



Franziskaner
Franziskanergymnasium
Hall in Tirol

VORWISSENSCHAFTLICHE ARBEIT

JOHANNES ANGERER

Franziskanergymnasium Hall in Tirol

8B im Schuljahr 2018/19

AQUAPONIK IN ÖSTERREICH

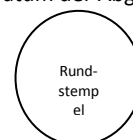
Beurteilung der Nährstoffversorgung der Pflanzen mittels
Wasserparameteranalyse am Beispiel einer Aquaponik-Anlage in Aschbach-Markt

Naturwissenschaftlicher Bereich, Mathematik, Informatik

Sprache: Deutsch

Betreuende Lehrperson:

Dr. rer. nat. ILKA PROWATKE



Abstract

Eine Möglichkeit, der stetig wachsenden Nachfrage an Nahrung und dem Wunsch nach höherer Ressourcen- und Klimaeffizienz gerecht zu werden, stellt die Aquaponik dar. Dabei handelt es sich um eine Form der Agrarwirtschaft, bei der eine Fischzucht und eine Pflanzenzucht zu einer Anlage zusammengefügt werden. Für diese Arbeit wurden Messungen an der privaten Aquaponik-Anlage von Herrn Bierbaumer in Aschbach-Markt vorgenommen mit dem Ziel einer Beurteilung der Nährstoffversorgung der Pflanzen.

Zur Evaluierung der wichtigsten Wasserparameter, wie beispielsweise dem pH-Wert, der Temperatur und den unterschiedlichen Nährstoffkonzentrationen, wurden Messungen an einem Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma sowie Feldtests und eine kontinuierliche Durchflussanalyse durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Analysemethoden zeigten, dass die Elemente N, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu, und Mo nicht in den idealen Konzentrationen für den Anbau von Pflanzen vorliegen. Auf diesen Messungen basierend wurden einige Vorschläge für die Optimierung der Aquaponik-Anlage in Aschbach-Markt erstellt. Diese Optimierungsvorschläge enthalten eine Erhöhung des Sauerstoffgehaltes sowie die Einstellung des pH-Werts und verschiedener Nährstoffkonzentrationen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich besonders Dr. Andreas Zitek dafür danken, dass er diese Arbeit überhaupt ermöglicht hat und Ing. Daniel Bierbaumer für den Zugang zu seiner Aquaponik-Anlage.

Auch möchte ich meiner betreuenden Lehrperson Dr. Ilka Prowatke für ihre Unterstützung über den gesamten Entstehungsprozess hinweg danken.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Mutter, Ingrid Angerer, danken, denn ohne sie wäre ich nie auf dieses faszinierende Thema gestoßen und hätte auch diese Arbeit nicht darüber geschrieben.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Grundlagen der Aquaponik.....	7
2.1. <i>Theorie der Aquaponik</i>	7
2.1.1. Herkunft des Wortes Aquaponik	7
2.1.2. Allgemeiner Aufbau einer Aquaponik-Anlage	7
2.1.2.1. Gekoppelte und entkoppelte Kreislautsysteme	7
2.1.2.2. Mastbecken der Fische	8
2.1.2.3. Pflanzenbeete	8
2.1.2.4. Absetzbecken.....	10
2.1.2.5. Biofilter	10
2.1.2.6. Kühlfalle.....	11
2.1.3. Nährstoffe der Pflanze	12
2.1.3.1. Essentielle Pflanzennährstoffe	12
2.1.3.2. Nützliche Nährstoffe	13
2.1.3.3. Unterteilung in Makro- und Mikronährstoffe.....	13
2.1.3.4. Unterteilung nach Stoffwechsel-Funktion	14
2.1.3.5. Wachstums- und Ertragsgesetze der Pflanzenernährung	18
2.1.3.6. Modifizierte Steiner-Lösung	19
2.1.4. Stickstoffkreislauf in der Aquaponik-Anlage.....	20
2.1.4.1. Bedeutung des Stickstoffes für Lebewesen.....	20
2.1.4.2. Aminosäurestoffwechsel.....	20
2.1.4.3. Nitrifikation.....	21
2.1.4.4. Stickstoffassimilation	22
2.2. <i>Die Aquaponik-Anlage in Aschbach-Markt</i>	23
2.2.1. Aufbau der Anlage	23
2.2.2. Der Afrikanische Raubwels.....	25
2.2.3. Die Tomate	26
3. Methodik.....	27
3.1. <i>Feldmessungen</i>	27
3.1.1. Messung des pH-Wertes	27
3.1.2. Leitfähigkeit und Temperatur	27
3.1.3. Gelöster Sauerstoffgehalt im Wasser	28
3.1.1. Bestimmung verschiedener Nährstoffparameter	29
3.2. <i>Continuous Flow Analysis</i>	30
3.3. <i>Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS)</i>	32
3.3.1. Aufbau eines ICP-MS	32
3.3.2. Probenentnahme und Probenvorbereitung.....	33
3.3.3. Kalibrierung des ICP-MS	33

4. Messergebnisse	34
4.1. <i>Feldtests.....</i>	34
4.2. <i>Continuous Flow Analysis</i>	37
4.3. <i>Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma.....</i>	41
4.4. <i>Konzentration aller gemessenen Nährstoffe</i>	46
5. Diskussion.....	48
5.1. <i>Vergleich der Nährstoffzusammensetzung in der Aquaponik-Anlage mit der modifizierten Steiner-Lösung</i>	48
5.2. <i>Verlauf des pH-Wertes</i>	49
5.3. <i>Zusammenhang von Sauerstoff und Nitrifikation.....</i>	49
5.4. <i>Fehlerdiskussion</i>	50
5.5. <i>Optimierungsvorschläge für die Anlage von Herrn Bierbaumer</i>	51
5.5.1. <i>Einstellung des pH-Wertes</i>	51
5.5.2. <i>Anpassung der Nährstoffkonzentrationen.....</i>	51
5.5.3. <i>Verbesserung der Nitrifikation</i>	53
6. Fazit und Ausblick	54
Literaturverzeichnis	54
<i>Printquellen</i>	55
<i>Internetquellen</i>	55
Abkürzungsverzeichnis	56
Anhang.....	57

1. Einleitung

Die schnell wachsende Anzahl an Menschen auf unserem Planeten verlangt nach immer größeren Mengen an Nahrung, und der Wunsch nach ressourcen- und klimaschonenden Produktionsarten sind mit herkömmlichen Systemen nicht in Einklang zu bringen. Ein möglicher Lösungsansatz ist die Aquaponik. Dabei werden eine Fischzucht und eine Pflanzenzucht in einer Anlage vereint, indem das Wasser, welches reich an Nährstoffen ist, die Pflanzen bewässert und mit wichtigen Elementen versorgt.

Eine der am häufigsten verwendeten Pflanzen in Aquaponik-Anlagen ist die Tomate, welche in Kombination mit dem Afrikanischen Raubwelse beispielsweise in einer Anlage in Aschbach-Mark gezüchtet werden. Bei dieser Anlage handelt es sich um ein System, dessen Aufbau im Vergleich zu professionellen Aquaponik-Anlagen einfach ist. Dabei kommt unter anderem auch die Frage auf, ob diese Anlage die Pflanzen überhaupt mit den benötigten Nährstoffen versorgen kann. Die Beantwortung dieser Frage durch eine Beurteilung der unterschiedlichen Wasserparameter bildet den Kern dieser Arbeit.

Bevor allerdings näher auf diese und andere Forschungsfragen eingegangen wird, werden der Aufbau einer Aquaponik-Anlage und die Theorie der Pflanzenernährung erläutert. Darauf folgt die Beschreibung der durchgeführten Analysemethoden in Kooperation mit Dr. Andreas Zitek von der Universität für Bodenkultur in Wien: die Messung an einem Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma sowie die kontinuierliche Durchflussanalyse und verschiedene Feldtests. Die Ergebnisse dieser Messungen werden angeführt und im letzten Kapitel diskutiert sowie die Nährstoffversorgung beurteilt. Darauf schlussfolgernd werden Optimierungsvorschläge für die Aquaponik-Anlage in Aschbach-Markt erstellt.

2. Grundlagen der Aquaponik

2.1. Theorie der Aquaponik

2.1.1. Herkunft des Wortes Aquaponik

Aquaponik ist eine spezielle Anbauart, die aus zwei Teilen besteht. Der erste Teil ist eine Aquakultur, die Fischzucht und der andere Teil besteht aus einer Hydroponik, der Pflanzenzucht. Das Wasser in einer Fischzucht ist durch die Ausscheidungen der Fische reich an Nährstoffen. Dieses Abfallprodukt wird in der Aquaponik weiter verwendet, um die Pflanzen zu bewässern und mit wichtigen Nährstoffen zu versorgen.

(Warransford, 2015, S. 1)

2.1.2. Allgemeiner Aufbau einer Aquaponik-Anlage

2.1.2.1. Gekoppelte und entkoppelte Kreisläufe

Aquaponik-Anlagen lassen sich in zwei unterschiedliche Kreisläufe einordnen. Beide unterscheiden sich in der Verbindung von Aquakultur zu Hydroponik, also in der Verbindung von Fischen zu Pflanzen.

2.1.2.1.1. Gekoppeltes Kreisläufsystem

Bei dieser Anlagenart wird das Wasser von den Fischen direkt zu den Pflanzen weitergeleitet und direkt wieder zurück zu den Fischen. Dies macht den Aufbau der Anlage zwar kleiner und unkomplizierter, doch es bringt auch einige Nachteile mit sich. Zum einen kann der pH-Wert nicht mehr für die Fische und für die Pflanzen optimal angepasst werden, und zum anderen weisen die Pflanzen eventuell einen Mangel an manchen Nährstoffen auf.

(Kloas et al., 2015, S. 180-182)

2.1.2.1.2. Entkoppeltes Kreislaufsystem

Bei entkoppelten Kreislaufsysteme sind, wie der Name schon vermuten lässt, Fischzucht und Pflanzenzucht nicht direkt miteinander verbunden. Das Wasser fließt nämlich von der Fischzucht in ein separates Becken, wo der pH-Wert und verschiedene Nährstoffmängel angepasst, beziehungsweise ausgeglichen werden, sodass das Wasser optimale Voraussetzungen für die Aufzucht von Pflanzen aufweist. Zurückgeleitet wird das Wasser durch eine Kühlfalle, die das Transpirationswasser der Pflanzen der Luft entzieht und dieses erneut in einen Tank leitet. Dieser Tank enthält das Wasser für die Fische, weshalb dort wieder entsprechende Anpassungen vorgenommen werden.

(Kloas et. al., 2015, S. 180-182)

2.1.2.2. Mastbecken der Fische

Im Mastbecken leben die Fische bis zu ihrer Schlachtung. Je nach Tierart und Anzahl der Tiere muss dieses Becken unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

Eine dieser Eigenschaften ist die Größe des Beckens. Dabei ist die Anzahl der Fische und auch die empfohlene Besetzungsdichte zu beachten. Des Weiteren sollte die Temperatur der Art entsprechen, weshalb meist eine Beheizung des Wassers notwendig ist. Um die von den Fischen benötigte Menge an gelöstem Sauerstoff im Wasser garantieren zu können, muss vor allem in warmen Becken ein Belüftungssystem integriert werden.

(Morgenstern et. al., 2016, S. 7-10)

2.1.2.3. Pflanzenbeete

Neben der Gestaltung des Kreislaufsystems kann man bei Aquaponik-Anlagen zwischen drei grundsätzlichen Bauarten unterscheiden. Der größte Unterschied betrifft dabei die Pflanzenbeete. Je nachdem wie die Beete aufgebaut sind, resultieren weitere Änderungen in der restlichen Anlage.

2.1.2.3.1. Media-Based Aquaponics

Bei dieser Anbauart wachsen die Pflanzen auf einem Substrat. Das Substrat erfüllt in diesem Design vielerlei Aufgaben. Zum einen gibt es den Pflanzen Halt und sorgt dafür, dass diese aufrecht stehen. Zum anderen fungiert es gleichzeitig als Filter für feste Abfälle, wie dem Fischkot, und bietet gleichzeitig ausreichend Oberfläche für nitrifizierende Bakterien, für die man sonst einen eigenen Biofilter bräuchte (vgl. Abb. 1).

(Warransford, 2015, S. 3)

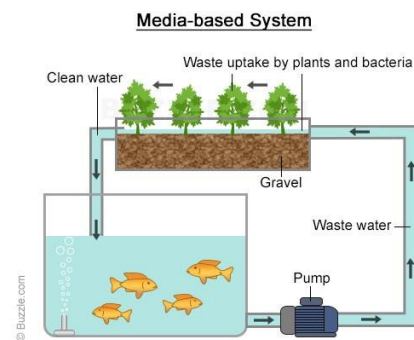


Abb. 1:

Schematischer Aufbau bei Media-Based Aquaponics.

(<https://gardenerdy.com/types-of-aquaponic-systems>, 14.02.2019)

2.1.2.3.2. Nutrient-Film Technique (NFT)

Bei der Nutrient-Film Technique fließt das Wasser durch Rohre, an deren Oberseite Löcher für die Wurzeln der Pflanzen sind (vgl. Abb. 2). Im Gegensatz zum vorher genannten Design, werden weder die Feststoffe automatisch aus dem Wasser gefiltert, noch das Ammonium zu Nitrat umgesetzt. Dazu werden zwei eigene Bauteile benötigt. Das erste ist ein Absetzbecken, welches die festen Bestandteile, wie den Fischkot, aus dem Wasser filtert. Das andere ist ein Biofilter, wo nitrifizierende Bakterien das Ammonium zu Nitrat umwandeln. Doch das eigentliche Hauptproblem stellen die Wurzeln der Pflanzen selbst dar. Die Wurzeln wachsen nämlich in den Rohren weiter, was diese komplett blockieren kann.

(Warransford, 2015, S. 3; Morgenstern et. al., 2016, S.13-14)

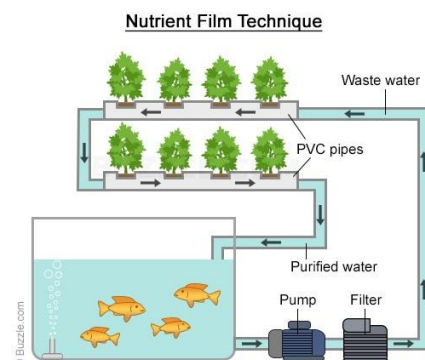


Abb. 2:

Schematischer Aufbau einer Aquaponik-Anlage mit NFT.

(<https://gardenerdy.com/types-of-aquaponic-systems>, 14.02.2019)

2.1.2.3.3. Deep Water Culture (DWC)

Bei dieser Art Pflanzen anzubauen, wachsen die Pflanze auf einem Floß, welches im Wasser schwimmt. Dabei hängen die Wurzeln durch Löcher hinunter in das Wasser (vgl. Abb. 3). Auch bei dieser Methode werden, wie bei der NFT, ein Biofilter und ein Absetzbecken benötigt. Doch im Gegensatz zur NFT stellt das Wachstum der Wurzeln kein Problem dar. Nur die Größe der Pflanzen spielt eine Rolle, da die Floße keine großen Pflanzen tragen können.

(Warransford, 2015, S. 3; Morgenstern et. al., 2016, S.12-13)

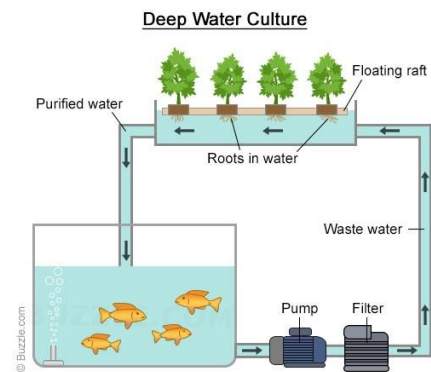


Abb. 3:

Schematischer Aufbau einer Aquaponik-Anlage mit DWC.

(<https://gardenerdy.com/types-of-aquaponic-systems>, 14.02.2019)

2.1.2.4. Absetzbecken

Im Absetzbecken werden die festen Bestandteile wie Kot oder nicht gefressenes Futter aus dem Wasser gefiltert. Dies beruht darauf, dass Teilchen, die schwerer sind als Wasser, auf den Grund sinken, dies wird als Sedimentation bezeichnet. Es ist allerdings zu beachten, dass keine großen Verwirbelungen im Wasser entstehen, da ansonsten die Sedimente wieder aufgewirbelt werden und weiter in den Biofilter gelangen könnten.

