. B. als Futter für die Fische eingesetzt und können organische Reste verwerten, was das System effizienter macht.
- Die Anlage ist besonders für warme Regionen geeignet.
- In der Anlage werden durch den Einsatz verschiedener Säuren bestimmte Bakterienkulturen gefördert, die für die Umwandlung von Ammoniak aus dem Fischkot in Nitrat zuständig sind, das ist wichtig für die Pflanzenernährung und die Wasserqualität. So bleibt das Wasser (Wasserwerte) stabil.
- Die Pflanzen in einer Aquaponik-Anlage sind genauso nährstoffreich wie bei herkömmlichem Anbau → vorausgesetzt, es herrscht ein stabiles Gleichgewicht im System, was entscheidend ist. Der Fischkot enthält alle wichtigen Nährstoffe, die sonst im Boden gespeichert werden und von dort an die Pflanzen weitergegeben würden.
- Für das Aquaponik-System gibt es viele Düngemöglichkeiten, abhängig von den Fischarten, Pflanzen und eingesetzten Mikroorganismen.
- Es existieren mehrere Varianten, nicht nur klassische Aquaponik: zum Beispiel Wurmpo-
nik oder Erzponik.

- In dem System befinden sich mehrere Sensoren, die dafür sorgen, dass Werte wie pH, Temperatur, Wasserstand usw. kontinuierlich überwacht und geregelt werden.
- Leitungswasser ist oft ungeeignet wegen seines ungünstigen pH-Werts, Regenwasser eignet sich besser. Es gibt deshalb einen Sensor, der den pH-Wert des Wassers misst, ist der Wert zu hoch oder zu niedrig, wird eine automatische Klappe geöffnet, um Regenwasser in das System zu leiten und den pH-Wert zu stabilisieren. Denn stabile Werte sind essenziell, damit das System nicht zusammenbricht. (MAN BENÖTIGT IMMER STABILE WERTE DAMIT DAS SYSTEM NICHT ZUSAMMENBRICHT!!!)
- Aquaponik ist ein geschlossenes System. Dadurch lässt sich Wasser einsparen.
- Schädlinge können zum Problem werden, z. B. der weiße Schmetterling (Kohlweißling)
→ ist oft an Pflanzen zu finden und frisst deren Blätter
- Aktuell arbeiten sie mit Styropor als Trägermaterial. Styropor schwimmt auf dem Wasser, was praktisch ist (so können die Wurzeln das Wasser berühren bzw. im Wasser hängen, während der Pflanzenteil über der Wasseroberfläche bleibt). Aber es ist keine Dauerlösung, weil sich darin giftige Stoffe anlagern können. Die Wurzeln nehmen diese auf, was langfristig problematisch ist. (→ Wurzeln bilden sich im Styropor aus und nehmen die giftigen Stoffe auf.)
- Eine einfache Bauweise der Anlage ist wichtig, so können mehr Menschen einsteigen, ohne abgeschreckt zu werden. Komplexität soll vermieden werden.
- Der Start ist sehr zeitintensiv, was viele abschrecken könnte, besonders in der Anfangsphase braucht es viel Geduld und Aufmerksamkeit.
- Man muss sich intensiv mit dem Thema auseinandersetzen, sonst funktioniert das System langfristig nicht.
- Wer selbst eine Anlage startet, sollte sich bewusst sein: Am Anfang muss man viel AUSPROBIEREN, bis alles stabil läuft. Die Lernkurve ist steil.
- Es gibt viele unterschiedliche Arten von Aquaponik → das bedeutet, dass fast jeder ein passendes System finden kann (für jeden ist also etwas dabei), je nach Platz, Klima oder Zielsetzung.
- Aus Sicht des Betreibers hat das System großes Potenzial, besonders im urbanen Raum, da es wenig Platz benötigt und ohne Erde auskommt.
- Es wäre sinnvoll, Aquaponik-Produkte im Supermarkt besonders zu kennzeichnen, z. B. mit dem Hinweis „Aus einer Aquaponik-Anlage aus Deutschland“. So könnte man die Aufmerksamkeit auf nachhaltige Produktion lenken und mehr Akzeptanz schaffen. Durch die bewusste Unterstützung solcher Produkte könnte die Aquaponik-Branche wachsen. Mehr Menschen würden sich für diese Anbaumethode interessieren, und langfristig könnten Aquaponik-Anlagen sogar ganzjährig frische Lebensmittel liefern (auch im Winter).
- Der Energieaufwand, besonders fürs Heizen, kann hoch sein (teuer werden), besonders im Winter oder in kälteren Regionen. Mit Solarpendeln (solarbetriebene Heizsysteme) kann man die Heizkosten teilweise senken, aber die Lösung ist nicht perfekt/ optimal.
- Der Stromverbrauch insgesamt ist zwar vorhanden, aber laut Betreiber immer noch besser als bei vielen anderen landwirtschaftlichen Methoden. Man erreicht keine 100%ige

Nachhaltigkeit, aber man kommt ihr näher (→ man wird es nie komplett nachhaltig hinbekommen aber das System ist besser als andere Optionen).