(Morgenstern et. al., 2016, S. 7-10)

2.1.2.5. Biofilter

In dem Biofilter befinden sich Füllkörper, deren vergrößerte Oberfläche ausreichend Platz für nitrifizierende Bakterienkulturen bietet. Gleichzeitig sind sie so gebaut, dass die Füllkörper gut von Wasser umspült werden können. Dies alles trägt zu einer höheren Reaktionsgeschwindigkeit und Atomeffizienz bei. Es ist allerdings zu beachten, dass ausreichend Luft und damit auch Sauerstoff in den Biofilter gelangt, da die Bakterien zur Nitrifizierung Sauerstoff benötigen.

(Morgenstern et. al., 2016, S. 7-10)

2.1.2.6. Kühlfalle

Dieser Bestandteil von Aquaponik-Anlagen ist nicht zwingendermaßen notwendig, außer in einem entkoppeltem Kreislaufsystem. Dort ist die Kühlfalle für die Rückführung des Wassers zu der Aquakultur verantwortlich. Das von den Pflanzen abgegebene Transpirationswasser ist gasförmig und wird von der Kühlfalle mitsamt der Luft angesaugt. Im Inneren wird die angesaugte Luft abgekühlt, sodass das Transpirationswasser kondensiert und abgepumpt werden kann.

(<https://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%BChlfalle>, 11.11.2018)

2.1.3. Nährstoffe der Pflanze

Nährstoffe stellen für Pflanzen die Ausgangsprodukte zur Synthese aller überlebensnotwendigen chemischen Verbindungen dar. Doch nicht alle Nährstoffe, die eine Pflanze aufnimmt, sind für das Überleben oder das Wachstum notwendig. Daher wird zwischen essentiellen und nützlichen Nährstoffen unterschieden.

2.1.3.1. Essentielle Pflanzennährstoffe

Essentielle Pflanzennährstoffe sind jene Nährstoffe, die jede Pflanze aufnehmen muss, um aus ihnen die für sie überlebensnotwendigen chemischen Verbindungen herzustellen. Dabei muss ein Element folgende drei Kriterien erfüllen, um zu den essentiellen Nährstoffen gezählt zu werden.

Eine Pflanze kann ohne dieses Element das vegetative oder das reproduktive Stadium ihres Lebenszykluses nicht vollenden. Ein Mangel dieses Elementes würde demnach zu einem anormalen Wachstum oder dem frühzeitigen Tod der Pflanze führen.

Dieses Element muss spezifisch und nicht durch ein anderes Element ersetzbar sein. Somit kann ein Mangel an einem essentiellen Nährstoff nur durch die Zugabe dieses Nährstoffes behoben werden.

Das letzte Kriterium besagt, dass dieses Element direkten Einfluss auf das Wachstum oder den Metabolismus einer Pflanze nehmen muss. Wenn allerdings der positive Effekt eines Elementes darin besteht, dass der negative Effekt eines Schadstoffes unterdrückt wird, zählt man dieses Element nicht zu den essentiellen Nährstoffen.

Diesen drei Kriterien entsprechen 17 essentielle Nährstoffe. Die essentiellen Nährstoffe sind: Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel, Phosphor, Magnesium, Calcium, Kalium, Eisen, Mangan, Kupfer, Zink, Nickel, Molybdän, Bor und Chlor. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten diese Elemente zu unterteilen. Die beiden gebräuchlichsten sind die Einteilung nach der Konzentration des jeweiligen Nährstoffes in der Pflanze und die Einteilung nach den Eigenschaften eines Nährstoffs und den Funktionen, welche dieser Nährstoff in der Pflanze übernimmt.

(Arnon und Stout, 1939, S. 371; Marschner, 2012, S. 3-4;

<http://www.plantphysiol.org/content/plantphysiol/14/2/371.full.pdf>, 01.01.2019)

2.1.3.2. Nützliche Nährstoffe

Neben den essentiellen Nährstoffen nehmen Pflanzen auch die so genannten nützlichen Nährstoffe auf. Diese können zwar positive Auswirkungen auf das Wachstum einer Pflanze haben, doch sie entsprechen nicht allen drei Kriterien, denen ein essentieller Nährstoff entsprechen muss. Eine andere Möglichkeit ist, dass ein Nährstoff nur für bestimmte Arten essentiell ist, aber nicht für alle Pflanzen. Der letzte Grund, durch den ein Nährstoff zu den nützlichen statt zu den essentiellen Nährstoffen gezählt wird ist, dass dieser Nährstoff nur unter speziellen Bedingungen für die Pflanze essentiell wird. Zu den nützlichen Nährstoffen gehören unter anderen: Natrium, Silicium, Kobalt, Selen und Aluminium.

(Marschner, 2012, S. 249)

2.1.3.3. Unterteilung in Makro- und Mikronährstoffe

Wie zuvor bereits erwähnt wurde, gibt es verschiedene Möglichkeiten die essentiellen Nährstoffe zu unterteilen. Eine dieser Möglichkeiten ist die Unterteilung nach Makro- und Mikronährstoffen. Die durchschnittliche Konzentration der jeweiligen Nährstoffe in der Pflanze entscheidet darüber, ob ein Nährstoff zu den Makro- oder zu den Mikronährstoffen gezählt wird.

Zu den Makronährstoffen gehören die essentiellen Nährstoffe, welche in den höchsten Konzentrationen in einer Pflanze vorkommen. Dazu gehören: Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel, Phosphor, Magnesium, Calcium und Kalium.

Die übrigen essentiellen, bei den Makronährstoffen noch nicht genannten Nährstoffe, zählen zu den Mikronährstoffen. Diese Nährstoffe liegen in niedrigeren Konzentrationen vor. In die Gruppe der Mikronährstoffe fallen somit: Eisen, Mangan, Kupfer, Zink, Nickel, Molybdän, Bor und Chlor.

(Schubert, 2017, S. 20-22)

2.1.3.4. Unterteilung nach Stoffwechsel-Funktion

Neben der Unterteilung nach Konzentration, also in Makro- und Mikronährstoffe, gibt es auch die Möglichkeit der Einteilung nach den Funktionen, die der jeweilige Nährstoff in der Pflanze übernimmt. Dabei wird zwischen vier Gruppen von Nährstoffen unterschieden.

(Marschner, 2012, S.4; Schubert, 2017, S. 24-45)

2.1.3.4.1. Assimilierte Nährstoffe

Die erste Gruppe der assimilierten Nährstoffe bilden Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel. Diese werden durch Assimilation, also durch den Einsatz von Enzymen und einer Reduktions- oder Oxidationsreaktion, in die organische Substanz eingebaut.

Die Nährstoffe Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff sind die grundlegendsten Bausteine organischer Verbindungen. Sie sind sowohl in der Stoffbildung, als auch im Stoffumsatz und der Strukturbildung beteiligt.

Stickstoff ist in Form von Aminogruppen ein essentieller Bestandteil von Aminosäuren und damit auch von Proteinen. Somit nimmt der Stickstoff großen Einfluss auf die Proteinbiosynthese und somit auch auf die Bildung von Enzymen und Strukturproteinen.

Der Schwefel stellt in Form von Thiolgruppen einen wichtigen Bestandteil vieler Enzyme dar und ist auch als Sulfolipid am Bau von Membranen beteiligt.

(Schubert, 2017, S. 23-27)

2.1.3.4.2. Esterbildende Nährstoffe

Esterbildende Nährstoffe sind, wie der Name schon vermuten lässt, besonders an der Bildung von Estern beteiligt. Die Bildung von Estern erfolgt über die Abspaltung von Wasser, indem eine organische Säure ihre Hydroxygruppe und ein Alkohol das Wasserstoff-Ion seiner Hydroxygruppe abgeben. In diese Gruppe fallen Phosphor, Bor und Silicium, letzteres ist aber nicht für alle Pflanzen essentiell.

Phosphor ist ein essentieller Bestandteil von Phospholipiden der Zellmembran und den Nukleinsäuren DNA beziehungsweise RNA. Der Transport von Energie in Form von Adenosintriphosphat (ATP) ist eine weitere Funktion dieses Elementes.

Bor wird von den Wurzeln der Pflanze als Borsäure aufgenommen und reagiert als solche mit Teilen der Zellwand, den cis-Diolen. Dies sind speziell orientierte, zweifache Alkohole. Dabei wird Wasser abgespalten, und es entsteht ein Boratester, ein strukturgebender Bestandteil der Zellwand.

Wie zuvor beschrieben, ist Silicium nur für manche Pflanzen, wie zum Beispiel Reis, essentiell. Bei diesen Pflanzen geht Silicium eine Bindung, ähnlich der von Bor, mit der Zellwand ein.

(Schubert, 2017, S. 28-30)

2.1.3.4.3. Freie und sorbierte Nährstoffe

Diese Gruppe enthält Nährstoffe, welche geladen sind und deren Ionen durch elektrostatische Anziehung eine Hydrathülle aufbauen: darunter fallen Kalium, Calcium, Chlor, Magnesium und Natrium. Die Nährstoffe dieser Gruppe liegen frei im Zellsaft vor und haben die Regelung von osmotischen und ionischen Gleichgewichten zur Aufgabe. Darüber hinaus haben diese Elemente noch Einfluss auf die Konformation von Enzymen.

Kalium, Calcium und Magnesium spielen eine Rolle bei osmotischen Vorgängen. Sie sind also für die Aufnahme und den Transport von Wasser zuständig. Dabei kann Kalium die beiden anderen Elemente in ihren osmotischen Funktionen zu einem Teil ersetzen.

Das Element Calcium hat neben der Regelung des Wasserhaushaltes auch andere, für diesen Nährstoff spezifische, Aufgaben. Beispielsweise ist Calcium mitverantwortlich an der Signalweitergabe in der Pflanze. Des Weiteren stabilisiert Calcium die Zellmembran, indem es eine Bindung zwischen den Carboxylgruppen von Proteinen und den Phosphat-beziehungsweise Sulfat-Gruppen der Doppellipidschicht eingeht.

Als Zentralatom von Chlorophyll nimmt Magnesium erheblichen Einfluss auf die Photosynthese. Außerdem ist es für die Aktivierung von mehreren Enzymen zuständig und essentiell für die Translation, der Übersetzung der mRNA (messenger ribonucleic acid) in eine Aminosäuresequenz.

Chlor kommt in der Pflanze in Form von Chlorid-Ionen vor. Durch deren negative Ladung stellen sie wichtige Gegenionen für die positiven Nährstoffe dieser Gruppe dar und dienen somit dem elektrostatischen Ausgleich. Darüber hinaus ist Chlor für die Wasserspaltung als Teil der Photosynthese essentiell.

Natrium gehört zu den nützliche Nährstoffen und ist nur für wenige Pflanzen von Bedeutung. In diesen kann Natrium unspezifische osmotische Funktionen einnehmen.

(Schubert, 2017, S. 30-37)

2.1.3.4.4. Nährstoffe in prosthetischen Gruppen

Die Nährstoffe dieser Gruppe sind in Chelatkomplexen gebunden, welche die Löslichkeit und Transportfähigkeit verbessern. Dafür gehen diese Elemente mindestens zwei Bindungen ein, deren Resultat ein Ring ist. Solche Bindungen gehen die Nährstoffe Eisen, Kupfer, Mangan, Zink, Molybdän und Nickel ein. Diese Elemente ermöglichen in der Pflanze oft als Cofaktoren enzymatische Reaktionen.

Eisen nimmt in der Pflanze eine wichtige Rolle ein. Als Zentralatom der Hämgruppe ist es ein essentieller Bestandteil für einige Enzyme. Aber auch für verschiedene Reaktionen der Photosynthese ist Eisen als Cofaktor notwendig.

Auch Kupfer wirkt bei bestimmten Reaktionen der Photosynthese und ist an der Protein- und Ligninsynthese, der Verholzung von Zellen, beteiligt.

Mangan hat eine stimulierende Wirkung auf die Enzymaktivität und entgiftet als Cofaktor, ebenso wie Kupfer und Zink, toxische Sauerstoffradikale.

Zink ist neben der Entgiftung auch noch an der Strukturbildung der sogenannten Zinkfinger-Proteine beteiligt. Dabei handelt es sich um Proteine die in die Transkription, also die Überschreibung der DNA in die mRNA, eingreifen können.

Als Cofaktor spezifischer Reaktionen des Stickstoff-Stoffwechsels ist Molybdän von essentieller Bedeutung für die Pflanze.

Der letzte Nährstoff ist Nickel, der als Cofaktor des Enzyms Urease an der Harnstoffspaltung beteiligt ist, und somit zur Stickstoffversorgung der Pflanze beiträgt.

(Schuber, 2017, S. 38-43)

2.1.3.5. Wachstums- und Ertragsgesetze der Pflanzenernährung

Nicht nur die Art der verschiedenen Nährstoffe, sondern auch die Menge, in der sie im Boden beziehungsweise im Substrat oder im Wasser vorliegen, spielt eine wichtige Rolle in der Pflanzenernährung. Dafür sind die Wachstums- und Ertragsgesetze der Pflanzenernährung aufgestellt worden. Diese Gesetze beschreiben die Auswirkung der Dosierung von Nährstoffen auf das Wachstum und den Metabolismus der Pflanze. Die drei grundlegendsten dieser Gesetze sind das Minimumgesetz, das Wirkungsgesetz der Wachstumsfaktoren und das Optimumgesetz.

Nach dem Minimumgesetz ist jener Wachstumsfaktor, der in der niedrigsten Konzentration, relativ zur benötigten Menge, vorliegt, limitierend für das Wachstum. Dieser Mangel kann nicht durch die Zuführung eines anderen Faktors kompensiert werden, nur die vermehrte Zugabe des mangelnden Wachstumsfaktors würde positive Effekte auf das Wachstum haben. Bei einem Wachstumsfaktor kann es sich um Nährstoffe, Licht, Wasser oder Temperatur handeln.

Für jeden Nährstoff gibt es eine optimale Konzentration, doch wenn diese überschritten wird, so besagt das Wirkungsgesetz der Wachstumsfaktoren, wird der Ertrag sinken.

Das Optimumgesetz fasst die beiden zuvor genannten Gesetze zusammen, indem es beschreibt, dass der Ertrag sowohl bei einer Unterschreitung, als auch bei einer Überschreitung der optimalen Konzentration sinken wird. Dabei hat ein Mangel an einem Element umso größere Auswirkungen, je mehr Nährstoffe sich im Optimum befinden.

(<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/minimumgesetz/43184>, 05.02.2019;

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/mitscherlich-gesetz/43330>, 05.02.2019;

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/optimumgesetz/48014>, 05.02.2019)

2.1.3.6. Modifizierte Steiner-Lösung

Um die bisher genannten Bedingungen in einer künstlichen Umgebung, wie der Aufzucht von Pflanzen in einer Hydroponik-Anlage nachahmen zu können, werden spezielle Nährlösungen benötigt. Ein Beispiel für solch eine Nährlösung ist die modifizierte Steiner-Lösung. Diese enthält sowohl Makronährstoffe als auch Mikronährstoffe in optimaler Zusammensetzung für eine Vielzahl von Pflanzen in Hydroponik-Anlagen, was sie von vielen anderen, einfacheren Nährlösungen unterscheidet. Die ursprüngliche Lösung wurde von Dr. Abram A. Steiner veröffentlicht und im Zuge späterer Experimente von Dr. John Larsen weiterentwickelt (vgl. Tabelle 1).

Die Einheit ppmw (parts per million weight) ist eine veraltete Maßeinheit zur Beschreibung von Konzen-

trationen und wird heutzutage nur noch selten verwendet. Um diese Einheit in $\mu\text{mol/l}$ umzurechnen, wurde die Konzentration in ppmw durch die Molare Masse des jeweiligen Elementes dividiert und mit 1000 multipliziert, damit sich die Konzentration auf einen Liter Nährlösung bezieht (vgl. Tabelle 2).

(Alexander, 2000, S. 52-55; Snyder, 2001, S. 13-15)

Tabelle 1:

Konzentrationen der Nährstoffe in der modifizierten Steiner-Lösung bei 100%iger Stärke in ppmw.

Nährstoff	Konzentration (ppmw)
Stickstoff (N)	171,00
Phosphor (P)	48,00
Kalium (K)	304,00
Calcium (Ca)	180,00
Magnesium (Mg)	48,00
Eisen (Fe)	3,00
Mangan (Mn)	1,00-2,00
Bor (B)	1,00
Zink (Zn)	0,40
Kupfer (Cu)	0,20
Molybdän (Mo)	0,10

Tabelle 2:

In $\mu\text{mol/l}$ umgerechnete Konzentrationen der Nährstoffe in der modifizierten Steiner-Lösung bei 100%iger Stärke.

Nährstoff	Konzentration ($\mu\text{mol/l}$)
Stickstoff (N)	12205,57
Phosphor (P)	1549,89
Kalium (K)	7774,94
Calcium (Ca)	4491,02
Magnesium (Mg)	1974,50
Eisen (Fe)	53,72
Mangan (Mn)	27,30
Bor (B)	92,51
Zink (Zn)	6,12
Kupfer (Cu)	3,15
Molybdän (Mo)	1,04

2.1.4. Stickstoffkreislauf in der Aquaponik-Anlage

2.1.4.1. Bedeutung des Stickstoffes für Lebewesen

Stickstoff ist ein wichtiger Bestandteil von Aminosäuren, den Bauteilen der Proteine, Nucleinsäuren und vieler weiterer organischer Verbindungen. Somit ist er für jedes Lebewesen unentbehrlich, besonders während des Wachstums werden daher große Mengen an Stickstoff aufgenommen. Produzenten, also Pflanzen, nehmen den Stickstoff hauptsächlich in Form von Nitrat aber auch in Form von Ammonium auf. Konsumenten, also Tiere, hingegen gewinnen den Stickstoff aus ihrer Nahrung, bestehend aus Pflanzen oder anderen Tieren. Zusammen bilden diese unterschiedlichen Abläufe den Stickstoffkreislauf (vgl. Abb. 4).

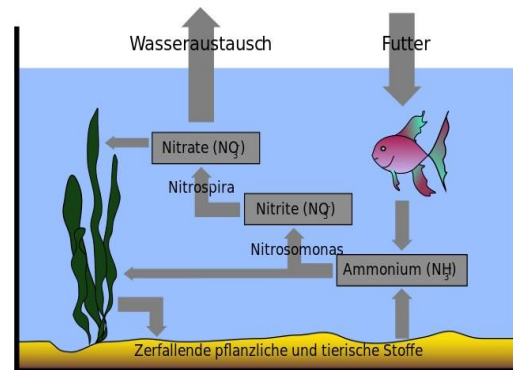


Abb. 4:

Schema des Stickstoffkreislaufes.

(https://www.aquasabi.de/aquascaping-wiki_aquarium_stickstoffkreislauf-im-aquarium, 14.02.2019)

2.1.4.2. Aminosäurestoffwechsel

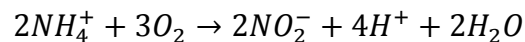
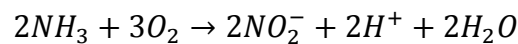
Der stickstoffhaltige Teil des Fischfutters sind die Proteine. Diese werden im Stoffwechsel in ihre Aminosäuren zerlegt. Die dabei entstehenden Aminosäuren werden unterschiedlich weiterverarbeitet. Sie können zur Ergänzung der körpereigenen Aminosäuren oder auch als Bausteine für neue Aminosäuren verwendet werden. Doch die fehlerhaften oder überschüssigen Aminosäuren werden abgebaut. Dabei wird Ammoniak oder auch, je nach pH-Wert, Ammonium freigesetzt und bei Fischen über die Kiemen ausgeschieden. Dieser Teil des Stickstoffkreislaufes findet in dem Mastbecken der Fische statt.

(<https://viamedici.thieme.de/lernmodule/biochemie/protein-und-aminosaureabbau-und-reaktionsprinzipien>, 03.11.2018;
<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/exkretion/3972>, 03.11.2018)

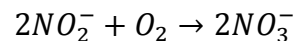
2.1.4.3. Nitrifikation

In diesem Teil des Stickstoffkreislaufes werden der giftige Ammoniak und das Ammonium in zwei Schritten zu Nitrat umgewandelt. Diese beiden Vorgänge werden durch nitrifizierende Bakterien, die im Biofilter beziehungsweise bei Media-Based Aquaponics im Substrat leben, ermöglicht. Für eine optimale Nitrifikation sollte der pH-Wert 7-8 betragen und das Wasser einen Sauerstoffgehalt von mindesten 62,5 µmol/l haben.

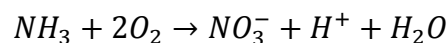
Im ersten Schritt wird der Ammoniak beziehungsweise das Ammonium von Nitrosobakterien unter aeroben Bedingungen zu Nitrit oxidiert, wobei die Bakterien die freigesetzte Energie und die freigesetzten Wasserstoff-Ionen zur Herstellung von ATP, dem universellen Energieträger in Zellen, nutzen.



Der nächste Schritt erfolgt unmittelbar nach dem ersten und dabei wird das zuvor entstandene Nitrit zu Nitrat weiter oxidiert. Dieser Vorgang erfolgt auch unter aeroben Bedingungen, doch diesmal unter dem Zutun von Nitrobakterien.



Diese beiden Schritte können in je einer Gesamtreaktionsgleichung für die Nitrifikation von sowohl Ammoniak als auch Ammonium dargestellt werden.



(<https://de.wikipedia.org/wiki/Nitrifikation>, 10.11.2018;
<http://www.chemie.de/lexikon/Nitrifikation.html>, 10.02.2019;
https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/ekud/anu/ANU_Dokumente/20130821_03_PhWertNitrifikationPufferSkript.pdf, 14.02.2019)

2.1.4.4. Stickstoffassimilation

Pflanzen benötigen, wie jeder andere Organismus, Stickstoff für den Bau von Aminosäuren, den Basen der DNA oder zur Synthese von Chlorophyll, dem Blattgrün. Um diesen Bedarf decken zu können, nimmt die Pflanze stickstoffhaltige Verbindungen aus dem Boden auf. Dieser Vorgang wird als Stickstoffassimilation bezeichnet. Er beschreibt die Aufnahme von Nitrat und zu einem geringeren Anteil auch die von Ammonium durch die Pflanzen und findet in den Pflanzenbeeten einer Aquaponik-Anlage statt.

Bei diesem Vorgang werden die aufgenommenen Ammonium-Ionen direkt in Amide und Aminosäuren eingebaut. Die erste Aminosäure, die in diesem Prozess hergestellt wird, ist das Glutamin, welches die Ausgangsverbindung zur Herstellung vieler weiterer Aminosäuren darstellt.

Die Nitrat-Ionen müssen allerdings zuvor noch zu Ammonium-Ionen reduziert werden, die anschließend, wie oben beschrieben, weiter verwendet werden. Für die Reduktion des Nitrates sind zwei Enzyme zuständig, die die Nitrat- über Nitrit- zu Ammonium-Ionen reduzieren.

(Marschner, 2012, S. 142)

2.2. Die Aquaponik-Anlage in Aschbach-Markt

2.2.1. Aufbau der Anlage

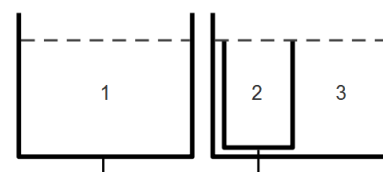
Die Proben für die verschiedenen chemischen Analysen (vgl. Kapitel 3) wurden aus der Aquaponik-Anlage von Herrn Bierbaumer entnommen (vgl. Abb. 6). Diese Anlage wurde von Herrn Bierbaumer selbst konstruiert und steht auf dessen Grundstück in Aschbach-Markt (PLZ 3361, Österreich).

Bei dieser Anlage handelt es sich um ein gekoppeltes Kreislaufsystem mit einer Deep Water Culture (DWC) zum Anbau der Pflanzen. Auf Grund der DWC sind in der Anlage sowohl ein Absetzbecken als auch ein Biofilter eingebaut (vgl. Kapitel 2.1.2). Die Anlage steht in einem Gewächshaus mit einer Grundfläche von 10 m² und enthält insgesamt 3 m³ Wasser, welches von einer 30 Watt-Pumpe durch die Aquaponik-Anlage gepumpt wird.

Das Mastbecken fasst 1 m³ Wasser und befindet sich in einem abgedunkelten Bereich des Gewächshauses. In diesem Becken leben 50 Afrikanische Raubwelse, bis sie reif für die Schlachtung sind. Diese Fische benötigen warmes Wasser um überleben zu können (vgl. Kapitel 2.2.2). Deshalb wird das Wasser von einem Heizstab mit einer Leistung von 1 kW auf 25 °C erwärmt und von einer Wärmepumpe auf dieser Temperatur gehalten, unabhängig von der Jahreszeit. Für die Rückführung des Wasser aus der DWC befindet sich an der Oberseite des Becken eine Öffnung, welche mit einem Netz geschützt ist.

Das Absetzbecken und das Mastbecken der Fische sind über ein Rohr an der Unterseite der beiden Becken verbunden. Der Rand des Absetzbeckens ist niedriger als der Wasserspiegel im Mastbecken und im Absetzbecken, wodurch das Wasser darüber steigt und in den Biofilter fließt (vgl. Abb. 5). Im Inneren des Absetzbeckens sind Bürsten angebracht, wodurch das Herausfiltern der groben Verunreinigungen unterstützt wird.

Bei dem Biofilter handelt es sich um einen 1 m³ Tank, an dessen Oberfläche die Füllkörper zur Nitrifikation schwimmen. Das Wasser im Biofilter fließt über ein



- 1 Mastbecken
- 2 Absetzbecken
- 3 Biofilter
- - - - - Wasserstand
- (nicht maßstabsgetreu)

Abb. 5:

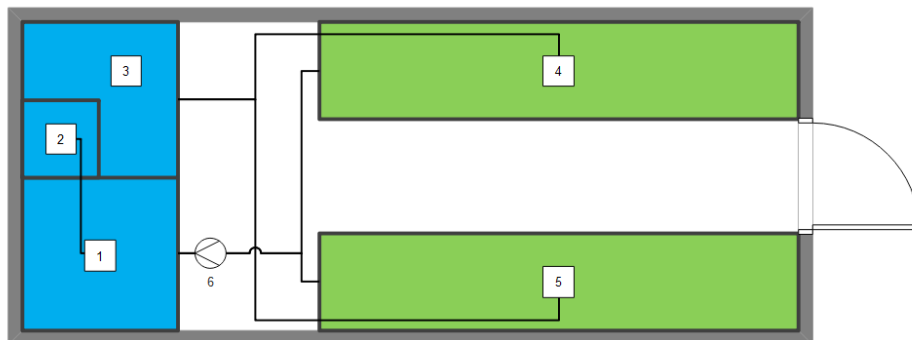
Querschnitt des Mastbeckens und der Filter.

(Skizze: Johannes Angerer)

Rohr, welches mit einem groben Sieb die Füllkörper in dem Biofilter zurück hält, weiter zu den Pflanzen.

Die Tomatenpflanzen wachsen auf zwei Flößen, die in zwei Becken zu je 500 l schwimmen. Durch Löcher in den Flößen hängen die Wurzeln der Pflanzen in das Wasser. Dabei ergibt sich eine Gesamtanbaufläche von 5,5 m² mit einer durchschnittlichen Besetzungsdichte von ca. 4 Tomatenpflanzen pro Quadratmeter. Das Wasser fließt durch die Becken der DWC und wird von einer 30 Watt-Pumpe durch ein Rohr zum Mastbecken gepumpt und fließt über die Öffnung zurück in das Mastbecken, wodurch sich der Kreislauf schließt.

(Persönliche Kommunikation mit Herrn Bierbaumer am 11.07.2018)



- | | |
|----------------|------------------------|
| 1 Mastbecken | 5 Linkes Beet |
| 2 Absetzbecken | 6 Pumpe |
| 3 Biofilter | (nicht maßstabsgetreu) |
| 4 Rechtes Beet | |

Abb. 6:

Skizze der Aquaponik-Anlage von Herrn Bierbaumer in Aschbach-Markt.

(Skizze: Johannes Angerer)

2.2.2. Der Afrikanische Raubwels

Bei den Fischen in der Aquaponik-Anlage von Herrn Bierbaumer handelt es sich um Afrikanische Raubwelse (vgl. Abb. 7). Dieser Fisch ist für Aquaponik-Anlagen besonders geeignet, da er nicht nur den im Wasser gelösten Sauerstoff, sondern auch den atmosphärischen Sauerstoff nutzen kann, wodurch die Sauerstoffversorgung kein Problem darstellt. Ein weiterer Vorteil ist die gute Futterverwertung (engl. Feed conversion ratio, FCR) des Afrikanischen Raubwelses von ca. 1, wodurch 1 kg Futter ca. 1 kg Gewichtszuwachs entspricht und so

sein Schlachtgewicht von 3 kg nach 3 Monaten erreicht wird. Die optimale Temperatur für die Aufzucht dieses Fisches liegt bei 25-30 °C und der optimale pH-Wert bei 6-8. Da dieser Fisch sehr robust ist kann er fast nur durch Kälte getötet werden, was zum einen für die Schlachtung ausgenutzt wird und zum anderen verhindert, dass dieser Fisch in österreichischen Gewässern zu einer invasiven Art werden kann.

(http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Clarias_gariepinus/en#tcBioFea, 15.02.2019;
https://en.wikipedia.org/wiki/Feed_conversion_ratio, 15.02.2019)



Abb. 7:

Afrikanischer Raubwels.

(<https://myingredients.com.ng/att/uploads/2018/09/catfish-large.png>,
15.02.2019)

2.2.3. Die Tomate

In der Aquaponik-Anlage von Herrn Bierbaumer werden neben Eiertomaten auch Kräuter und Salatköpfe angebaut (vgl. Abb. 8). Bei diesen Tomaten handelt es sich um eine alte Gattung, die als Samen gekauft und in die Aquaponik-Anlage eingesetzt wurden. Bei der Ernte ergibt sich, Herrn Bierbaumers Schätzung zufolge, ein Ertrag von drei großen Kisten Tomaten und 50 Salatköpfen. Eiertomaten sind vielseitig einsetzbar aber besonders für Soßen und Salate geeignet. Für ein optimales Wachstum benötigen diese Pflanzen neben einer kontinuierlichen Nährstoff- und Wasserversorgung auch viel Licht, ausreichend Wärme mit 21-27 °C und einen pH-Wert von 5,6-5,8.

(Snyder, 2001, S. 2-12; Alexander, 2000, S. 47-51; <https://de.wikipedia.org/wiki/Tomate>, 15.02.2019)



Abb. 8:

Bild einer Eiertomatenpflanze.

(https://www.biosaatgut.eu/upload_tmp/Eiertomate-Bolstar-Sensatica-F1--Solanum-lycopersicum-L-NICHT-VERFUGBAR-.jpg, 15.02.2019)

3. Methodik

3.1. Feldmessungen

3.1.1. Messung des pH-Wertes

Mittels einer Glaselektrode namens „testo 206-pH1“ wird bei diesem Messgerät der pH-Wert ermittelt. Dabei misst das Gerät die elektrische Potentialdifferenz zwischen der Probe und einer Referenzelektrode im Inneren. Der erhaltene Wert ist im Bereich von Millivolt und wird mittels dieser abgewandelten Form der Nernst-Gleichung in den pH-Wert der Probe umgerechnet:

$$\Delta E = -0,059 \frac{V}{pH} * (pH_1 - pH_2)$$

ΔE ist dabei die Differenz der beiden Elektrodenpotentiale, $-0,059$ ein Umrechnungsfaktor, der sich beim Umformen und Einsetzen von Standardbedingungen nach IUPAC, also eine Standardisierung bezüglich Temperatur und Luftdruck, in die Nernst-Gleichung ergibt. Der reale Umrechnungsfaktor muss aber vor dem Einsatz des Gerätes bestimmt werden, indem dieses mit zwei Standards kalibriert wird, um mögliche Abweichungen von den Standardbedingungen vor Ort zu berücksichtigen.