- Beim Start einer Anlage müssen bestimmte Regulationen beachtet werden, z. B. ein Zyklus von 6 Wochen ohne Bakterien zu Beginn. In dieser Zeit wird das System aufgebaut, danach werden die nützlichen Bakterien „aktiviert“, also hinzugefügt, um den Stickstoffkreislauf in Gang zu setzen. (Die Bakterien sollten also nicht direkt zu Beginn (1. Woche) aktiviert werden, das würde das System überfordern.)
- Mikroplastik wurde ebenfalls als Problem erwähnt, in Zusammenhang mit dem Styropor, das sich im Wasser langsam zersetzen kann und dabei kleine Partikel abgibt, die in den Kreislauf gelangen. (Dabei handelt es sich jedoch um ein individuelles Problem, das nicht bei jeder Aquaponik-Anlage auftritt, viele Betreiber verwenden gar kein Styropor. Dieser Betrieb hat bislang jedoch noch keine geeignete Alternative gefunden.)
- Insgesamt ist das System ein komplexes Zusammenspiel, aber mit viel Potenzial, vor allem im Hinblick auf Wasserersparnis, urbane Landwirtschaft und Nachhaltigkeit.

Eigenanteil

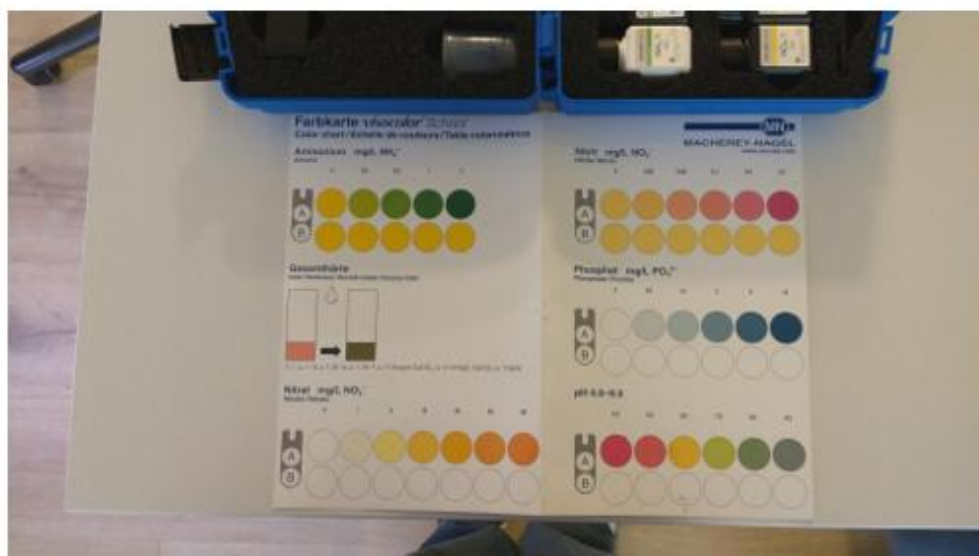
Dünger:



Verwendete Materialien für Wassermessung:

VISOCOLOR School Analysenkoffer:

→ <https://www.mn-net.com/de/visocolor-school-analysenkoffer-933100>



Leitwertmessgerät EC-3

→ <https://www.wassertechnik.pro/wassertest/messgeraete/ec-3-leitwertmessung-des-wassers-0-9990mikrosiemens>



Ökoponik – Wassermessungen:

Datum	Temperatur	Leitfähigkeit	Ammonium	Nitrat	Phosphat	pH-Wert
21.11.2024	20°	0,87ms	0,1 mg/L	1mg/L	0,5mg/L	7,5
28.11.2024	20,7°	0,97ms	0,3mg/L	1mg/L	0,5mg/L	7,5
05.12.2024	22,3°	0,97ms	-	-	-	-
12.12.2024	19,4°	0,98ms	0,1mg/L	2mg/L	1,5mg/L	7,5
18.12.2024	21,6°	1,00ms	0,1mg/L	5mg/L	2,5mg/L	8
19.12.2024	21,4°	1,06ms	-	-	-	-
03.01.2025	21,2°	1,07ms	0,2mg/L	8mg/L	3mg/L	9
09.01.2025	22,1°	1,06ms	0,1mg/L	6mg/L	2,5mg/L	8
23.01.2025	21,8°	1,13ms	-	-	-	-
27.01.2025	21,6°	1,22ms	-	-	-	-
13.02.2025	19,6°	1,19ms	0,1mg/L	25mg/L	6mg/L	8
27.03.2025	20,0°	1,24ms	-	-	-	-
12.11.2025	20,6°	1,02ms	0,75mg/L	5mg/L	1mg/L	7