(https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nugi/Experimente/Grundlagen/pH-Wert/pH-Abhaeng_Redoxpotentials.pdf, 11.11.2018)

3.1.2. Leitfähigkeit und Temperatur

Es wird ein Gerät mit dem Namen „GMH 5430“ der Firma Greisinger für die Messungen verwendet. Dieses Messgerät bestimmt die Leitfähigkeit einer Probe und ist damit eine einfache Methode um abzuschätzen, ob in der Probe viele oder wenige Ionen gelöst sind. Es verfügt über Elektroden zur Messung der Spannung, der Stromstärke und der Temperatur. Der Widerstand und dessen Kehrwert, die Leitfähigkeit, lassen sich durch das Ohm'sche Gesetz durch den Quotienten von Spannung und Stromstärke, beziehungsweise von Stromstärke und Spannung bestimmen.

(https://www.greisinger.de/files/upload/de/produkte/bda/GMH5430_DE.pdf, 11.11.2018)

3.1.3. Gelöster Sauerstoffgehalt im Wasser

Hierbei kommt eine modifizierte Version der Winkler-Methode zum Einsatz. Diese Methode lässt sich in drei Teile unterteilen. Zuerst wird der Sauerstoff, der im Wasser gelöst ist, an Mangan gebunden. Dabei entsteht Manganoxid (MnO_2), welches schwer in Wasser löslich ist und als brauner Niederschlag ausfällt.

In dieser ersten Lösung sind aber nicht nur Mangan-Ionen enthalten, sondern auch Iod-Ionen. Diese reagieren aber vorläufig nicht mit dem Manganoxid, weil die ganze Lösung alkalisch ist und Iod erst im sauren Milieu aktiv wird. Um das Iod zu aktivieren, wird nun im zweiten Schritt konzentrierte Schwefelsäure hinzugegeben. Die gelösten Iod-Ionen fungieren als Reduktionsmittel und geben Elektronen ab, die das Manganoxid aufnimmt. Es entsteht in Wasser gelöstes Iod (I_2).

Im letzten Schritt wird das gelöste Iod mit Thiosulfat titriert (vgl. Abb. 9). Die verbrauchte Menge an Thiosulfat ist direkt proportional zu der Menge an Iod in der Probe. Die Konzentrationen der Lösungen in dem Test-Kit wurden extra so gewählt, dass man nicht, wie normalerweise bei dieser Methode, eine Umrechnung benötigt, sondern nur die Titrationsmenge mit 10 multiplizieren muss.

(http://109.205.171.104/~thomas/eth/1_semester/praktikum_chemie_WS_2003_2004/Kap2.pdf, 11.11.2018)



Abb. 9:

Titration des gelösten Iods.

(Foto: Andreas Zitek)

3.1.4. Bestimmung verschiedener Nährstoffparameter

Die Messung von verschiedenen Parametern wird mit einem Test-Kit der Firma Aqua-Check durchgeführt. Dieses Gerät arbeitet mit einer Kombination aus kolorimetrischer und photometrischer Analyse. Dabei werden zu der Probe die Chemikalien aus dem Test-Kit zur Bestimmung der jeweiligen Parameter hinzugefügt und so die Probe eingefärbt. Unterschiedliche Farbtöne entsprechen unterschiedlichen Konzentrationen. Die vorherige Eigenfarbe muss allerdings auch beachtet werden, und wird durch eine vorherige photometrische Referenzmessung in der Analyse berücksichtigt. Mit dieser Methode sind Konzentrationen unterschiedlicher Stickstoff-Ionen wie Ammonium-, Nitrat- und Nitrit-, aber auch die von Phosphat-Ionen messbar. Vor der Messung muss dieses Gerät, laut Bedienungsanleitung, allerdings nicht kalibriert werden.

(http://www.aqua-check.de/images/anleitung/AQUA-CHECK_Bedienungsanleitung.pdf, 11.11.2018)

3.2. Continuous Flow Analysis

Continuous Flow Analysis (CFA) ist eine Methode zur Bestimmung von Nitrit-, Nitrat-, Ammonium- und Phosphatgehalt. Der Name dieser Analysemethode stammt aus dem Englischen und steht für kontinuierliche Durchflussanalyse. Das hierbei verwendete Gerät ist von der Firma Alliance Instruments hergestellt worden. Es besteht aus vier Modulen, von denen jedes Modul für einen anderen Parameter zuständig ist, und einem Probennehmer, der die Proben ansaugt und über ein System aus Schläuchen zu den einzelnen Modulen leitet (vgl. Abb. 10).

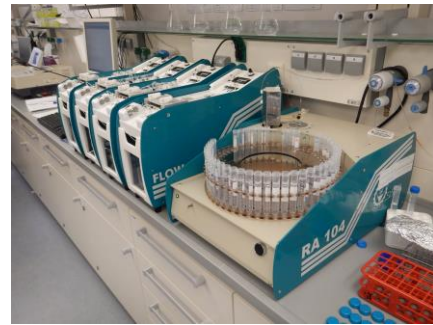


Abb. 10:

CFA-Gerät mit Probennehmer.

(Foto: Johannes Angerer)

Vor der Messung der Parameter muss die Probe filtriert werden, wodurch Verunreinigungen wie Staub, Dreck oder Pflanzenreste entfernt werden. Die eigentliche Analyse unterscheidet sich im Wesentlichen aber nicht von der Messung mit den Aqua-Check Test-Kits. Sie basiert nämlich auch darauf die Probe mit Chemikalien einzufärben und diese Verfärbung mit einem Photometer zu messen. Das Photometer ist allerdings sehr viel empfindlicher und die gemessenen Farben sind mit freiem Auge nicht erkennbar, weil die Proben zuvor stark verdünnt worden sind. Ohne Verdünnung würde der gemessene Wert weit außerhalb der Skala sein und wäre somit nicht mehr bestimmbar. Um höchste Genauigkeit zu gewährleisten, wird zuvor auch noch eine Standardreihe, das sind Lösungen, deren Parameterkonzentrationen bekannt sind, im CFA-Gerät zur Kalibrierung gemessen.

Je nachdem, welcher Parameter gemessen werden sollte, werden unterschiedliche Chemikalien von dem Gerät hinzugegeben. Auf Grund der benötigten Reaktionszeit der Chemikalien mit der Probe sind mehrere Spiralen eingebaut, um den Weg, und damit auch die Zeit bis zur Messung, zu verlängern. In dem Modul für die Messung des Nitratgehaltes wurde eine Heizspirale eingebaut, um die Probe zu erhitzen und die Reaktion zu beschleunigen.

Die Probe wird von dem Gerät angesaugt und durch das regelmäßige Einspritzen von Luft beziehungsweise Stickstoff in gleich große Segmente unterteilt (vgl. Abb. 11). Dadurch wird verhindert, dass sich die Segmente vermischen. Vor der Messung werden die Luftblasen wieder von der Probe getrennt und die Probe kommt in die Durchflussmesszelle des Photometers und wird hier für 60 Sekunden gemessen. Das Ergebnis wird durch einen Peak dargestellt, dessen Höhepunkt die Konzentration ist. Nach jeder Messung folgt für 30 Sekunden die Spülung mit einer Nulllösung, um die Messzelle auszuwaschen.

(<http://www.alliance-instruments.at/pdf/cfa.pdf>, 11.11.2018)

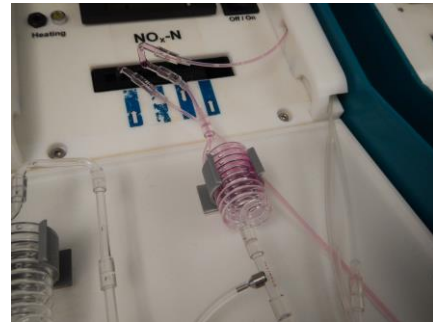


Abb. 11:

Spirale mit segmentierter Probe.

(Foto: Johannes Angerer)

3.3. Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS)

3.3.1. Aufbau eines ICP-MS

Das Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma der Marke Perkin Elmer wurde für die Multielementmessung verwendet. Dabei wird die vorbereitete Probe angesaugt und zu einem Aerosol zerstäubt. Dieses Aerosol wird in einer, durch hochfrequenten Strom erzeugten Argon-Plasmafackel, ionisiert. Die Ionen werden durch den Sampler-Konus, eine gekühlte Metallscheibe mit einem kleinen Loch, angesaugt und die freien Elektronen werden abgetrennt. Danach folgt der Skimmer-Konus, dessen Aufbau dem des Sampler-Konus ähnelt, durch den das Plasma in das Hochvakuum transportiert wird. Im Hochvakuum werden noch Photonen und neutral geladene Teile durch eine Ionenoptik entfernt, und das Plasma zu einem Ionenstrahl gebündelt. Der anschließende Quadrupol trennt die Ionen nach ihrem Masse/Ladung-Verhältnis. Dafür wird ein computergesteuertes elektrisches Feld zwischen vier Metallstäben gebildet. Das Feld wird in einem bestimmten Muster geschaltet, sodass immer nur eine Ionen-Art zum Detektor geleitet wird. Gleichzeitig werden die Ionen beschleunigt und in dem Detektor durch Elektronenvervielfachung mit anschließender Spannungsmessung gezählt. (vgl. Abb. 12)

(http://www.lbua.uni-jena.de/umweltanalytik_multimedia/dokumente/Wintersemester/Praktikum+UA+2011_2012/ICP_OES+und+ICP_MS.pdf, 16.02.2019; Persönliches Gespräch mit Christine Opper, am 13.07.2018)

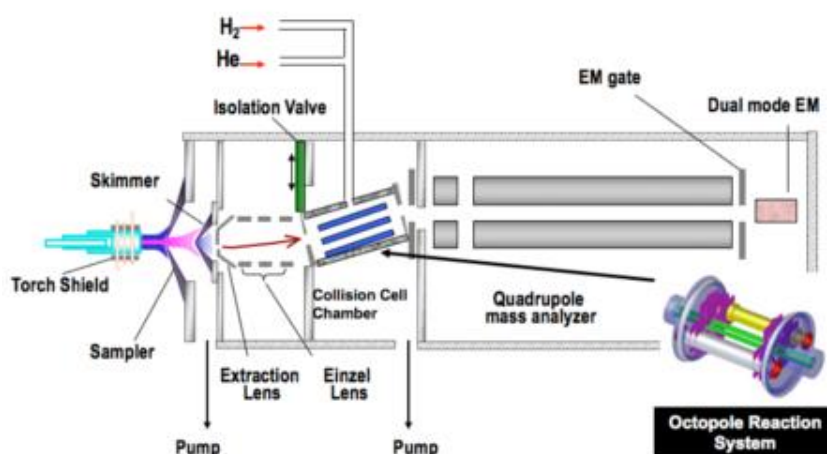


Abb. 12:

Schematischer Aufbau eines Massenspektrometers mit induktiv gekoppeltem Plasma.

(<https://www.marineclimateresearch.ifg.uni-kiel.de/de/labore/icp-ms/ausstattung>, 18.02.2019)

3.3.2. Probenentnahme und Probenvorbereitung

Wenn Proben für die Analyse in einem Massenspektrometer entnommen werden ist es wichtig, jede Kontamination der Probe zu vermeiden. Das fängt schon bei den Behältern für die Proben an. Diese werden nämlich mit Säure gewaschen.

Auch bei der Probennahme ist es wichtig die Probe nicht zu verunreinigen. Deshalb werden die Probefläschchen mit der Probe konditioniert, indem sie damit ausgewaschen werden. Außerdem sollte die Probe nicht von der Flüssigkeitsoberfläche entnommen werden. Dort könnten Verunreinigungen wie Staubpartikel schwimmen.

Nach der Entnahme werden die Proben im Labor filtriert. Dies erfolgt mit 5 ml Spritzen und Spritzenvorsatzfiltern (Marke Sartorius) mit einer Porengröße von 0,45 µm. Dabei wird für jede Probe eine eigene Spritze und ein eigener Filter verwendet, um die Proben nicht untereinander zu vermischen.

Trotz Filtrierung könnten immer noch Algen in den Proben wachsen und die Zusammensetzungen dadurch verändern. Um dies zu verhindern werden die Proben auf einen Salpetersäuregehalt von 2% angesäuert.

Manche Elementkonzentrationen sind allerdings so hoch, dass sie das Massenspektrometer kontaminieren können. Deswegen wird noch eine zweite Probenreihe, die aus verdünnten Proben besteht, erstellt. Dafür wird die angesäuerte Probe in einem Verhältnis von 1:30 mit 2%iger Salpetersäure (HNO₃) verdünnt. Um mögliche Verunreinigungen der Salpetersäure auszuschließen wird ein sogenannter Dilution Blank erstellt, der nur aus der, zur Verdünnung verwendeten 2%igen Salpetersäure besteht.

3.3.3. Kalibrierung des ICP-MS

Vor der Messung muss das Gerät zuerst kalibriert werden. Dafür werden 15 Standards eingesetzt. Dies sind Lösungen, deren Konzentrationen an Elementen bekannt sind. Darauf basierend wird eine Kalibriergerade erstellt, die die Konzentration den Einschlüssen pro Sekunde (cps, engl. counts per second) zuordnet. Es wird eine Kalibriergerade zur späteren Umrechnung für jedes Element, dessen Konzentration bestimmt werden sollte, erstellt. Nach abgeschlossener Kalibrierung wird diese durch 14 Kontrolllösungen überprüft, dabei wird die eigentliche Konzentration mit der gemessenen verglichen.

4. Messergebnisse

4.1. Feldtests

Der pH-Wert beträgt in der Quelle 7,17 und fällt in der Anlage auf durchschnittlich 6,37. Dieser Wert unterliegt in der gesamten Anlagen nur geringfügigen Schwankungen im Bereich von $\pm 0,03$. (vgl. Tabelle 3 und Abb. 13)

Auch bei den Ergebnissen der Messung der Temperatur sind nur kleine Veränderungen in der Anlage zu beobachten. Dabei liegt die Temperatur in der Anlage durchschnittlich bei 22,8 °C und in der Quelle bei 13,5 °C. (vgl. Tabelle 3 und Abb. 14)

Die Leitfähigkeit ist in der Anlage im Vergleich zur Quelle von 840 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf ca. 1054 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gestiegen. In der Anlage schwanken die Messwerte innerhalb von $\pm 6 \%$ um den Durchschnitt. (vgl. Tabelle 3 und Abb. 15)

Das Ergebnis der Messung des gelösten Sauerstoffgehalts ist in mg/l gegeben. Dieser Wert wird in $\mu\text{mol}/\text{l}$ umgerechnet, indem man den gemessenen Wert durch die molare Masse von Sauerstoff dividiert und mit 1000 multipliziert. Der Sauerstoffgehalt ist in der Quelle mit 146,88 $\mu\text{mol}/\text{l}$ am höchsten. In der Anlage liegen in Mastbecken und Absetzbecken Konzentrationen von ca. 104 $\mu\text{mol}/\text{l}$ vor. Danach fällt der Sauerstoffgehalt bis auf 56,25 $\mu\text{mol}/\text{l}$ im linken Beet, dabei sind die größten Sprünge zwischen Absetzbecken und Biofilter beziehungsweise zwischen Biofilter und dem linken Beet zu beobachten. Nach den Pflanzenbeeten verdoppelt sich der Sauerstoffgehalt nach der Rückführung in das Mastbecken beinahe. (vgl. Tabelle 3 und Abb. 16)

Tabelle 3:

Ergebnisse der Messungen mit den unterschiedlichen Messinstrumenten der Feldmessung.

Probenentnahmestellen mit Probencode						
Parameter	Quelle JA_1	Mastbecken JA_2	Absetzbecken JA_3	Biofilter JA_4	Beet Rechts JA_5	Beet Links JA_6
pH - Wert	7,17	6,38	6,38	6,37	6,34	6,37
Temperatur [°C]	13,50	22,90	22,80	22,90	22,60	22,70
Leitfähigkeit [μ S/cm]	840,00	1085,00	1074,00	1070,00	992,00	1051,00
Sauerstoffgehalt [mg/l]	4,70	3,30	3,35	2,60	2,30	1,80
Sauerstoffgehalt [μ mol/l]	146,88	103,13	104,69	81,25	71,88	56,25

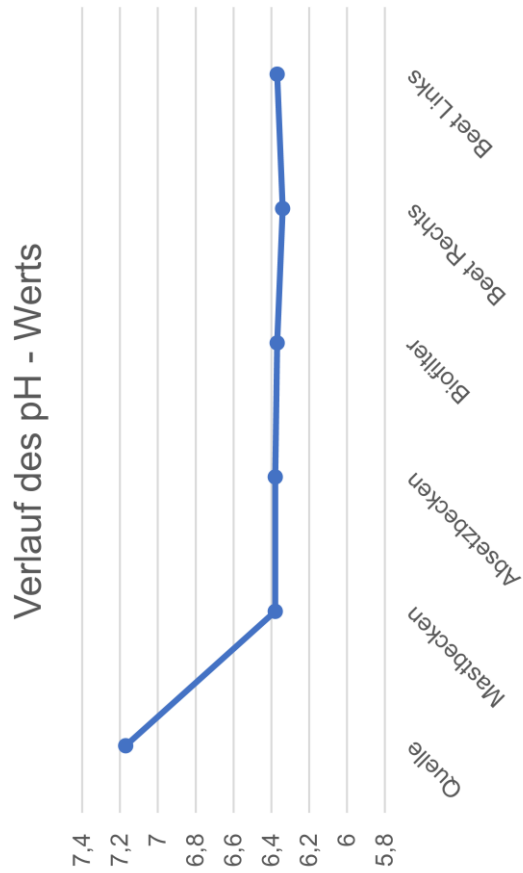


Abb. 13:
Ergebnisse aus der pH-Wert Messung.

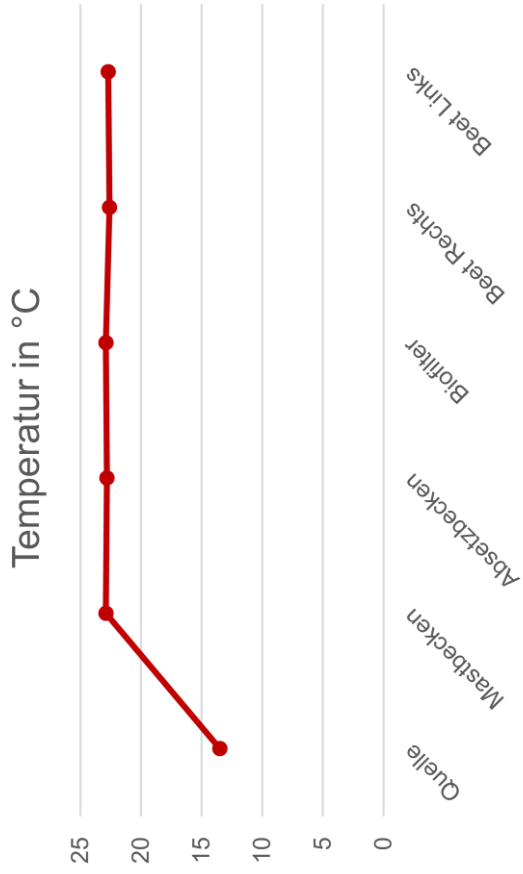


Abb. 14:
Verlauf der Temperatur.

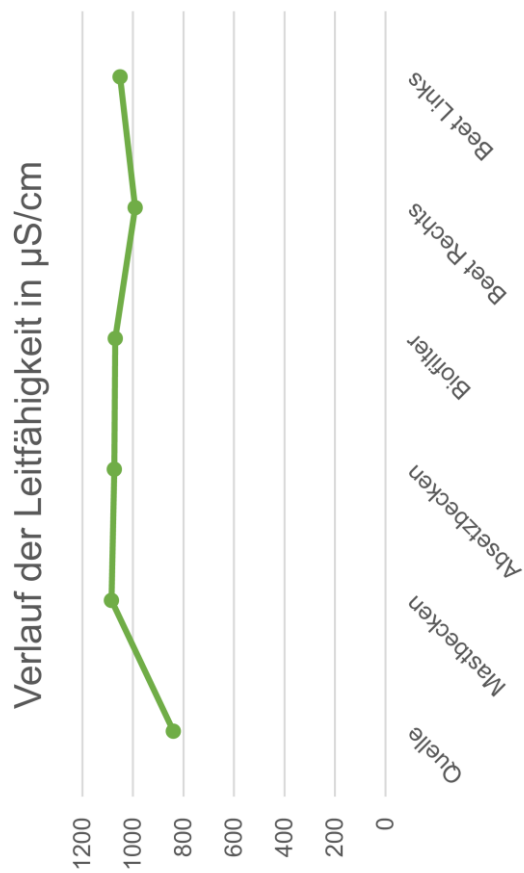


Abb. 15:
Ergebnisse der Messung der Leitfähigkeit.

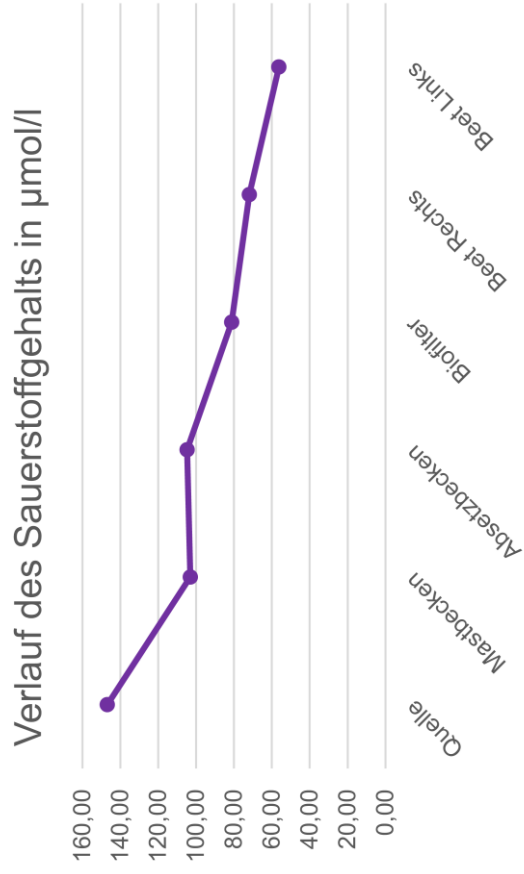


Abb. 16:
Verlauf des Sauerstoffgehaltes.

4.2. Continuous Flow Analysis

Die Ergebnisse für die CFA-Messung der Konzentration von Nitrit, Ammonium, Nitrat und Phosphat sind in der Einheit $\mu\text{g/l}$ gegeben. Zur Umrechnung in $\mu\text{mol/l}$ wurden die Werte aus der Messung durch die molare Masse des jeweiligen Ions dividiert und anschließend mit 1000 multipliziert (vgl. Tabelle 4 und Tabelle 5).

Die in der CFA gemessenen Nährstoffe, Nitrit, Ammonium, Nitrat und Phosphat liegen in der Anlage in weitaus höheren Konzentrationen vor als in der Quelle (vgl. Tabelle 5 und Abb. 17 und Abb. 18).

Die Konzentration von Ammonium steigt von Mastbecken zu Absetzbecken beziehungsweise von Biofilter zu dem linken Beet an. Im Gegensatz dazu sinkt die Konzentration vom Absetzbecken zu dem rechten Beet und von den beiden Beeten zum Mastbecken ab. (vgl. Tabelle 5 und Abb. 19)

Die Nitritkonzentration ist im Absetzbecken am höchsten und fällt danach ab. Dabei sind die größten Sprünge zwischen Mastbecken und Absetzbecken, beziehungsweise zwischen Biofilter und dem rechten Beet gemessen worden. (vgl. Tabelle 5 und Abb. 19)

Die Konzentration von Nitrat in der Aquaponik-Anlage ist im linken Beet am höchsten. Nach den beiden Beeten sinkt die Konzentration ab, bis sie im Biofilter ihren Tiefpunkt erreicht. Beim Verlauf sind die größten Sprünge zwischen Biofilter und den beiden Beeten erkennbar. (vgl. Tabelle 5 und Abb. 19)

Der Nährstoff Phosphor liegt im Mastbecken in der niedrigsten Konzentration vor. Nach dem Mastbecken steigt die Konzentration auf ihr Maximum im Biofilter an, um anschließend wieder zu sinken. (vgl. Tabelle 5 und Abb. 19)

Tabelle 4:

Messergebnisse der CFA mit Konzentration in µg/l.

Bezeichnung	Probenentnahmestellen mit Probencode	Ammonium [µg/l]	Nitrit [µg/l]	Nitrat [µg/l]	Phosphat [µg/l]
JA_1 Quelle	Quelle JA_1	4,95	0,80	6989,20	8,40
JA_2 Fisch	Mastbecken JA_2	3185,00	555,00	75557,50	57555,00
JA_3 grob	Absetzbecken JA_3	3362,50	662,50	75442,50	5970,00
JA_4 fein	Biofilter JA_4	3297,50	645,00	74570,00	6055,00
JA_5 Tomate rechts	Beet Rechts JA_5	3262,50	582,50	76232,50	6045,00
JA_6 Tomate links	Beet Links JA_6	3410,00	605,00	77607,50	5975,00

Tabelle 5:

Umgerechnete Werte der CFA mit Werten in µmol/l angegeben.

Bezeichnung	Probenentnahmestellen mit Probencode	Ammonium [µmol/l]	Nitrit [µmol/l]	Nitrat [µmol/l]	Phosphat [µmol/l]
JA_1 Quelle	Quelle JA_1	0,27	0,02	112,72	0,09
JA_2 Fisch	Mastbecken JA_2	176,55	12,06	1218,57	60,60
JA_3 grob	Absetzbecken JA_3	186,39	14,40	1216,72	62,86
JA_4 fein	Biofilter JA_4	182,79	14,02	1202,64	63,76
JA_5 Tomate rechts	Beet Rechts JA_5	180,85	12,66	1229,46	63,65
JA_6 Tomate links	Beet Links JA_6	189,02	13,15	1251,63	62,91

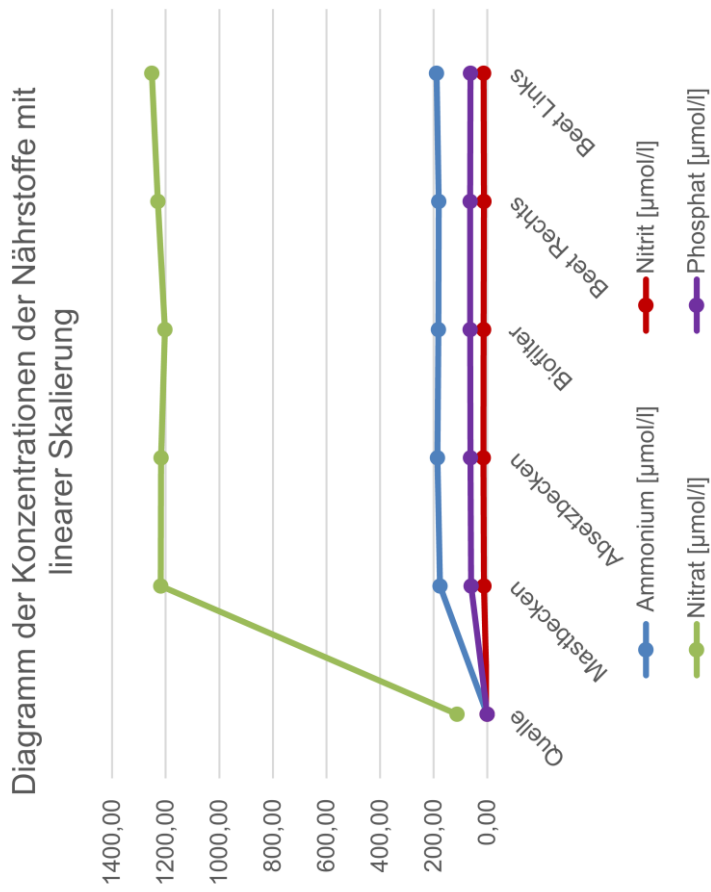


Abb. 17:

Verlauf der CFA-Werte von Ammonium, Nitrit, Nitrat und Phosphat.

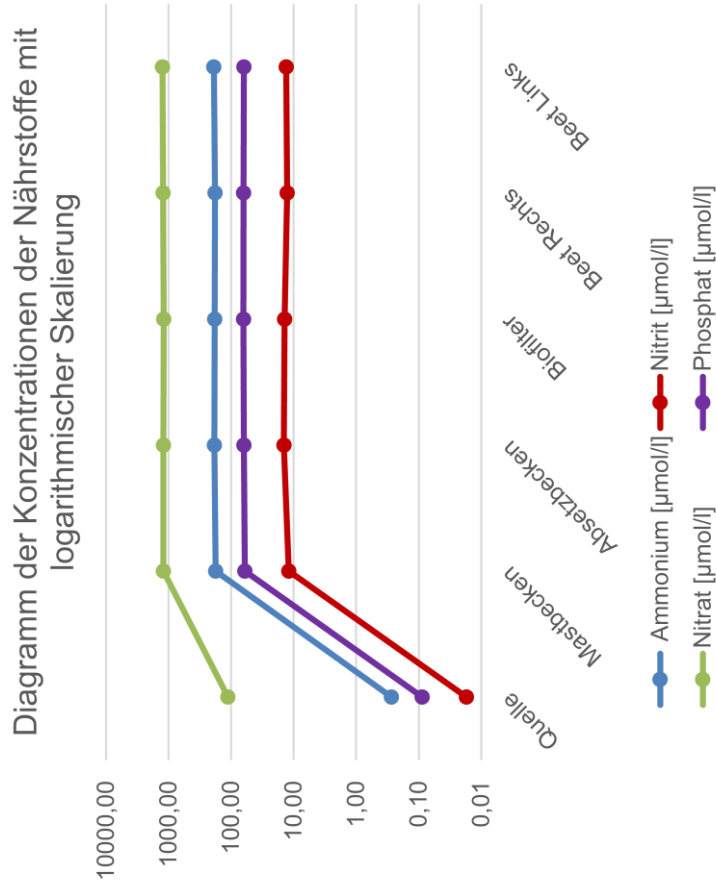


Abb. 18:

Verlauf der CFA-Werte von Ammonium, Nitrit, Nitrat und Phosphat mit logarithmischer Skala.