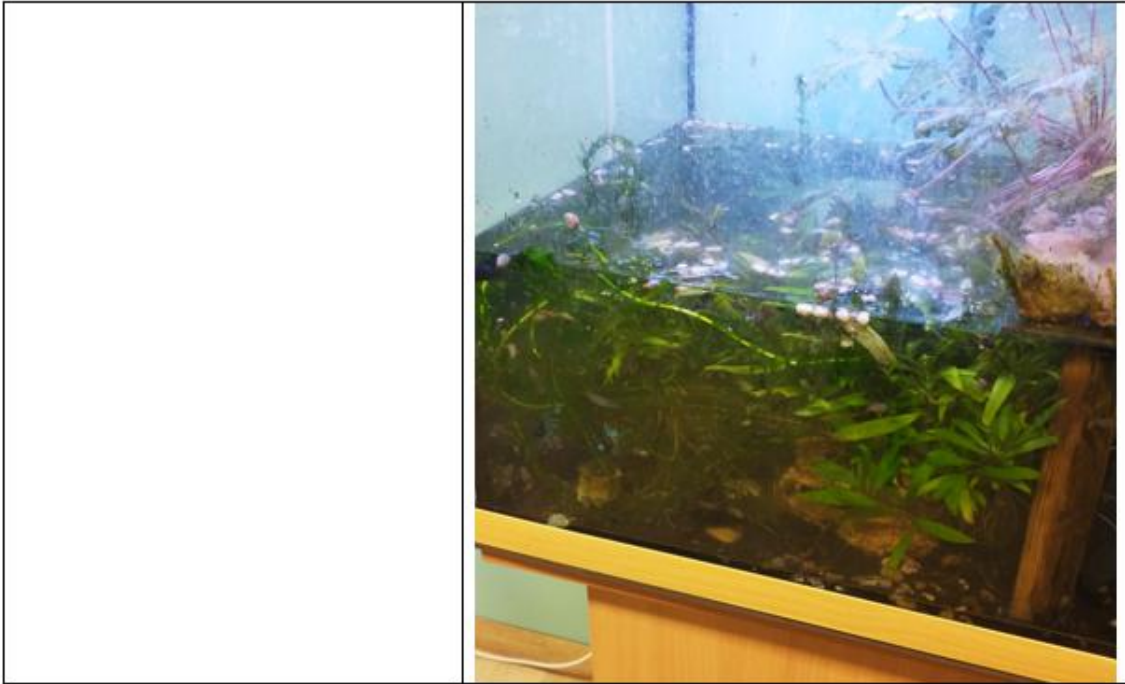
Ökoponik – Fotos:

Dateiname	Foto
Start 14.11.2024	
21.11.2024	
28.11.2024	

18.12.2024 + 10 ml Dünger

19.12.2024	
03.01.2025 mit Dünger über die Ferien	
09.01.2025 nach Wasserauffüllung	
23.01.2025 viele Schnecken, Pflanzen abgestorben	

27.01.2025 Düngung doppelt (+ neue Wasserpest)	
17.09.2025 – Nach den Sommerferien: kaum Fische gestorben; Schneckenüberschuss; Wasserpest gesund, kräftig grün; Landpflanzen vollständig abgestorben; Wasserqualität wirkt sehr gut → Längster Zeitraum ohne Eingriff; System hat sich selbst reguliert	
12.11.2025 – Endmessung: Blätter kräftig und stabil; viele neue Blätter (dunkles Grün); Pflanzen wachsen weiter in die Höhe	



9 Eigenständigkeitserklärung

BundesUmweltWettbewerb
Vom Wissen zum nachhaltigen Handeln



Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich/erklären wir, dass die vorliegende Projektarbeit mit dem Titel

Aquaponik & Ökotonik - Trend oder Zukunft?

meine/unsere eigene geistige Leistung ist.

Das Projekt wurde selbstständig durchgeführt und die Projektarbeit wurde selbstständig verfasst. Gegebenenfalls gelieferte Datensätze, Zeichnungen, Skizzen graphische Darstellungen etc. wurden selbstständig erstellt. In der Arbeit habe ich/haben wir explizit angegeben, wo und in welchem Umfang eine Hilfe von Dritten (z.B. Betreuer*innen, Eltern, Expert*innen etc.) in Anspruch genommen wurde. Zitate aus anderen Werken sind als solche kenntlich gemacht. Die Quellen externer Bildmaterialien und Fachinformationen sind angegeben.

Wurde im Projekt oder/und beim Schreiben der Projektarbeit Künstliche Intelligenz (KI) verwendet, so ist dieses

a) explizit in der schriftlichen Projektarbeit dargelegt und

b) der genaue Zweck sowie die Stelle(n) sind in der Projektarbeit angegeben.

Nauen, 03.03.2026

Ort, Datum

Merle Hoffmann
Vor- und Nachname

Merle Hoffmann
Unterschrift

(Bei einer Projektgruppe ist es ausreichend, wenn für diese stellvertretend eine Person, z.B. die Kontaktperson, das Formular ausfüllt und unterschreibt).

1/2

Bei der Analyse der Wasserproben hatte ich eine kurze Einweisung von Dr. Martin Daus erhalten. Den Rest der Arbeit habe ich eigenständig verfasst.

Lichtfarbe beeinflusst Pflanzenwachstum – Ein Schulversuch mit Radieschen

5 März

LDVC



Im Rahmen eines Schulprojekts untersuchten wir, wie verschiedene Lichtfarben das Wachstum von Pflanzen beeinflussen. Dafür nutzten wir Radieschenpflanzen, da diese relativ schnell wachsen und sich gut für Beobachtungen eignen.

Zu Beginn des Projekts am 18. Februar 2026 bauten wir mehrere Versuchskartons auf. Jeder Karton wurde mit einer Lampe ausgestattet, die eine andere Lichtfarbe erzeugte: weißes, blaues, grünes oder rotes Licht. Zusätzlich gab es eine Vergleichsgruppe mit normalem Tageslicht. Nachdem die Lampen befestigt waren, pflanzten wir die Radieschen ein und gossen zunächst etwa 25 Milliliter Wasser. In den folgenden Tagen führten wir regelmäßig Messungen durch. Dabei maßen wir die Höhe der Pflanzen und beobachteten ihre Entwicklung. Außerdem achteten wir darauf, dass alle Pflanzen ungefähr gleich viel Wasser bekamen. Nach jeder Messung gossen wir etwa 15 bis 25 Milliliter Wasser nach.

Schon nach kurzer Zeit zeigten sich deutliche Unterschiede. Die Radieschen unter weißem Licht entwickelten besonders große und stabile Blätter. Unter blauem Licht wuchsen die Pflanzen zwar sehr hoch, wirkten jedoch dünn und weniger stabil. Beim grünen Licht fiel auf, dass das Wachstum deutlich schwächer war. Eine der Pflanzen ging im Laufe des Experiments sogar ein. Auch unter rotem Licht überlebten nicht alle Pflanzen bis zum Ende.



Die letzte Messung fand am 4. März 2026 statt. Danach bauten wir die Versuchskartons wieder ab. Insgesamt zeigte sich, dass weißes Licht für das Wachstum der Radieschen am besten geeignet war, während andere Lichtfarben teilweise zu schwächerem Wachstum führten.

Der Versuch hat gezeigt, dass die Lichtfarbe einen großen Einfluss auf das Wachstum von Pflanzen haben kann. Solche Erkenntnisse könnten zum Beispiel beim Pflanzenanbau in Gewächshäusern oder bei künstlicher Beleuchtung eine wichtige Rolle spielen.



Projektstart

18.02.2026

Durchgeführte Maßnahmen:

- ✓ Kartons aufgebaut
- ✓ Lichter verkabelt und befestigt
- ✓ Setzlinge eingepflanzt
- ✓ 25 ml Wasser gegossen

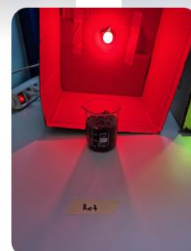
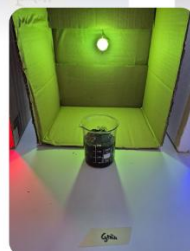
1. Messung

20.02.2026

Durchgeführte Maßnahmen:

- ✓ 15 ml Wasser gegossen
- ✓ Messungen durchgeführt

Maße			
T.Licht:	2,5cm	2,5cm	1,5cm
Weiß:	3,5cm	3,5cm	1,5cm
Blau:	4,7 cm	4,2cm	2,5cm
Grün:	2,7cm	1,5cm	3,5cm
Rot:	3,4cm	3,2cm	2,7cm



2. Messung

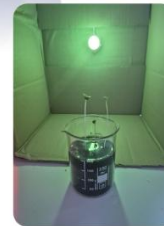
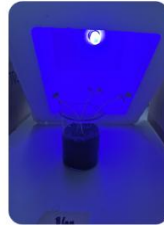
23.02.2026

Durchgeführte Maßnahmen:

✓Maße Genommen

✓15 ml Wasser gegossen

T. Licht:	5cm	5,5cm	6cm
Weiß:	8cm	8cm	7cm
Blau:	10 cm	8cm	10,5cm
Grün:	8cm	4cm	8cm
Rot:	10cm	6,5cm	9,5cm



Erste Beobachtungen

Weiß hat im Vergleich zu den anderen deutlich größeren und stabileren Blättern.

Blau hat die längsten Stiele, aber die geringste Stabilität.

Grün ist am wenigsten gewachsen, was auf die fragliche Wellenlänge des grünen Lichts hinweisen könnte.

3. Messung

25.02.2026

Durchgeführte Maßnahmen

✓Maße genommen

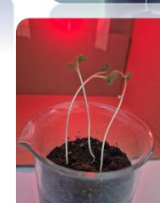
✓25ml Wasser gegossen

T.Licht:	6cm	8cm	6cm
Weiß:	9cm	10cm	9cm
Blau:	11 cm	9cm	12cm
Grün:	9cm	9cm	2cm(eingegangen)
Rot:	10cm	9cm	10cm

Beobachtungen

Eine Pflanze von Grün stark hängend daraus resultierende Schlussfolgerung: Eingegangen

Ansonsten so wie davor Weiß hat die größten und stabilsten Blätter und Blau ist am zerbrechlichsten



Autoimmunisierung des Körpers gegen Krebs

Kampf im eigenen Körper: Wenn das Immunsystem gegen Krebs antritt

Das Thema Krebs ist für viele ein Schreckgespenst. Aber wusstest du, dass dein Körper eigentlich jeden Tag Krebs bekämpft, ohne dass du es merkst? Hier schauen wir uns mal genau an, wie die eigene Abwehr funktioniert und warum manche Krebsarten harmloser sind als andere.

Warum ist die Autoimmunisierung (eigene Abwehr) so wichtig?

Stell dir dein Immunsystem wie eine hochspezialisierte Security-Truppe vor. Eine "Autoimmunisierung" im positiven Sinne bedeutet hier, dass der Körper lernt, entartete Zellen als "fremd" zu erkennen und zu vernichten. Das ist lebenswichtig, weil ständig Zellen in unserem Körper mutieren. Ohne diese Abwehr würde fast jeder Mensch sehr früh an Krebs erkranken.

Beispiel: Ein gesundes Immunsystem erkennt eine Zelle, die sich durch UV-Strahlung verändert hat. T-Zellen (die Spezialeinheit der Abwehr) docken an der Zelle an und zwingen sie in den "Zelltod" (Apoptose), bevor sie einen Tumor bilden kann.