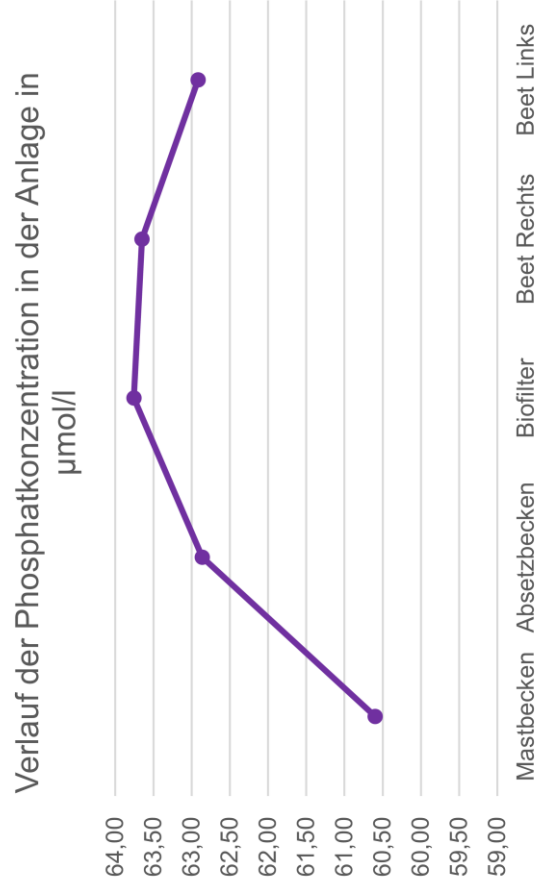
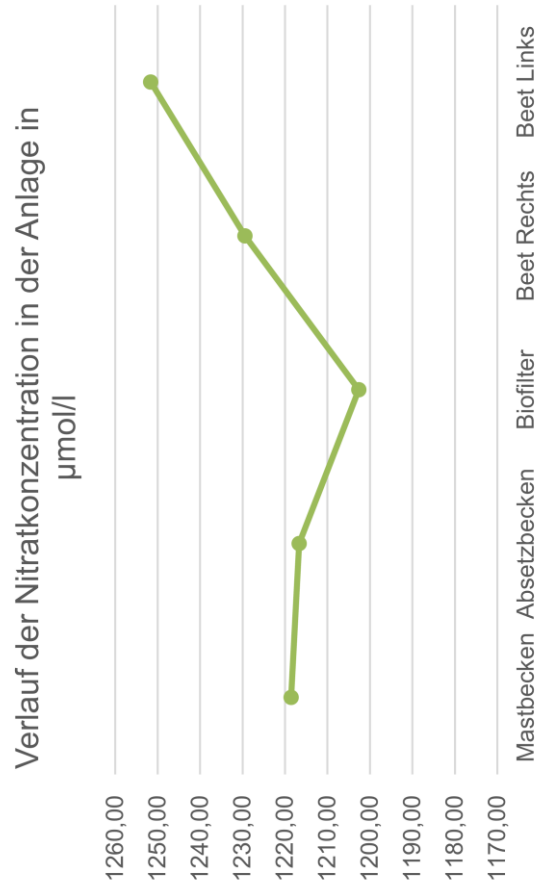
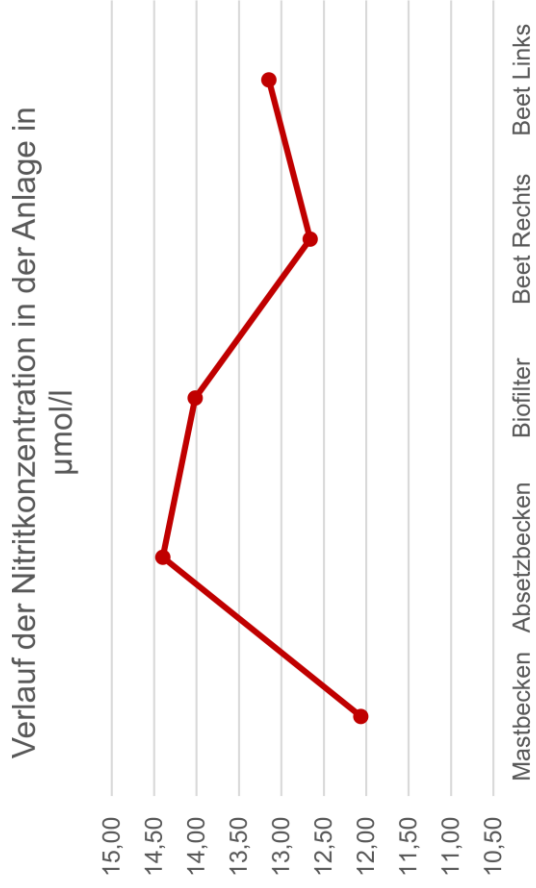
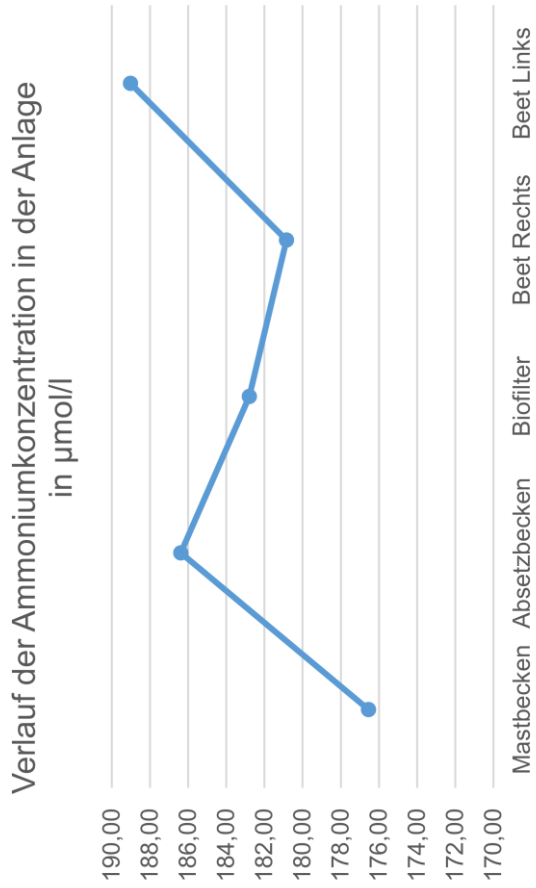


Abb. 19:

Verlauf der in der CFA gemessenen Konzentrationen von Ammonium, Nitrit, Nitrat und Phosphat.

4.3. Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma

Die gemessenen Werte werden von dem Massenspektrometer an Hand der zuvor bestimmten Kalibriergeraden automatisch von Einschlügen pro Sekunde (engl. counts per second, cps) zu $\mu\text{g/g}$ beziehungsweise zu ng/g umgerechnet. Die Messergebnisse für die Analyse der Elemente Magnesium, Kalium und Calcium sind in $\mu\text{g/g}$ angegeben, die Konzentrationen der Elemente Mangan, Eisen, Nickel, Kupfer, Zinn und Molybdän befinden sich dagegen im Bereich von ng/g (vgl. Tabelle 6).

Für die Umrechnung von $\mu\text{g/g}$ zu $\mu\text{mol/l}$ beziehungsweise von ng/g zu nmol/l wurde die ursprüngliche Konzentration durch die molare Masse des jeweiligen Elementes dividiert und mit 1000 multipliziert, damit sich die Angabe auf einen Liter bezieht (vgl. Tabelle 7).

Die Isotopenkonzentrationen der Elemente Magnesium, Calcium und Kupfer wurden für das jeweilige Element zu einem Gesamtwert zusammengefasst, da die Pflanze nicht zwischen diesen Isotopen unterscheidet (vgl. Tabelle 8).

Im Vergleich der einzelnen Daten sind großen Unterschiede zwischen Anlage und Quelle erkennbar, wohingegen in der Anlage selbst nur geringfügige Veränderungen vorliegen. Die Elemente Kalium und Calcium lagen in Konzentrationen von ca. 18-80 und 6700-8000 $\mu\text{mol/l}$ vor, wobei diese in der Anlage um 77 % und 14 % geringer war als in der Quelle (vgl. Tabelle 8 und Abb. 20). Im Gegensatz dazu erhöhten sich die Konzentrationen von Magnesium, Mangan, Eisen, Nickel, Kupfer, Zink und Molybdän (vgl. Tabelle 8 und Abb. 21). Dabei befanden sich die Konzentration von Magnesium bei 4300 $\mu\text{mol/l}$, was einer 23 %igen Steigerung gegenüber der Quelle entspricht, beziehungsweise die Konzentrationen von Mangan und Zink bei ungefähr 1000 nmol/l , somit das 850-beziehungsweise 36-fache im Vergleich zu der Quelle. Bei Eisen kam es von Quelle zu Anlage zu einem 29 %igen Anstieg von 6400 zu 8200 nmol/l . Die Konzentration der Elemente Nickel und Molybdän sind mit ca. 170 und 8 nmol/l etwa doppelt so hoch wie in der Quelle. Der letzte der Mikronährstoffe ist Kupfer, welches mit Konzentrationen von ungefähr 480 nmol/l in der Anlage 13-mal konzentrierter ist als in der Quelle.

Tabelle 6:

Daten der Multielementanalyse am ICP-MS mit Konzentration in µg/g und ng/g

	Probencode	Makronährstoffe							Mikronährstoffe						
Element		Mg	Mg	Mg	K	Ca	Ca	Ca	Mn	Fe	Ni	Cu	Cu	Zn	Mo
Molare Masse		24,00	25,00	26,00	39,00	42,00	43,00	44,00	55,00	57,00	60,00	63,00	65,00	66,00	98,00
Einheit		µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g
	Quelle	30,15	28,98	28,66	3,11	118,30	113,94	110,66	0,06	363,63	5,49	1,35	0,95	1,77	0,31
	Mastbecken	36,65	35,42	35,05	0,71	100,80	95,60	92,07	50,17	455,27	10,12	15,68	14,77	58,68	0,81
	Absetzbecken	36,32	35,71	35,05	0,73	100,22	96,35	93,64	49,51	462,79	11,40	15,95	14,93	57,46	0,83
	Biofilter	37,05	35,27	35,07	0,72	100,81	97,51	93,66	50,58	463,27	10,21	15,54	14,61	58,59	0,82
	Beet Rechts	37,42	35,76	35,25	0,77	103,71	99,41	96,38	51,81	490,46	11,30	16,42	15,15	59,58	0,83
	Beet Links	37,62	36,71	36,37	0,77	103,00	98,83	96,51	55,34	483,95	10,48	15,84	14,77	58,60	0,79

Tabelle 7:

Daten aus den Messungen am ICP-MS mit umgerechneten Konzentrationen.

	Probencode	Makronährstoffe							Mikronährstoffe						
Element		Mg	Mg	Mg	K	Ca	Ca	Ca	Mn	Fe	Ni	Cu	Cu	Zn	Mo
Molare Masse		24,00	25,00	26,00	39,00	42,00	43,00	44,00	55,00	57,00	60,00	63,00	65,00	66,00	98,00
Einheit		µmol/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	nmol/l	nmol/l	nmol/l	nmol/l	nmol/l	nmol/l	nmol/l
	Quelle	1256,30	1159,00	1102,45	79,69	2816,68	2649,66	2514,96	1,15	6379,39	91,44	21,37	14,66	26,86	3,18
	Mastbecken	1526,95	1416,67	1348,09	18,30	2399,94	2223,14	2092,50	912,25	7987,20	168,70	248,86	227,19	889,03	8,27
	Absetzbecken	1513,30	1428,29	1348,24	18,61	2386,09	2240,68	2128,17	900,27	8119,15	190,07	253,18	229,69	870,68	8,46
	Biofilter	1543,87	1411,00	1348,74	18,36	2400,16	2267,60	2128,63	919,65	8127,59	170,13	246,70	224,71	887,73	8,41
	Beet Rechts	1559,04	1430,33	1355,95	19,77	2469,32	2311,93	2190,54	941,92	8604,51	188,40	260,57	233,12	902,66	8,49
	Beet Links	1567,49	1468,46	1398,79	19,81	2452,44	2298,33	2193,46	1006,12	8490,39	174,61	251,43	227,26	887,94	8,10

Tabelle 8:

Zusammengefasste Werte der verschiedenen Isotope aus der Messung am ICP-MS

	Probencode	Makronährstoffe			Mikronährstoffe					
Element		Mg	K	Ca	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Mo
Einheit		µmol/l	µmol/l	µmol/l	nmol/l	nmol/l	nmol/l	nmol/l	nmol/l	nmol/l
	Quelle	3517,76	79,69	7981,30	1,15	6379,39	91,44	36,04	26,86	3,18
	Mastbecken	4291,72	18,30	6715,58	912,25	7987,20	168,70	476,05	889,03	8,27
	Absetzbecken	4289,83	18,61	6754,93	900,27	8119,15	190,07	482,87	870,68	8,46
	Biofilter	4303,61	18,36	6796,39	919,65	8127,59	170,13	471,41	887,73	8,41
	Beet Rechts	4345,32	19,77	6971,80	941,92	8604,51	188,40	493,69	902,66	8,49
	Beet Links	4434,74	19,81	6944,22	1006,12	8490,39	174,61	478,69	887,94	8,10

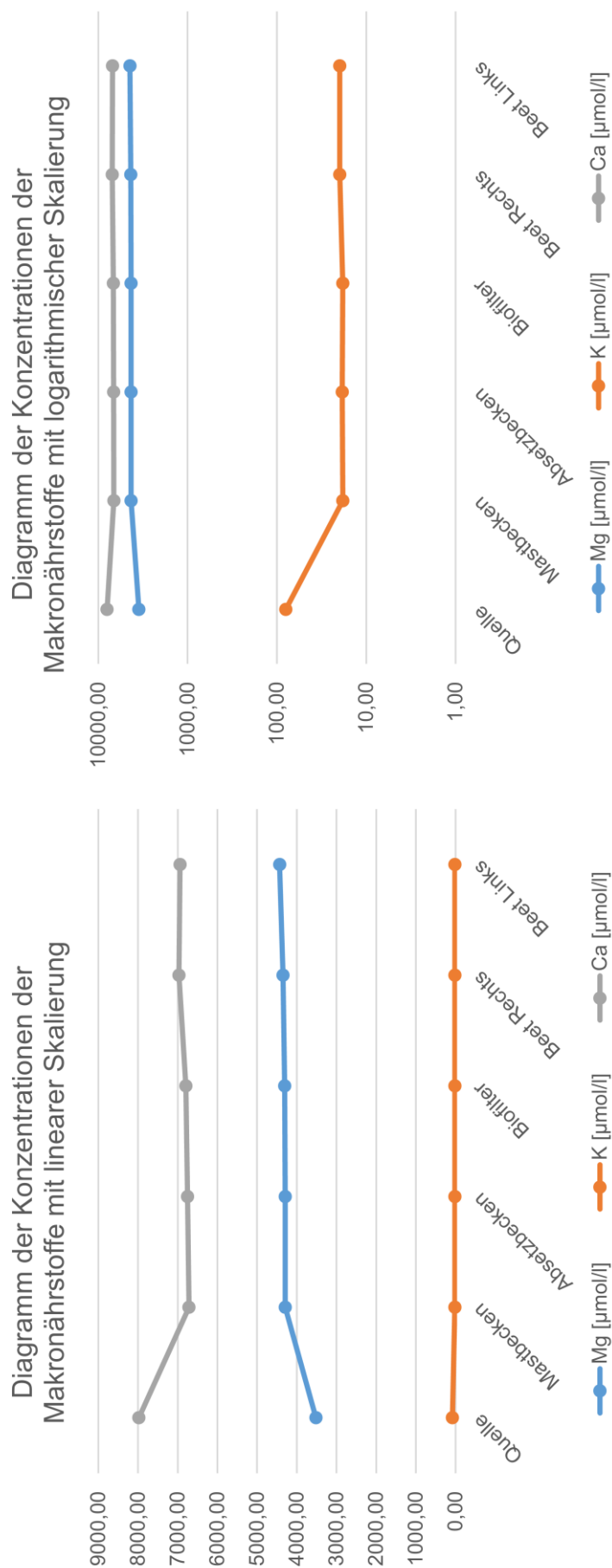


Abb. 20:

Verlauf der Konzentrationen der Makronährstoffe in $\mu\text{mol/l}$ basierend auf den Werten des ICP-MS.