Weißer Hautkrebs: Warum ist er meistens nicht tödlich?

Der weiße Hautkrebs ist zwar die häufigste Krebsart, gilt aber als "gutmütig".

Wieso nicht tödlich? Das Hauptmerkmal ist, dass weißer Hautkrebs extrem selten metastasiert. Das heißt, er streut nicht in andere Organe wie die Lunge oder Leber. Er wächst meistens nur lokal und sehr langsam.

Heilungschancen: Die Heilungschancen liegen bei fast 100 %, wenn er frühzeitig erkannt wird. Meistens reicht eine kleine Operation aus, bei der das betroffene Gewebe weggeschnitten wird.

Der Gehirntumor (Glioblastom): Warum ist er so gefährlich?

Im Gegensatz zum weißen Hautkrebs ist ein bösartiger Gehirntumor, wie das Glioblastom, eine der schwersten Diagnosen.

Wieso so tödlich? Das Gehirn sitzt in einem festen Schädelknochen. Wenn ein Tumor dort wächst, hat er keinen Platz. Er verdrängt gesundes Hirngewebe, das für das Atmen, die Bewegung oder das Denken zuständig ist. Zudem wächst das Glioblastom "fingerförmig" ins gesunde Gewebe hinein, was eine saubere operative Entfernung fast unmöglich macht. Die sogenannte Blut-Hirn-Schranke schützt das Gehirn zudem so gut, dass viele Chemotherapien gar nicht bis zum Tumor durchkommen.

Symptome: Häufig sind es plötzlich auftretende, starke Kopfschmerzen (besonders morgens), Krampfanfälle, Persönlichkeitsveränderungen oder Lähmungserscheinungen.

Heilungsfähig? Nach aktuellem Stand der Medizin ist ein Glioblastom leider nicht heilbar. Die Behandlung (OP, Bestrahlung, Chemo) dient dazu, das Leben zu verlängern und die Lebensqualität so gut wie möglich zu erhalten.

Die Reha: Was passiert danach?

Nach der harten Therapie (OP, Chemo oder Bestrahlung) kommt die Rehabilitation. Aber was bringt die eigentlich?

Was wird gemacht? In der Reha geht es nicht nur um Sport. Es ist ein Mix aus Physiotherapie (Körper stärken), Ernährungsberatung, psychologischer Hilfe und Ergotherapie (Alltag bewältigen).

Auf welche Krebse wirkt sie? Grundsätzlich wirkt eine Reha auf alle Krebsarten.

Beim Hautkrebs geht es oft um Wundheilung und psychische Angstbewältigung.

Beim Gehirntumor ist sie extrem wichtig, um verloren gegangene Fähigkeiten wie Sprechen oder Laufen wieder neu zu trainieren (Neuro-Reha).

Wirkung: Sie hilft dem Körper, die Giftstoffe der Therapie abzubauen und das Immunsystem wieder "hochzufahren".

Schlusswort

Krebs ist nicht gleich Krebs. Während unser Körper und die moderne Chirurgie beim weißen Hautkrebs fast immer gewinnen, zeigt uns der Gehirntumor die Grenzen der Medizin auf. Die wichtigste Waffe bleibt jedoch unser eigenes Immunsystem – ein Wunderwerk, das wir durch einen gesunden Lebensstil unterstützen können.

Quellen:

- https://www.krebsdaten.de/Krebs/DE/Content/Publikationen/Krebs_in_Deutschland/krebs_in_deutschland_node.html
- Spenden für die Deutsche Krebshilfe – Infoblätter zu Hautkrebs und Hirntumoren
- <https://www.dkfz.de/>

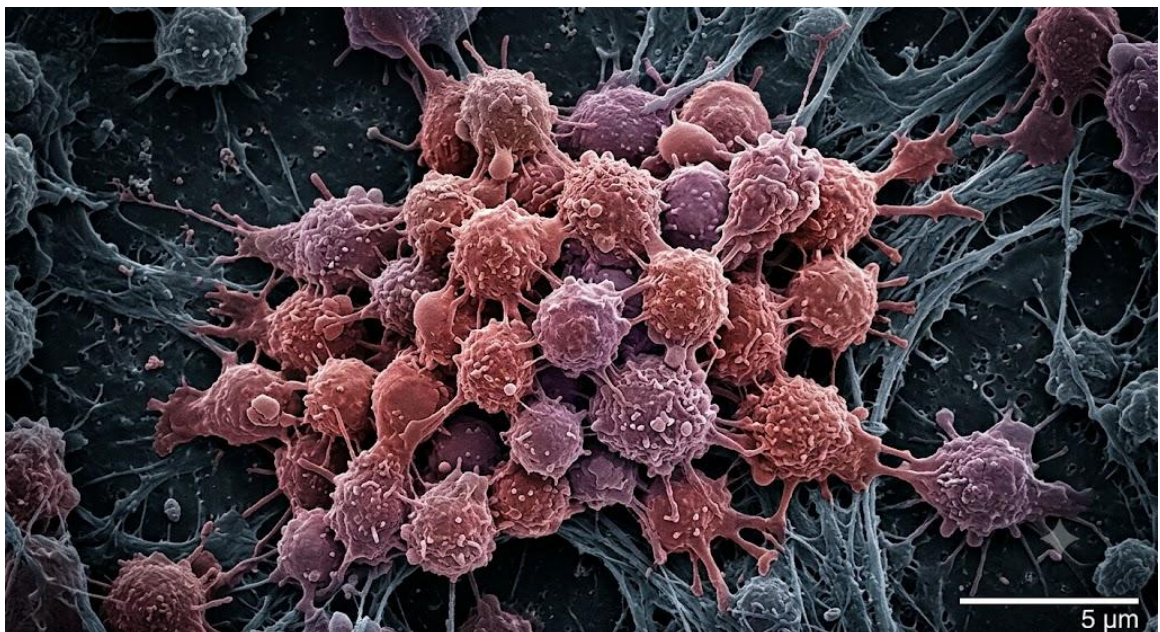


Abbildung: Anhäufung von Krebszellen (Bild KI-generiert)

Unterschiedliche Legierungsarten

Ein Mischkristall (Solid Solution) entsteht, wenn zwei Materialien keine chemische Verbindung eingehen, sondern ein gemeinsames Kristallgitter bilden. Beim Einlagerungsmischkristall befinden sich kleinere Atome in den Zwischenräumen des Gitters größerer Atome. Mit steigender Konzentration der kleineren Atome nimmt die Gitterverzerrung zu. Dadurch erhöhen sich Härte und Festigkeit des Materials, gleichzeitig steigt jedoch auch die Sprödigkeit. Die Duktilität sinkt, da die größeren Atome durch die Gitterverzerrung in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt werden und sich bei Belastung schlechter gegeneinander verschieben können. Die Löslichkeit der kleineren Atome ist temperaturabhängig. Beim Erwärmen vergrößern sich die Atomabstände aufgrund der thermischen Ausdehnung, wodurch sich mehr Fremdatome im Gitter lösen können.

Am Beispiel von Stahl lässt sich das temperaturabhängige Verhalten von Legierungen gut erklären. Beim Erhitzen entfernen sich die Eisenatome voneinander, das Material dehnt sich aus, und das Kristallgitter verändert sich in Abhängigkeit von der Temperatur. Bei einem Kohlenstoffgehalt von 0 bis etwa 0,8 % besteht das Gefüge im Ruhezustand aus Ferrit und Perlit. Ferrit besitzt ein kubisch-raumzentriertes Kristallgitter. Dabei befinden sich acht Eisenatome an den Ecken eines Würfels und ein weiteres Atom im Zentrum. Diese Struktur bleibt bis etwa 723 °C stabil. Reines Eisen (0 % C) wandelt sich erst bei 911 °C in Austenit um.

Mit einem Kohlenstoffgehalt zwischen 0,02 und 0,8 % entsteht beim Erwärmen zunächst ein Mischgefüge aus Ferrit und Austenit. Mit steigender Temperatur bildet sich schließlich vollständig Austenit. Mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt sinkt die Temperatur, bei der vollständiger Austenit entsteht, bis sie bei 0,8 % C genau 723 °C beträgt.

Austenit besitzt ein kubisch-flächenzentriertes Gitter. Hier sitzen die Eisenatome an den acht Würfeln sowie zusätzlich in den sechs Flächenmitten.

Dieses Gitter bietet größere Zwischengitterräume, wodurch Kohlenstoff deutlich besser gelöst werden kann als im kubisch-raumzentrierten Gitter. Außerdem ist das kubisch-flächenzentrierte Gitter leichter plastisch verformbar. Deshalb wird dieser Zustand gezielt beim Schmieden angestrebt, da sich das Material in der Austenitphase mit geringem Kraftaufwand umformen lässt.

Bei einem Kohlenstoffgehalt zwischen 0,8 und 2,1 % spricht man von Werkzeugstahl. In diesem Bereich kann eine hohe Härte erreicht werden, die sich gut mit einer gewissen elastischen Verformbarkeit kombinieren lässt, wodurch sich das Material besonders für Werkzeug und Messer eignet. 2,1% C ist auch der höchste C-Wert, der beim traditionellen Schmieden praktisch genutzt werden kann. Er erreicht erst bei 1147 Grad Celsius reines Austenit, geht aber fast direkt über in die Schmelze. Darüber ist schwer zu bearbeiten und zu härten. Ab einem C-Wert von 6,96% wird das Material so spröde, dass es keinen sinnvollen Nutzen außerhalb von seiner Pulverform hat.

Das Härten ist einer der wichtigsten Schritte bei der Herstellung von Werkzeugen und Messern. Ohne diesen Prozess wären viele Werkzeuge nicht funktionsfähig, da ihnen die notwendige Härte und Verschleißfestigkeit fehlen würde.

Härten ist ein Wärmebehandlungsprozess, bei dem das Kristallgitter eines Metalls gezielt verändert wird, um die Härte zu erhöhen. Zunächst wird das Material erhitzt, bis es die sogenannte Austenitphase erreicht. In diesem Zustand besitzt das Eisen ein kubisch-flächenzentriertes Gitter, in dem sich Kohlenstoff deutlich besser lösen kann. Der Kohlenstoff verteilt sich dabei gleichmäßig im Material.

Anschließend wird das Werkstück schnell abgeschreckt, meist in Wasser, Öl oder Luft. Durch das schnelle Abkühlen schrumpft das Kristallgitter abrupt. Der zuvor gelöste Kohlenstoff kann nicht mehr ausdiffundieren und wird im Gitter eingeschlossen.