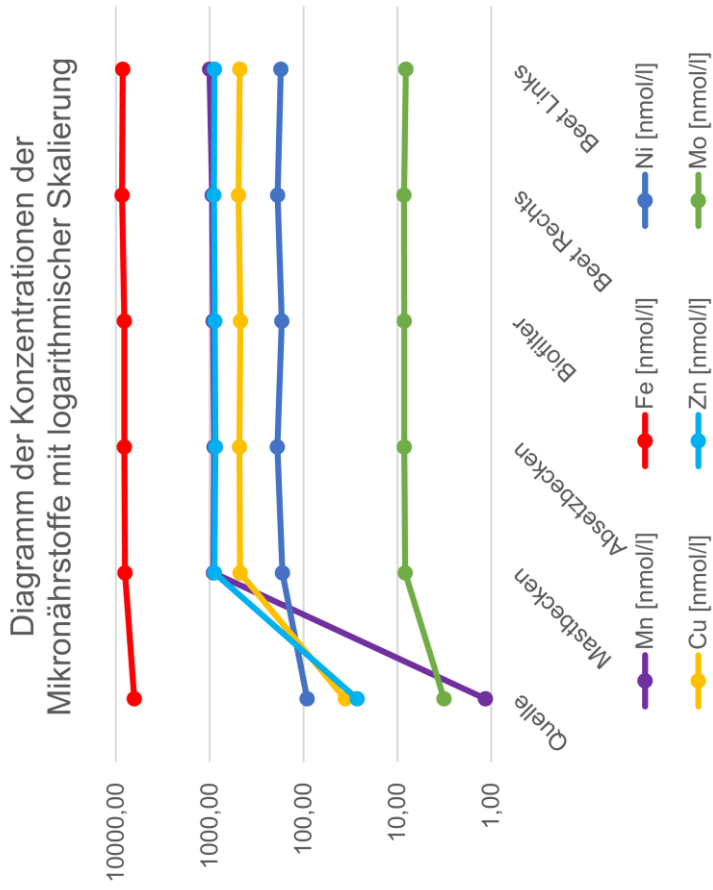
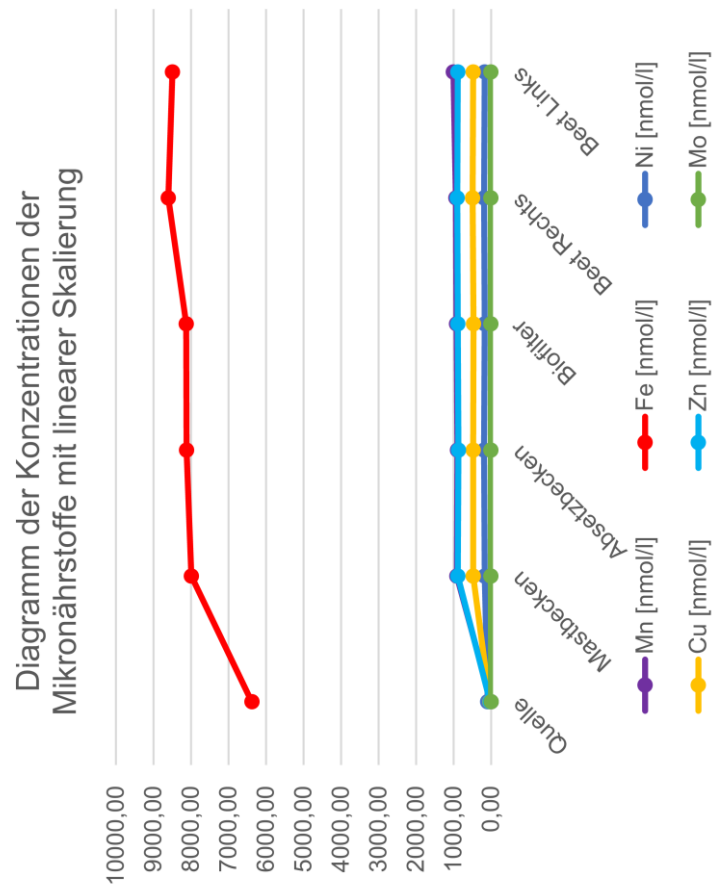


Abb. 2!:

Verlauf der Konzentrationen der Mikronährstoffe in nmol/l basierend auf den Werten des ICP-MS.

4.4. Konzentration aller gemessenen Nährstoffe

Um den Vergleich der Nährstoffe in der Diskussion einfacher zu gestalten wurden die Ergebnisse aus der CFA und der Analyse am ICP-MS in einer Tabelle zusammengefasst. Dabei wurden für die Konzentration von Stickstoff nur die Werte von Nitrat verwendet, weil bei der modifizierten Steiner-Lösung auch nur Nitrat enthalten ist. Da alle Nährstoffkonzentrationen in der modifizierten Steiner-Lösung in $\mu\text{mol/l}$ angegeben sind, wurden die Konzentrationen der Mikronährstoffe von nmol/l zu $\mu\text{mol/l}$ umgerechnet. (vgl. Tabelle 9)

Tabelle 9:

Zusammengefasste Nährstoffgehalte aus der CFA (N, P) und aus den Messungen am ICP-MS.

Probencode		Makronährstoffe					Mikronährstoffe				
Element	N	Mg	P	K	Ca	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Mo
Einheit	µmol/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l
Quelle	112,72	3517,76	0,09	79,69	7981,30	0,00115	6,37939	0,09144	0,03604	0,02686	0,00318
Mastbecken	1218,57	4291,72	60,60	18,30	6715,58	0,91225	7,98720	0,16870	0,47605	0,88903	0,00827
Absetzbecken	1216,72	4289,83	62,86	18,61	6754,93	0,90027	8,11915	0,19007	0,48287	0,87068	0,00846
Biofilter	1202,64	4303,61	63,76	18,36	6796,39	0,91965	8,12759	0,17013	0,47141	0,88773	0,00841
Beet Rechts	1229,46	4345,32	63,65	19,77	6971,80	0,94192	8,60451	0,18840	0,49369	0,90266	0,00849
Beet Links	1251,63	4434,74	62,91	19,81	6944,22	1,00612	8,49039	0,17461	0,47869	0,88794	0,00810

5. Diskussion

5.1. Vergleich der Nährstoffzusammensetzung in der Aquaponik-Anlage mit der modifizierten Steiner-Lösung

Für den Vergleich mit der modifizierten Steiner-Lösung werden die Messergebnisse aus der CFA und der Analyse am ICP-MS herangezogen (vgl. Tabelle 2 und Tabelle 9). Dabei fällt auf, dass die meisten Parameter in den Pflanzenbeeten in niedrigeren Konzentrationen vorliegen, als die modifizierte Steiner-Lösung für eine optimale Nährstoffversorgung empfiehlt. Zu diesen Nährstoffen gehören Stickstoff, Phosphor, Kalium, Eisen, Mangan, Zink und Molybdän. Nur die Nährstoffe Calcium und Magnesium liegen in höheren Konzentrationen vor.

Die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor liegen in den Pflanzenbeeten in Konzentrationen vor, die etwa einem Zehntel beziehungsweise einem Zwanzigstel des empfohlenen Betrages entsprechen. Die Konzentration von Kalium entspricht nur ca. einem Vierzigstel der Konzentration dieses Nährstoffes in der Steiner-Lösung. Mangan sollte für eine optimale Versorgung der Pflanzen in einer 30-mal und Eisen in einer 6-mal höheren Konzentration vorliegen. Es empfiehlt sich die 6-fache Konzentration an Zink und Kupfer und eine 120-fache für Molybdän. Die Nährstoffe Calcium und Magnesium liegen im Gegensatz zu den anderen Nährstoffen in einer 55% beziehungsweise 123% höheren Konzentration vor als in der modifizierten Steiner-Lösung. (vgl. Tabelle 2 und Tabelle 9)

Jedoch waren zum Zeitpunkt der Probenentnahme keine offensichtlichen Anzeichen für einen Mangel dieser Elemente am äußern Erscheinungsbild der Pflanzen erkennbar, wodurch eine gravierende Unterversorgung unwahrscheinlich ist. Allerdings spricht dies nicht gegen Maßnahmen zur Verbesserung der Nährstoffversorgung und eine genaue Überwachung des Pflanzenwachstums.

5.2. Verlauf des pH-Wertes

Wenn die optimalen Bereiche des pH-Wertes für Fische, Tomatenpflanzen und nitrifizierenden Bakterien verglichen werden, so fällt auf, dass es keinen pH-Wert gibt, der in jeglicher Hinsicht optimal ist. Einen Kompromiss zwischen den unterschiedlichen Ansprüchen stellt ein pH-Wert von 6,7-6,8 dar.

Im Vergleich mit dem optimalen pH-Wert sind die Werte in der Anlage zu sauer. Zum einen liegt dadurch zu viel Ammoniak vor und zum anderen ist die Nitrifikation stark limitiert. Dieser niedrige pH-Wert ist darauf zurückzuführen, dass die Anlage schon längere Zeit im Betrieb ist und durch die Nitrifikation in diesem Zeitraum das Wasser angesäuert wurde. (vgl. Tabelle 3, Kapitel 2.1.4.3 und Kapitel 2.2)

5.3. Zusammenhang von Sauerstoff und Nitrifikation

Im Vergleich des Verlaufs der unterschiedlichen Stickstoffverbindungen mit dem Verlauf der Sauerstoffkonzentration ist ein klarer Zusammenhang zwischen dem Rückgang der Sauerstoffkonzentration und dem Anstieg der Nitratkonzentration erkennbar (vgl. Abb. 5 und Abb. 8). Dies ist auf die Nitrifikation von Ammonium und Ammoniak zurückzuführen (vgl. Kapitel 2.1.4.3).

Die Rückgänge der Sauerstoffkonzentration von Absetzbecken zu Biofilter und von Biofilter zu den Pflanzenbeeten in Kombination mit den Anstiegen der Nitratkonzentration lässt darauf rückschließen, dass ein großer Teil der Nitrifikation sowohl im Biofilter als auch in den Pflanzenbeeten stattfindet.

5.4. Fehlerdiskussion

Die einzige Messmethode, bei der ein auffälliger, nicht vernachlässigbarer Messfehler auftrat, ist die Feldmessung mit dem Aqua-Check Test-Kit. Bei dieser Methode wurden die Konzentrationen derselben Verbindungen, Ammonium, Nitrat, Nitrit, und Phosphat, wie auch bei der CFA, der wesentlich genaueren Messmethode, bestimmt. Im Vergleich dieser beiden Methoden fallen große Abweichungen bei der Feldmethode von der Labormethode auf. Dabei gibt es teilweise Abweichungen um ca. 800%, weshalb diese Ergebnisse nicht verwendet werden konnten.

Diese großen Messfehler sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Konzentrationen in der Anlage weit außerhalb des Messbereiches des Aqua-Check Test-Kits lagen und durch die Verdünnung die Messergebnisse verfälscht wurden. Um die genaue Quelle für diesen Messfehler ermitteln zu können, wären allerdings weitere Experimente notwendig.

5.5. Optimierungsvorschläge für die Anlage von Herrn Bierbaumer

5.5.1. Einstellung des pH-Wertes

Sowohl die Messung als auch die Einstellung des pH-Wertes sind einfach zu bewerkstelligen. Daher empfiehlt es sich den pH-Wert regelmäßig mit Natronlauge mit folgender Formel, welche eigens für die Aquaponik-Anlage in Aschbach-Markt erstellt wurde, auf pH 6,75 zu korrigieren:

$$l = - \frac{3000(10^{(-6,75)} - 10^{(-pH_M)})}{10^{(pH_B-14)} + 10^{(-6,75)}}$$

Bei dieser Formel steht l für die zuzuführende Menge an Natronlauge in Liter, pH_M für den pH-Wert in der Anlage, pH_B für den pH-Wert der Natronlauge und 3000 für das Wasservolumen der Anlage.

Wenn für pH_M der mittlere pH-Wert der Anlage von 6,37 und für pH_B der pH-Wert einer 0,001 molaren Natronlauge von 11 eingesetzt werden, so ergibt sich eine zuzuführende Menge von 0,746 Liter.

5.5.2. Anpassung der Nährstoffkonzentrationen

Im Vergleich mit der modifizierten Steiner-Lösung ergab sich, dass manche Nährstoffe nicht in den optimalen Konzentrationen vorliegen. Diese Konzentrationen lassen sich zwar einstellen, was aber nur für einen begrenzten Zeitraum effektiv sein wird. Deshalb sollten, wenn regelmäßige Einstellungen geplant sind, auch regelmäßige Messungen vorgenommen werden, wodurch eine Überdüngung vermieden wird. Für die vereinfachte Anpassung wurden Formeln, spezifisch für die Aquaponik-Anlage in Aschbach-Markt, aufgestellt.

Für die Einstellung sollten dieselben Chemikalien wie bei der Herstellung der modifizierten Steiner-Lösung verwendet werden (vgl. Tabelle 10). Die Menge kann dabei mit folgender Formel berechnet werden:

$$m = \frac{3000 * M(c_S - c_P)}{10^6}$$

Dabei entspricht m der zuzuführenden Masse der Chemikalie in g, c_S beziehungsweise c_P der Konzentration in der modifizierten Steiner-Lösung beziehungsweise der mittleren Konzentration der Proben aus den Pflanzenbeeten in $\mu\text{mol/l}$ und M der molaren Masse in g/mol. Bei 10^6 handelt es sich um einen Umrechnungsfaktor von $\mu\text{mol/l}$ zu mol/l und die 3000 entsprechen dem Wasservolumen der Anlage in l. Nur bei der Einstellung des Elementes Kalium ist eine veränderte Formel notwendig, weil dieser Nährstoff auch schon bei der Einstellung von Phosphor in Form von KH_2PO_4 zugeführt wurde:

$$m = \frac{3000 * M[(c_{SK} - c_{PK}) - (c_{SP} - c_{PP})]}{10^6}$$

Bei dieser Formel entsprechen wieder m der Masse der zugeführten Chemikalie in g und M der molaren Masse dieser Chemikalie in g/mol. Die Formelzeichen c_{SK} und c_{PK} beziehungsweise c_{SP} und c_{PP} entsprechen den Konzentrationen von Kalium beziehungsweise Phosphor in der modifizierten Steiner-Lösung und der Proben in $\mu\text{mol/l}$. Auch hier stehen wieder 10^6 für einen Umrechnungsfaktor von $\mu\text{mol/l}$ zu mol/l und 3000 für das Wasservolumen in l.

Nach Einsetzen der Werte ergeben sich die Mengen für die zuzuführenden Chemikalien (vgl. Tabelle 10), dabei muss allerdings bei der Umsetzung in die Praxis die Konzentration der verwendeten Chemikalien berücksichtigt werden, da in dieser Tabelle von einem 100 %igen Reinheitsgrad ausgegangen wird.

Die Berechnungen ergaben, dass der Mangel an Phosphor durch eine Zugabe von 607 g Kaliumdihydrogenphosphat und der Kaliummangel durch die zusätzliche Zuführung von 1901 g Kaliumnitrat ausgeglichen werden können. Die Mikronährstoffkonzentrationen können in Form von EDTA-Komplexen eingestellt. Dabei ergaben sich folgende Massen: von Fe-EDTA und Mn-EDTA beziehungsweise von Zn-EDTA und Cu-EDTA sind 47 g und 27 g beziehungsweise 6 g und 3 g zuzuführen. Der letzte der Mikronährstoffe ist Molybdän, welches durch die Zugabe von einem halben Gramm Natriummolybdat eingestellt werden kann. (vgl. Tabelle 10)

Tabelle 10:

Ergebnis der Berechnung der zuzufügenden Nährstoffe in die Aquaponik-Anlage mit m in g.

	Makronährstoffe		Mikronährstoffe				
Element	P	K	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
Chemikalie	KH ₂ PO ₄	KNO ₃	Fe-EDTA	Mn-EDTA	Zn-EDTA	Cu-EDTA	Na ₂ MoO ₄
c_P	63,28	19,79	8,54745	0,97402	0,8953	0,48619	0,008295
c_S	1549,89	7774,94	53,72	27,3	6,12	3,15	1,04
M	136,09	101,11	348,089	347,178	357,62	353,774	205,920
m	606,94	1901,44	47,17	27,42	5,61	2,83	0,64

5.5.3. Verbesserung der Nitrifikation

Weil die Nitrifikation nicht nur im Biofilter sondern zu einem großen Teil auch in den Pflanzenbeeten stattfindet, ist davon auszugehen, dass die Nitrifikation im Biofilter unzureichend ist und daher in den nächsten Teilen der Aquaponik-Anlage weiterhin abläuft. Um die Nitrifikation im Biofilter zu verbessern, empfiehlt es sich mehr Sauerstoff für die Reaktionen der Nitrifikation in den Biofilter durch eine handelsübliche Luftpumpe für Aquarien einzuführen und die Menge an Bakterien durch mehr Füllkörper zu erhöhen.

6. Fazit und Ausblick

Die Aquaponik-Anlage von Herrn Bierbaumer ist, wie die Ergebnisse der unterschiedlichen Analysemethoden gezeigt haben, nicht perfekt für den Anbau von Pflanzen geeignet, aber für die Ansprüche im privaten Gebrauch mehr als ausreichend. Somit ist eine Aquaponik-Anlage mit so einem einfachen Aufbau keine Konkurrenz für große, professionelle Betriebe, sondern vielmehr für privaten Nutzer geeignet.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der Anlage wäre, sie als Vorbild für einfache Nachbauten in Afrika zu verwenden und dadurch mit geringem Aufwand und niedrigem Wasserverbrauch Fleisch und Gemüse für die Bevölkerung von Wüstenländern zu produzieren.