Dadurch entsteht eine neue Gitterstruktur, die als Martensit bezeichnet wird. Martensit ist sehr hart, aber gleichzeitig auch spröde und bruchanfällig.

Um diese Sprödigkeit zu verringern, wird das Material anschließend angelassen (oft auch als Normalisieren oder Tempern bezeichnet). Dabei wird das gehärtete Werkstück erneut auf eine Temperatur von etwa 150 bis 500 °C erhitzt und für eine bestimmte Zeit gehalten. Temperatur und Dauer müssen dabei an das jeweilige Material angepasst werden. Durch diesen Prozess werden innere Spannungen reduziert und die Zähigkeit erhöht, während ein Großteil der Härte erhalten bleibt.

Dieser Vorgang kann bei Bedarf mehrfach wiederholt werden, bis das gewünschte Verhältnis zwischen Härte und Elastizität erreicht ist. Dadurch erhält das Material die Eigenschaften, die für Werkzeuge und Messer erforderlich sind: hohe Härte bei gleichzeitig ausreichender Zähigkeit.

Legierungen: Chrom, Messing und Bronze

Metalle sind aus unserem Alltag nicht wegzudenken – von modernen Gebäuden bis zu alltäglichen Gegenständen begegnen sie uns überall. Doch meist werden Metalle nicht in ihrer reinen Form verwendet, sondern als sogenannte Legierungen. Eine Legierung entsteht, wenn zwei oder mehr Metalle miteinander vermischt werden. Manchmal wird auch ein Metall mit einem anderen chemischen Element kombiniert.

Durch diese Mischung können bestimmte Eigenschaften des Materials verbessert werden. Dazu gehören zum Beispiel die Härte, die Stabilität, die Leitfähigkeit oder die Widerstandsfähigkeit gegen Rost. Drei bekannte Beispiele für solche Werkstoffe sind Chrom, Messing und Bronze. Reine Metalle besitzen oft nicht die Eigenschaften, die für technische Anwendungen benötigt werden. Gerade deshalb sind Legierungen besonders wichtig. Durch das gezielte Mischen verschiedener Stoffe entstehen Materialien, die sich exakt für bestimmte Zwecke eignen. So finden Legierungen in vielen Bereichen der Industrie, Technik sowie im Alltag Verwendung.

Chrom

Chrom ist ein chemisches Element mit dem Symbol Cr und der Ordnungszahl 24. Es gehört zu den sogenannten Übergangsmetallen und hat eine silbrig glänzende Oberfläche. Chrom ist ein relativ hartes Metall und besitzt eine hohe Widerstandsfähigkeit

gegen Abnutzung. In der Natur kommt Chrom meistens nicht in reiner Form vor, sondern wird aus verschiedenen Erzen gewonnen, zum Beispiel aus dem Erz Chromit.

Zu den wichtigsten Eigenschaften von Chrom zählt seine Korrosionsbeständigkeit. Korrosionsbeständig bedeutet, dass das Material sehr gut gegen Rost geschützt ist. Sobald Chrom mit Sauerstoff aus der Luft in Kontakt gerät, bildet sich auf der Oberfläche eine äußerst dünne, unsichtbare Schicht aus Chromoxid. Diese schützt das darunterliegende Metall vor weiteren chemischen Reaktionen. Dadurch bleibt das Material lange stabil und rostet nur langsam. Chrom wird deshalb häufig in der Herstellung von rostfreiem Stahl verwendet. Rostfreier Stahl ist eine Legierung aus Eisen, Chrom und manchmal auch anderen Metallen wie Nickel. Der Chromanteil sorgt dafür, dass der Stahl eine schützende Oberfläche bildet und nicht rostet. Solcher Stahl wird in vielen Bereichen eingesetzt, zum Beispiel in Küchenutensilien, medizinischen Geräten, Maschinen oder auch im Bauwesen.

Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich von Chrom ist das sogenannte Verchromen. Dabei wird eine dünne Schicht Chrom auf ein anderes Metall aufgetragen. Dieses Verfahren erfolgt meist durch eine elektrochemische Methode, bei der Chrom aus einer Lösung auf das Metall abgeschieden wird. Durch das Verchromen erhält das Material eine glänzende Oberfläche und wird gleichzeitig widerstandsfähiger gegen Kratzer, Verschleiß und Rost.

Verchromte Oberflächen findet man zum Beispiel bei Autoteilen, Fahrradteilen, Türgriffen oder Badezimmerarmaturen. Neben dem Schutz hat das Verchromen auch einen dekorativen Effekt, da Chrom sehr stark glänzt und deshalb oft für optisch ansprechende Oberflächen verwendet wird.

Chrom wird außerdem in bestimmten Speziallegierungen eingesetzt, die sehr hohen Temperaturen standhalten müssen. Solche Legierungen werden zum Beispiel in Turbinen, Motoren oder Industrieanlagen verwendet.

Messing

Messing ist eine Legierung aus Kupfer und Zink. Der Anteil der beiden Metalle kann unterschiedlich sein, je nachdem, welche Eigenschaften das Material haben soll. In den meisten Fällen besteht Messing jedoch hauptsächlich aus Kupfer, während Zink in einem geringeren Anteil enthalten ist.

Ein typisches Merkmal von Messing ist seine goldgelbe Farbe. Dadurch sieht es ein wenig wie Gold aus, ist aber deutlich günstiger. Wegen dieser Farbe wird Messing oft auch für dekorative Gegenstände verwendet. Gleichzeitig besitzt das Material aber auch viele technische Vorteile.

Messing ist relativ stabil und gut formbar. Das bedeutet, dass es sich leicht bearbeiten lässt. Man kann es zum Beispiel gut schneiden, drehen, fräsen oder bohren. Diese Eigenschaft ist besonders in der Industrie wichtig, weil Bauteile oft sehr genau hergestellt werden müssen. Außerdem hat Messing eine gute Korrosionsbeständigkeit. Es rostet nicht so schnell wie viele andere Metalle und eignet sich deshalb gut für Anwendungen, bei denen das Material mit Wasser oder Luft in Kontakt kommt. Deshalb wird Messing häufig für Armaturen, Ventile, Schrauben, Muttern oder Rohrverbindungen verwendet.

Ein weiterer bekannter Einsatzbereich von Messing sind Musikinstrumente. Besonders Blasinstrumente wie Trompeten, Posaunen, Hörner oder Tuben bestehen häufig aus Messing. Diese Instrumente werden sogar oft als Blechblasinstrumente bezeichnet. Messing eignet sich dafür gut, weil es stabil ist und gleichzeitig relativ leicht geformt werden kann.

Auch im Bereich der Elektrotechnik wird Messing manchmal verwendet, da es eine gute elektrische Leitfähigkeit besitzt. Außerdem wird es oft für Schmuck, Münzen oder dekorative Gegenstände genutzt.

Ein großer Vorteil von Messing ist außerdem seine Recyclingfähigkeit. Alte Messingprodukte können eingeschmolzen und wiederverwendet werden, um neue Produkte herzustellen. Dadurch werden Rohstoffe gespart und die Umwelt wird weniger belastet.

Bronze

Bronze ist ebenfalls eine Legierung auf Basis von Kupfer, allerdings wird Kupfer hier hauptsächlich mit Zinn gemischt. Der Zinnanteil liegt meistens zwischen etwa fünf und zwölf Prozent. Bronze gehört zu den ältesten Legierungen, die von Menschen hergestellt wurden. Schon vor mehreren tausend Jahren wurde Bronze verwendet. In der sogenannten Bronzezeit stellten Menschen daraus Werkzeuge, Waffen, Schmuck und andere Gegenstände her. Bronze war damals ein wichtiger Fortschritt, weil sie deutlich härter und stabiler war als reines Kupfer.

Bronze hat mehrere Eigenschaften, die sie besonders nützlich machen. Sie ist relativ hart, widerstandsfähig und verschleißfest. Gleichzeitig lässt sie sich gut gießen. Das bedeutet, dass man aus geschmolzener Bronze auch komplizierte Formen herstellen kann. Diese Eigenschaft ist besonders wichtig für die Herstellung von technischen Bauteilen oder Kunstwerken.

Ein weiterer Vorteil von Bronze ist ihre Korrosionsbeständigkeit. Besonders gegenüber Wasser und sogar Meerwasser ist Bronze sehr widerstandsfähig. Deshalb wird sie häufig im Schiffbau oder in maritimen Anlagen verwendet.

Bronze wird auch oft für Lager, Zahnräder oder Buchsen in Maschinen eingesetzt. Diese Bauteile müssen starken Belastungen standhalten und dürfen sich nicht schnell abnutzen. Durch ihre guten Gleiteigenschaften eignet sich Bronze dafür besonders gut. Neben technischen Anwendungen spielt Bronze auch eine wichtige Rolle in der Kunst. Viele bekannte Statuen und Skulpturen bestehen aus Bronze. Das Material ist sehr langlebig und kann über viele Jahre oder sogar Jahrhunderte erhalten bleiben. Außerdem lassen sich mit Bronze sehr feine Details darstellen, wenn Figuren gegossen werden.

Auch Glocken werden traditionell aus einer speziellen Bronzelegierung hergestellt, die als Glockenbronze bezeichnet wird. Diese Legierung sorgt dafür, dass die Glocken einen klaren und kräftigen Klang erzeugen.

Unterschiede zwischen Chrom, Messing und Bronze

Chrom, Messing und Bronze unterscheiden sich deutlich in ihrer Zusammensetzung und ihren Eigenschaften. Chrom ist ein einzelnes Metall, das hauptsächlich als Bestandteil anderer Legierungen oder als Schutzschicht verwendet wird. Messing und Bronze sind dagegen selbst Legierungen, die auf Kupfer basieren. Messing zeichnet sich besonders durch seine gute Bearbeitbarkeit und seine auffällige goldene Farbe aus. Deshalb wird es sowohl für technische Bauteile als auch für dekorative Gegenstände verwendet. Bronze ist dagegen meist etwas härter und verschleißfester. Deshalb eignet sie sich besonders gut für Bauteile in Maschinen oder für Kunstwerke. Chrom wiederum wird vor allem eingesetzt, um Materialien widerstandsfähiger gegen Rost und äußere Einflüsse zu machen.

Kurzberichte

Deshalb ist es ein wichtiger Bestandteil von rostfreiem Stahl und wird auch als Schutzschicht auf vielen Metalloberflächen verwendet.

Alle drei Materialien haben also unterschiedliche Eigenschaften und Einsatzbereiche, sind aber für Technik, Industrie und Alltag sehr bedeutend.

Quelle:

Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 1



Bild KI-generiert



LaVCIENCE