Weiter Möglichkeiten die Forschung auf diesem Gebiet auszuweiten, wäre die Messung der Auswirkungen der vorgeschlagenen Anlagenoptimierung sowie die Analyse des zeitlichen Verlaufs der Nährstoffparameter.

Literaturverzeichnis

Printquellen

Alexander, Tom (2000): *The Best of the Growing Edge. Popular Hydroponics and Gardening for Small-Commercial Growers and Hobbyists*. Bd. 2. Corvallis: New Moon Publishing, Inc.

Arnon, D.I. and Stout, P.R. (1939): *The Essentiality of Certain Elements in Minute Quantity for Plants with Special Reference to Copper*. In: *Plant Physiology*, 14, S. 371-375.

Kloas, Werner; Groß, Roman; Baganz, Daniela; Graupner, Johannes; Monsees, Henrik; Schmidt, Uwe; Staaks, Georg; Suhl, Johanna; Tschirner, Martin; Wittstock, Bernd; Wuertz, Sven; Zikova, Andrea; Rennert, Bernhard (2015): *Aquaculture Environment Interactions. A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts*. Bd. 7. Berlin: Inter-Research.

Marschner, Horst (2012): *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3. Aufl. London: Elsevier.

Morgenstern, Rolf; Biernatzki, Ralf; Boelhauve, Marc; Braun, Jürgen; Dapprich, Peter; Gerlach, Andreas; Haberland-Korr, Verena; Mergenthaler, Marcus; Mistele, Bodo; Schuster, Claus; Winkler, Pierre; Wittmann, Margit; Lorleberg, Wolf (2016): *Pilotstudie „Nachhaltige Aquaponik-Erzeugung für Nordrhein-Westfalen“*. Fachhochschule Südwestfalen, Iserlohn.

Schubert, Sven (2017): *Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor*. 3. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer.

Snyder, Richard G. (2001): *Greenhouse Tomato Handbook*. Mississippi State University, Mississippi State.

Warrensford, Gabriella (2015): *A Model of Nutrient Flow in an Aquaponics System using Diffusion-Advection-Reaction Equations*. Stetson University, DeLand.

Internetquellen

http://109.205.171.104/~thomas/eth/1_semester/praktikum_chemie_WS_2003_2004/Kap2.pdf (zuletzt abgerufen am 11.11.2018)

<http://www.alliance-instruments.at/pdf/cfa.pdf> (zuletzt abgerufen am 11.11.2018)

http://www.aqua-check.de/images/anleitung/AQUA-CHECK_Bedienungsanleitung.pdf (zuletzt abgerufen am 11.11.2018)

<http://www.chemie.de/lexikon/Nitrifikation.html> (zuletzt abgerufen am 10.02.2019)

http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Clarias_gariepinus/en#tcBioFea (zuletzt abgerufen am 15.02.2019)

http://www.lbua.uni-jena.de/umweltanalytik_multimedia/dokumente/Wintersemester/Praktikum+UA+2011_2012/ICP_OES+und+ICP_MS.pdf (zuletzt abgerufen am 16.02.2019)

<http://www.plantphysiol.org/content/plantphysiol/14/2/371.full.pdf> (zuletzt abgerufen am 01.01.2019)

<https://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%BChlfalle> (zuletzt abgerufen am 11.11.2018)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Nitrifikation> (zuletzt abgerufen am 10.11.2018)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Tomate> (zuletzt abgerufen am 15.02.2019)

https://en.wikipedia.org/wiki/Feed_conversion_ratio (zuletzt abgerufen am 15.02.2019)

<https://viamedici.thieme.de/lernmodule/biochemie/protein-+und+aminos%C3%A4ureabbau+%C3%BCberblick+und+reaktionsprinzipien> (zuletzt abgerufen am 03.11.2018)

https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/ekud/anu/ANU_Dokumente/20130821_03_PhWertNitrifikationPufferSkript.pdf (zuletzt abgerufen am 14.02.2019)

https://www.greisinger.de/files/upload/de/produkte/bda/GMH5430_DE.pdf (zuletzt abgerufen am 11.11.2018)

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/minimumgesetz/43184> (zuletzt abgerufen am 05.02.2019)

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/mitscherlich-gesetz/43330> (zuletzt abgerufen am 05.02.2019)

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/optimumgesetz/48014> (zuletzt abgerufen am 05.02.2019)

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/exkretion/3972> (zuletzt abgerufen am 03.11.2018)

https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nugi/Experimente/Grundlagen/pH-Wert/pH-Abhaeng_Redoxpotentials.pdf (zuletzt abgerufen am 11.11.2018)

Abkürzungsverzeichnis

ATP	Adenosintriphosphat
CFA	Continuous Flow Analysis
cps	counts per second
DNA	deoxyribonucleic acid
DWC	Deep Water Culture
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
FCR	feed conversion ratio
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry
mRNA	messenger ribonucleic acid
NFT	Nutrient-Film Technique
ppmw	parts per million weight
RNA	ribonucleic acid

SI-Einheiten sowie Elementsymbole und die Summenformeln chemischer Verbindungen sind in diesem Verzeichnis nicht angeführt.

Anhang

Tabelle 11:
Ergebnisse der Feldtests.

Messgerät/ Messmethode	Parameter	Quelle JA_1	Mastbecken JA_2	Absetzbecken JA_3	Biofilter JA_4	Beet Rechts JA_5	Beet Links JA_6
testo 206-pH1	pH - Wert	7,17	6,38	6,38	6,37	6,34	6,37
	Temperatur [in °C]	13,50	22,90	22,80	22,90	22,60	22,70
Aqua - Check NO ₃ - Test - Kit	Nitrat [in mg/l]	28,10	172,80	300,00	366,00	416,00	576,00
Aqua - Check NO ₂ - Test - Kit	Nitrit [in mg/l]	0,05	1,56	2,24	2,40	2,16	2,40
Aqua - Check NH ₄ ⁺ Test - Kit	Ammonium [in mg/l]		2,48				
Aqua - Check PO ₄ ³⁻ Test - Kit	Phosphat [in mg/l]	0,43	1,40	9,14	17,08	16,18	23,00
HI 3810 Dissolved Oxygen Test Kit	Sauerstoffgehalt [in mg/l]	4,70	3,30	3,35	2,60	2,30	1,80
GMH 5430	Leitfähigkeit [in µS/cm]	840,00	1085,00	1074,00	1070,00	992,00	1051,00

Tabelle 12:

Gesamte Ergebnisse der CFA.

ProbenNr	Bezeichnung	Datum	N-NH4 [µg/l]	N-NO2 [µg/l]	N-NO3 [µg/l]	P-PO4 [µg/l]
180711_Wasserprobe_4010	JA_1 Quelle	11-Jul-18	5,10	0,30	7039,70	8,40
180711_Wasserprobe_4010	JA_1 Quelle	11-Jul-18	4,80	1,30	6938,70	8,40
180711_Wasserprobe_4011	JA_2 Mastbecken	11-Jul-18	3060,00	555,00	75225,00	5500,00
180711_Wasserprobe_4011	JA_2 Mastbecken	11-Jul-18	3310,00	555,00	75890,00	6010,00
180711_Wasserprobe_4012	JA_3 Absetzbecken	11-Jul-18	3245,00	685,00	73860,00	5770,00
180711_Wasserprobe_4012	JA_3 Absetzbecken	11-Jul-18	3480,00	640,00	77025,00	6170,00
180711_Wasserprobe_4013	JA_4 Biofilter	11-Jul-18	3225,00	655,00	73140,00	5920,00
180711_Wasserprobe_4013	JA_4 Biofilter	11-Jul-18	3370,00	635,00	76000,00	6190,00
180711_Wasserprobe_4014	JA_5 Tomate Rechts	11-Jul-18	3210,00	565,00	75590,00	6030,00
180711_Wasserprobe_4014	JA_5 Tomate Rechts	11-Jul-18	3315,00	600,00	76875,00	6060,00
180711_Wasserprobe_4015	JA_6 Tomate Links	11-Jul-18	3425,00	600,00	77195,00	5990,00
180711_Wasserprobe_4015	JA_6 Tomate Links	11-Jul-18	3395,00	610,00	78020,00	5960,00

Tabelle 13:

Gesamte Ergebnisse der Messung am ICP-MS für die Elemente Li, Na, Mg, K, Ca, V, Cr und Mn.

	Probencode												
Element		Li	Na	Mg	Mg	Mg	K	Ca	Ca	Ca	V	Cr	Mn
Einheit		ng/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	ng/g	ng/g	ng/g
Massenzahl		7,00	23,00	24,00	25,00	26,00	39,00	42,00	43,00	44,00	51,00	53,00	55,00
	TCS_JA_1_1	10,18	16,65	29,15	27,98	28,26	3,03	115,51	109,79	105,79	0,64	2,59	0,28
	TCS_JA_1_2	10,18	16,29	29,39	28,46	27,78	3,04	116,28	113,24	108,73	0,70	2,79	0,07
	TCS_JA_1_3	10,72	18,09	31,92	30,49	29,95	3,25	123,11	118,78	117,45	0,73	2,86	0,02
	TCS_JA_2_1	10,97	27,06	36,76	35,56	35,21	0,70	99,25	93,81	90,39	1,23	3,11	49,44
	TCS_JA_2_2	11,35	27,62	36,75	35,68	35,37	0,74	102,73	96,73	93,27	1,26	3,28	50,21
	TCS_JA_2_3	11,30	26,58	36,43	35,01	34,57	0,71	100,41	96,25	92,54	1,28	3,30	50,87
	TCS_JA_3_1	11,30	26,55	36,52	35,80	35,79	0,75	101,52	98,01	94,33	1,32	3,31	49,79
	TCS_JA_3_2	11,40	26,37	35,73	35,07	34,20	0,67	98,17	94,09	93,28	1,29	3,36	49,12
	TCS_JA_3_3	11,66	27,74	36,71	36,25	35,16	0,76	100,96	96,95	93,32	1,33	3,44	49,64
	TCS_JA_4_1	11,45	26,71	37,14	34,85	34,71	0,70	101,78	96,64	92,65	1,30	3,29	50,35
	TCS_JA_4_2	11,31	26,50	36,51	35,09	34,90	0,71	98,78	96,49	92,73	1,28	3,40	49,60
	TCS_JA_4_3	11,84	27,09	37,51	35,89	35,60	0,74	101,86	99,38	95,60	1,33	3,46	51,79
	TCS_JA_5_1	12,22	28,09	38,35	36,42	35,84	0,80	105,84	101,55	99,09	1,38	3,62	52,24
	TCS_JA_5_2	12,18	27,91	37,68	35,75	35,17	0,78	103,71	99,25	95,93	1,40	3,64	51,11
	TCS_JA_5_3	12,02	26,96	36,22	35,11	34,76	0,74	101,59	97,44	94,14	1,37	3,62	52,07
	TCS_JA_6_1	12,08	27,60	37,66	37,45	36,65	0,78	103,38	100,27	98,60	1,37	3,53	53,06
	TCS_JA_6_2	11,99	27,49	36,91	35,91	36,17	0,71	100,73	97,24	93,69	1,40	3,62	59,28
	TCS_JA_6_3	12,05	27,30	38,29	36,78	36,29	0,83	104,90	98,98	97,26	1,37	3,55	53,67

Tabelle 14:

Gesamte Ergebnisse der Messungen am ICP-MS für die Elemente Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, und Mo.

Probencode												
Element		Fe	Co	Ni	Cu	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr	Mo
Einheit		ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g
Massenzahl		57,00	59,00	60,00	63,00	65,00	66,00	75,00	82,00	85,00	88,00	98,00
	TCS_JA_1_1	345,48	0,17	4,61	1,31	0,92	1,77	0,54	0,62	0,09	299,09	0,31
	TCS_JA_1_2	368,34	0,18	5,22	1,37	0,97	1,83	0,59	0,72	0,09	305,86	0,32
	TCS_JA_1_3	377,06	0,19	6,62	1,36	0,97	1,72	0,59	0,64	0,09	314,04	0,31
	TCS_JA_2_1	447,96	0,79	9,94	15,54	14,55	57,41	5,84	1,25	0,47	299,83	0,80
	TCS_JA_2_2	459,37	0,77	10,07	15,66	14,85	60,06	5,99	1,46	0,48	306,91	0,82
	TCS_JA_2_3	458,48	0,81	10,36	15,83	14,90	58,55	6,00	1,54	0,47	308,57	0,81
	TCS_JA_3_1	460,01	0,81	10,52	16,30	15,04	57,38	5,97	1,56	0,48	311,68	0,83
	TCS_JA_3_2	458,22	0,80	9,89	15,55	14,79	57,89	5,94	1,52	0,45	303,10	0,82
	TCS_JA_3_3	470,14	0,84	13,80	16,00	14,96	57,12	6,26	1,75	0,51	311,49	0,85
	TCS_JA_4_1	467,62	0,78	10,05	15,15	14,42	59,04	5,99	1,49	0,46	310,21	0,81
	TCS_JA_4_2	450,42	0,80	10,42	15,77	14,58	57,71	5,97	1,42	0,46	309,69	0,81
	TCS_JA_4_3	471,78	0,80	10,15	15,71	14,81	59,03	5,97	1,48	0,46	323,76	0,85
	TCS_JA_5_1	485,23	0,85	12,98	16,26	15,05	57,96	6,08	1,55	0,47	326,07	0,83
	TCS_JA_5_2	487,60	0,82	10,37	16,56	15,37	60,48	6,15	1,56	0,47	329,26	0,85
	TCS_JA_5_3	498,54	0,83	10,56	16,42	15,04	60,29	6,14	1,53	0,47	326,69	0,82
	TCS_JA_6_1	476,80	0,80	10,49	15,91	14,87	58,28	5,89	1,37	0,46	327,84	0,79
	TCS_JA_6_2	499,00	0,82	10,51	15,94	15,12	59,48	6,13	1,54	0,47	326,19	0,81
	TCS_JA_6_3	476,06	0,79	10,43	15,67	14,32	58,05	5,84	1,42	0,48	321,93	0,78

Tabelle 15:

Gesamte Ergebnisse der Messung am ICP-MS für die Elemente Ba, Pb und Uran.

	Probencode						
Element	Ba	Ba	Pb	Pb	Pb	Pb	U
Einheit	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g	ng/g
Massenzahl	137,00	138,00	206,00	207,00	208,00	238,00	
	TCS_JA_1_1	30,20	30,50	0,06	0,05	0,06	0,80
	TCS_JA_1_2	30,16	30,31	0,07	0,06	0,06	0,84
	TCS_JA_1_3	31,42	31,95	0,07	0,06	0,06	0,83
	TCS_JA_2_1	20,75	21,33	0,06	0,05	0,06	0,02
	TCS_JA_2_2	21,29	21,60	0,06	0,05	0,06	0,02
	TCS_JA_2_3	20,92	21,67	0,06	0,05	0,06	0,02
	TCS_JA_3_1	21,96	22,47	0,06	0,05	0,06	0,02
	TCS_JA_3_2	22,34	22,35	0,06	0,05	0,05	0,02
	TCS_JA_3_3	21,02	21,61	0,09	0,09	0,10	0,07
	TCS_JA_4_1	20,54	21,12	0,07	0,05	0,06	0,02
	TCS_JA_4_2	20,47	20,96	0,06	0,05	0,05	0,02
	TCS_JA_4_3	21,00	21,33	0,06	0,05	0,06	0,02
	TCS_JA_5_1	22,78	22,84	0,06	0,05	0,06	0,02
	TCS_JA_5_2	21,52	21,84	0,06	0,05	0,06	0,02
	TCS_JA_5_3	21,19	21,57	0,05	0,05	0,06	0,02
	TCS_JA_6_1	21,25	21,56	0,05	0,05	0,05	0,01
	TCS_JA_6_2	21,39	21,36	0,05	0,05	0,05	0,02
	TCS_JA_6_3	20,41	21,32	0,05	0,05	0,05	0,02



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

„Ich erkläre hiermit an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorliegende vorwissenschaftliche Arbeit selbstständig angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.“

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift



ZUSTIMMUNG

Ich gebe mein Einverständnis, dass ein Exemplar meiner vorwissenschaftlichen Arbeit in der Schulbibliothek des Franziskanergymnasiums Hall in Tirol aufgestellt wird.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift