

Facharbeit

Mykorrhiza



Wie abhängig sind bestimmte Pflanzen von Pilzen?

Von Sarah Heick

Fach: Biologie

Schule: Paul – Gerhardt – Schule – Hanau

Klasse: Ea

Betreuer: Herr Forchheim

Abgabetermin: 17.01.2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Begriffsklärung.....	1
2.1	Pilze.....	1
2.1.1	Mykorrhiza Pilze	2
2.2	Pflanzen.....	2
2.3	Symbiosen in der Theorie.....	3
2.3.1	Symbiosen bei Pilzen	4
2.3.2	Symbiosen bei Pflanzen	4
3	Mykorrhiza allgemein	5
3.1	Auswirkungen	5
3.2	Ektomykorrhiza.....	6
3.3	Endomykorrhiza.....	7
3.3.1	Arbuskuläre Endomykorrhiza	7
3.3.2	Ektendomykorrhiza	7
3.3.3	Arbutoide Mykorrhiza.....	8
3.3.4	Monotropoide Mykorrhiza	8
3.3.5	Ericoide Mykorrhiza.....	8
3.3.6	Mykorrhiza bei den Orchideen.....	8
4	Versuch.....	9
4.1	Aufbau und Durchführung	9
4.2	Beobachtungen	10
4.2.1	Ernte	11
4.3	Ergebnisse und Fazit	12
5	Anhang	13
5.1	Bilder, Statistiken und Aufnahmen	13
5.2	Literaturquellen	19
5.3	Internetquellen.....	19
5.4	Bildquellen	22
5.5	Materialien.....	23

1 Einleitung

Besonders faszinierend an dem Ökosystem Wald ist die Gemeinschaft, die scheinbar alle Biozönosen miteinander bilden. Viele Faktoren müssen genaustens aufeinander abgestimmt sein, damit dieses Ökosystem so existieren kann. Die vorliegende Arbeit behandelt einen dieser Faktoren; Mykorrhiza, die Symbiose zwischen Pilz und Pflanze. Die Lebensgemeinschaft ist nicht nur wichtig für Wirt und Symbiont, sondern für das gesamte Ökosystem. Der Schwerpunkt dieser Arbeit, wird auf der Abhängigkeit von Pflanzen zu ihren Symbiosepartnern, den Pilzen, liegen.

Während meiner Recherche nach einem interessanten Facharbeitsthema, bin ich zunächst auf Pilze und wenig später auf deren Symbiose mit Pflanzen, Mykorrhiza, gestoßen. Besonders hat mich die Vielfältigkeit und Wichtigkeit der Mikroorganismen fasziniert. So umfasst das Reich der Pilze zum einen, die mit einem Durchmesser von 3 µm, mikroskopisch kleine Backhefe (*Saccharomyces cerevisiae*)^[3], zum anderen, den größten Organismus der Welt; den „Dunklen Hallimasch“ in Oregon. Dieser erstreckt sich über 900 Hektar^[3]. Des Weiteren sorgt die Lebensgemeinschaft u.a. für die Vernetzung des Waldes und schafft so eine Gemeinschaft.

Beginnen wird die vorliegende Arbeit mit einem theoretischen Teil, welcher die Lebensgemeinschaft, „Mykorrhiza“, zunächst erläutern wird. Vor allem der Zweck, der Ablauf und die Auswirkungen der Pilz – Wurzel – Symbiose werden hierbei genauer beleuchtet. Auf die Theorie folgt schließlich ein praktischer Teil. Dieser wird aus einem Versuch bestehen, welcher die gesamte Arbeit nochmals auf eine bestimmte Pflanzenart, in diesem Fall auf die Buschbohnen der Sorte „Brillant“ (bot. Name: *Phaseolus vulgaris*)^[6], spezialisieren wird. Zwei Pflanzen, eine mit beigemischten Pilzsporen und eine ohne, wurden unter exakt gleichen, äußeren Bedingungen angepflanzt und beobachtet. Die Abhängigkeit der Buschbohnen kann somit anhand des einzig veränderten Faktors – den Pilzsporen – ermittelt werden.

2 Begriffsklärung

2.1 Pilze

Pilze (Fungi) sind Organismen, die neben den Tieren und den Pflanzen ein eigenes Reich der „Eukaryotischen Lebewesen“ bilden. Obwohl momentan lediglich 71.500 unterschiedliche Pilzarten bekannt sind,^[9] wird die tatsächliche Anzahl an Arten auf 1,5 Millionen geschätzt.^[3] Einerseits können sie als Symbionten und Destruenten bzw. durch die Vernetzung des Waldes für Stabilität in einem, meist terrestrischen Ökosystem sorgen. Als Parasiten können phyto- oder tierpathogene oder auch mykoparasitische Pilze dem Wirt jedoch auch schwer schaden, da die feinen Pilzhyphen in der Lage sind auch intrazellulär zu wachsen.^[3]

Während die einzelligen, meist asexuellen Pilze eine Minderheit bilden, sind die „Mycelpilze“ (siehe Anhang, Abb.1) weit verbreitet.^[7] Der eigentliche Pilzkörper dieser Pilze hat hauptsächlich eine

Ernährungsfunktion und wird von einem Geflecht aus zahlreichen fädigen Vegetationsorganen (Hyphen) gebildet, dem Mycel. ^[2] Die einzelnen Hyphen werden mithilfe von Trennwänden (Septen), die mit Poren versehen sind, in Zellen unterteilt und können verzweigt (septiert) oder unverzweigt (unseptiert) vorliegen. ^[26] Der oberirdische Fruchtkörper ist demnach nur ein kleiner Teil des Pilzes. Wegen der Bildung und Verbreitung von geschlechtlichen und/oder ungeschlechtlichen Sporen steht er überwiegend in den Diensten der Fortpflanzung des Pilzes. ^[2]

Die Zelle eines Pilzes charakterisiert sich durch eine, v.a. aus Chitin bestehende, Zellwand und durch mehrere, kleinere Vakuolen, welche die Fähigkeit haben die Zellgrenze zu überschreiten und so ihre Inhaltsstoffe in den Hyphen zu transportieren. Außerdem verfügen die Zellen über einen Zellkern, ein ER (Endoplasmatisches Retikulum), eine Zellmembran, Cytoplasma und mehrere Ribosome, Mitochondrien, Lysosome und Peroxisome. ^[3]

2.1.1 Mykorrhiza Pilze

Es ist bekannt, dass ungefähr 90% aller Landpflanzen eine Symbiose (Mykorrhiza) mit den sogenannten „Mykorrhiza-Pilzen“ eingehen können. ^[8] Andere Pflanzenarten haben die Qualifikation eine Mykorrhiza einzugehen, in bestimmten Lebensräumen oder gar komplett, verloren. Diese Pflanzen sind jedoch nicht miteinander verwandt. ^[21]

Mykorrhiza-Pilze sind spezielle Bodenpilze, die nicht in der Lage sind komplexe Kohlenhydrate abzubauen, ^[5] da ihnen ein bestimmtes Enzym fehlt. ^[21] Zudem wurde erforscht, dass circa 6.000 Pilzarten die Fähigkeit besitzen in einer solchen Stoffwechselsymbiose zu leben. ^[5]

2.2 Pflanzen

Die Pflanzen (Plantae) bilden mit rund 390.000 Arten ein eigenes Reich der „Eukaryotischen Lebenswesen“. ^[6] Aufgrund von den Chloroplasten in den Pflanzenzellen, besitzen sie die einmalige Fähigkeit mithilfe von Wasser (H₂O), Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Licht (Strahlungsenergie des Sonnenlichts) Photosynthese zu betreiben. ^[25] Wegen den Ausgangsprodukten Glucose (C₆H₁₂O₆) und Sauerstoff (O₂) werden sie zu bedeutsamen Energieträgern, liefern wichtige Rohstoffe, bilden den Startpunkt aller Nahrungsketten (Produzenten) und übernehmen so eine grundlegende Rolle in allen natürlichen und anthropologischen Ökosystemen. Zudem nehmen Pflanzen keine energetische Nahrung zu sich, sondern ernähren sich ausschließlich von Kohlenstoffdioxid (CO₂) und von, in Wasser gelösten, Mineralstoffen (autotroph). ^[16]

Des Weiteren lässt sich das Reich der Pflanzen in „niedere Pflanzen“ und „höhere Pflanzen“ unterteilen. ^[24] Während sich niedere Pflanzen, wie Moose oder Algen, nicht in Grundorgane einteilen lassen, besitzen höhere Pflanzen einen sogenannten „Grundbauplan“ (siehe Anhang, Abb.2). Dieser besteht aus einer Wurzel, dem Spross (Sprossachse samt Blättern) und der Blüte. Die unterirdische Wurzel gibt der Pflanze durch die Verankerung in dem Boden Stabilität. Außerdem vergrößern die feinen Wurzelhaare die Oberfläche und ermöglichen so eine bessere Aufnahme von Wasser und Nährstoffen. Die

Sprossachse trägt zum einem die Blätter und Blüten der Pflanze. Zum anderen ist die Sprossachse, die je nach Alter und Art verholzt sein kann, für den Transport von Wasser und anderen Nährstoffen in die einzelnen Organe zuständig. Die Blätter einer Pflanze dienen hauptsächlich der Photosynthese. Durch Spaltöffnungen (die sogenannte „Stomata“) am Blatt wird der Gasaustausch (Transpiration) gesteuert. Damit wird die Temperatur reguliert und der Wasseraustausch innerhalb der gesamten Pflanze aufrechterhalten. Da sich die Blüte lediglich aus verkürzten Sprossachsen und transformierten Blättern zusammensetzt, gilt sie nicht als Grundorgan einer Pflanze. ^[23] Sie übernimmt jedoch die überaus wichtige Funktion der Fortpflanzung. ^[6]

Charakteristisch für die Pflanzenzelle sind die Photosynthese betreibenden Chloroplasten und die, hauptsächlich aus Cellulose bestehende, Zellwand. ^[1] Da pflanzliche Zellen osmotische Systeme darstellen, ^[16] ist vor allem eine stabile und druckregulierende Zellwand von großer Wichtigkeit. Neben der Zellwand und den Chloroplasten, besteht die Zelle auch aus Vakuolen, Plastiden, Ribosomen, Peroxisomen, Mitochondrien, Cytoplasma, einem ER (Endoplasmatisches Retikulum), einem Dictyosom (Golgi – Apparat), einem Zellkern und der Zellmembran. ^[1]

2.3 Symbiosen in der Theorie

Im Gegensatz zu dem Parasitismus, bezeichnet die Symbiose (griech. „gemeinsam leben“) eine Lebensgemeinschaft, zwischen zwei unterschiedlichen Lebewesen, die für beide Arten vorteilhaft ist. Teilweise sind diese Gemeinschaften so wichtig, dass ganze Ökosysteme nur mit ihrer Hilfe existieren können. Da Symbiosen meist sehr unterschiedlich ausfallen, können sie nach dem Grad ihrer Abhängigkeit, ihrer räumlichen Beziehung und ihrer Art des Nutzens eingeteilt werden. ^[14]

Der Grad der Abhängigkeit beschreibt wie hoch die Notwendigkeit bzw. die Beteiligung für die Partner an der jeweiligen Symbiose ist. In einer Allianz (Protokooperation) profitieren beide Parteien von der Zusammenarbeit oder dem Zusammenleben, sind aber nicht zwingend auf diese Symbiose angewiesen. Bei dem Mutualismus ist die Symbiose zwar enger und häufiger, jedoch nicht für das Überleben von Symbionten und Wirt verantwortlich. Die Eusymbiose (obligatorische Symbiose) beschreibt dahingegen eine überlebenswichtige Gemeinschaft zwischen zwei Arten. ^[14]

Die Einteilung der räumlichen Beziehung zweier Lebewesen bezieht sich auf die räumlichen Kriterien der Symbiose. Währenddessen der Symbiont bei der Endosymbiose in dem Körper bzw. in die Zellen des Wirtes eindringt, beschreibt die Ektosymbiose die räumliche Trennung der zwei Organismen. Die Ektosymbiose lässt sich zudem noch in Phoresie, Epökie und Synökie unterteilen. Bei der Phoresie nutzt der Symbiont (Phoret) den Wirt (Phorent) als eine Art Transportmittel. Die Epökie beschreibt eine Aufsiedelung und die Synökie eine gemeinsame Behausung. ^[14]

Die Art des Nutzens einer Symbiose umfasst meist die Grundbedürfnisse (Nahrung, Fortpflanzung, Schutz, Lebensraum) von Lebewesen. So existieren Fortpflanzungssymbiosen, um den Bestand einer

Art zu sichern, Stoffwechselsymbiosen, um die Nährstoffaufnahme zu verbessern oder auch Putzsymbiosen, um bspw. lästige Parasiten zu entfernen. [14]

2.3.1 Symbiosen bei Pilzen

Die Mikroorganismen (Pilze) können nicht nur die Rolle der Parasiten übernehmen, sondern auch diverse Symbiosen eingehen. Nimmt ein Pilz (Mykorrhiza – Pilz) Kontakt mit dem Feinwurzelsystem einer Pflanze auf, so entsteht eine Lebensgemeinschaft zwischen der Pflanze und dem Mykorrhiza – Pilz die Mykorrhiza genannt wird. [5] Von dieser Symbiose profitiert neben dem Symbionten (Pilz) und dem Wirt (Pflanze) auch das gesamte Ökosystem, da die Pilzhyphe viele Lebewesen miteinander verbinden können und so eine Gemeinschaft schaffen. [19]

Neben der Mykorrhiza können manche Pilze (Ascomyceten, Basidiomyceten, Zygomyceten) zudem mit photosynthetisch aktiven Mikroorganismen, also Algen und Cyanobakterien, eine Symbiose eingehen. Diese Lebensgemeinschaft ist auch als Flechte bekannt und bildet aufgrund ihrer Abhängigkeit und des räumlichen Bezugs eine Eusymbiose (obligatorische Symbiose). Der gemeinsam gebildete Thallus besteht hauptsächlich aus den Pilzhyphe, in denen die Algen bzw. die Cyanobakterien eingebettet sind (siehe Anhang, Abb.3). Aufgrund von der verbesserten Wasserversorgung durch den Pilz wird die Alge bzw. die Cyanobakterien (Photobionten) resistenter gegen Temperaturschwankungen und Wasserstress. Im Gegenzug erhält der Pilz (Mykobionten) Glucose ($C_6H_{12}O_6$) von seinem Symbiosepartner, da dieser im Stande ist Photosynthese zu betreiben. [3]

Des Weiteren sind einige Pilze in der Lage zusammen mit Blattschneiderameisen in einer Eusymbiose zu leben. [14] Die Fadenbüschel des Pilzes (*Leucoagaricus gongylophorus*) dienen den Ameisen als Nahrungsquelle. Währenddessen umsorgen die kleinen Tiere den Pilz, sodass sich dieser vermehren kann. [28]

2.3.2 Symbiosen bei Pflanzen

Oft sind pflanzliche Lebewesen zusammen mit anderen Pflanzen, Tieren, Pilzen oder auch Bakterien in einer Symbiose zu finden. Während ein gutes Beispiel für eine Pilz – Pflanzen – Symbiose Mykorrhiza oder auch die oben beschriebenen Flechten sind, [3] sichert auch die Lebensgemeinschaft zwischen Blume und Honigbiene die Grundbedürfnisse beider Partner. [14] Bienen, Hummeln oder auch manche Schmetterlingsarten erhalten von der Pflanze Nahrung (Nektar) und tragen im Gegenzug ihre Pollen aus, welche den Bestand von Blumen und Nutzpflanzen sichern (Fortpflanzungssymbiose). [11] Ein weiteres Beispiel für eine solche Lebensgemeinschaft ist die Stoffwechselsymbiose zwischen Hülsenfrüchtlern (Fabaceae) und Knöllchenbakterien (Rhizobien). [14] Die Knöllchenbakterien verbessern die Stickstoffaufnahme (N_2) und somit auch das Wachstum der Pflanze. Als Gegenleistung erhalten die Bakterien die Kohlenhydrate Succinat und Malat, die die Hülsenfrüchte während eines Stoffwechselvorgangs (Citratzyklus) herstellen. [17]

3 Mykorrhiza allgemein

Die Stoffwechselsymbiose zwischen Mykorrhiza – Pilzen und Pflanzen (siehe Anhang, Abb.4) soll schon seit ungefähr 450 bis 480 Millionen Jahren bestehen. ^[3] Während dieser Zeit hat sich die Lebensgemeinschaft an unterschiedliche ökologische Situationen bzw. Standorte angepasst und so auch unterschiedliche Formen entwickelt. ^[10] Zudem handelt es sich in diesem Fall um einen symbiotischen Mutualismus, da Symbiont (Mykorrhiza – Pilz) und Wirt (Pflanze) trotz des Nährstoffaustausches im Wesentlichen getrennt leben und nur durch das Hyphengeflecht verbunden sind. ^[3] Währenddessen dem Wirt sein Symbiont ziemlich gleichgültig ist, sucht der Pilz nach einem geeigneten Symbiosepartner (es lassen sich Unterschiede in der Kompatibilität von Symbiosepartnern feststellen). ^[19]

Pilzsporen, welche nah an Pflanzen, die eine Mykorrhiza eingehen können, angesiedelt sind, tauschen mit dieser Signalmoleküle aus, bevor sie richtig keimen und ein Mycel ausbilden können. Wie dies auf molekularer Ebene aussieht ist bislang noch nicht erforscht worden. Es wird jedoch vermutet, dass die „Initiative von der Pflanze ausgeht“ (Franziska Krajinski vom Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie). ^[18] Könnten diese Wirtssignale identifiziert werden, so wäre man bspw. in der Lage essbare Mykorrhiza – Pilze zu züchten. ^[12] Nach dem Signalaustausch fährt der Pilz seine Hyphen aus. Treffen diese auf die Wurzel der Pflanze, so verzweigen sich die Hyphen des Pilzes mit der Wurzel und die fädigen Vegetationsorgane dringen in die Wurzel ein. ^[3] Nachdem sich das Zellskelet der Rinde „umorganisiert“ hat, kann der Austausch beginnen. ^[10] Die Pflanze transportiert das Photosyntheseprodukt Glucose in Form des Disaccharids Saccharose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) in die Wurzel der Pflanze. Das Disaccharid wird dort, in den pflanzlichen Zellwänden der Wurzel, in die Monosaccharide Glucose ($C_6H_{12}O_6$) und Fructose ($C_6H_{12}O_6$) gespalten. Für den Mykorrhiza – Pilz ist vor allem die Glucose sehr wichtig. Die Fructose behält die Pflanze. ^[12] Im Gegenzug erhält der Wirt wichtige Nährstoffe wie Phosphor, Stickstoff (in Form von Nitrat – NO_3^- – und Ammonium – NH_4^+) und weitere, schwer erschließbare Spurenelemente. ^[21] Aufgrund der feinen Pilzhyphen und der großen Ausbreitung des Mycels kann der Pilz die Nährstoffe aus dem Boden weitaus besser aufnehmen als die Pflanze selbst. ^[3] Bei dem Nährstoffaustausch handelt es sich, sowohl bei der Endosymbiose als auch bei der Ektosymbiose, um einen aktiven Transport. Die Membranen der Pilz – und Pflanzenzellen verfügen beide über spezielle Kanäle, die den Austausch möglich machen. Die extrazelluläre Matrix, die zwischen den beiden Membranen liegt, kann mittels einer einfachen Diffusion überwunden werden. ^[10]

3.1 Auswirkungen

Beide Symbiosepartner verfügen über eine verbesserte Nährstoffaufnahme. Des Weiteren weist die Pflanze eine erhöhte Vitalität und somit auch eine verbesserte Widerstandskraft in Stresssituationen auf. So werden bspw.: Schwankungen der Lichteinstrahlung, der Bodenfeuchtigkeit oder auch Belastungen durch Schädlinge besser aufgenommen. Diese verbesserte Vitalität liegt also hauptsächlich an den mineralischen Nährstoffen. ^[10] Ein Forschungsteam der Universität Göttingen und Friedberg (und des Helmholtz Zentrums in München) hat zudem herausgefunden, dass der Mykorrhiza – Pilz Duftstoffe

(Sesquiterpene) freisetzen kann, die das Wurzelwachstum und somit das gesamte Wachstum der Pflanze anregen. [4]

Außerdem profitieren auch andere Organismen von dieser Symbiose. Lebewesen, wie Bakterien oder Kleinstlebewesen, die in der Rhizosphäre zu Hause sind, können sich von den Hyphen und Sporen der Pilze ernähren. Gleichzeitig machen die konstanten Lebensbedingungen die Wurzeln zu einem idealen und schützenden Lebensraum. Hinzu kommt, dass die Pilzhyphen nebenbei die Struktur der besiedelten Böden verbessern. Während der Pilz die Mineralstoffe aus dem Boden zieht, werden organische Stoffe freigesetzt, die zur Humusbildung und somit auch zu einer Verbesserung der Bodenstruktur beitragen. [10] Aber auch das gesamte Ökosystem kann seinen Vorteil aus der Lebensgemeinschaft zwischen Pilz und Pflanze ziehen. Aufgrund von Mykorrhiza ist bspw.: das gesamte Ökosystem Wald miteinander vernetzt. Da die verschiedenen Biozönosen durch das „unterirdische Netzwerk“ untereinander Nährstoffe oder Signale austauschen können (z.B.: um vor Schädlingsangriffen zu warnen), spricht man von Kommunikation. [8][19]

3.2 Ektomykorrhiza

Bei der Ektomykorrhiza handelt es sich, wie der Name schon andeutet, um eine Ektosymbiose. Folglich liegen die Organismen getrennt voneinander vor und die Pilzhyphen treten nicht in die Pflanzenzelle ein. [14] Circa 6.000 Pilzarten sind in der Lage eine Ektomykorrhiza einzugehen. [10] Bei den teilweise hochspezialisierten, teilweise unspezialisierten Pilzen handelt es sich meist um Basidiomyceten oder in seltenen Fällen auch um Ascomyceten. Ihre pflanzliche Symbiosepartner sind oftmals Bäume oder Sträucher mit einer verholzten Sprossachse bzw. Nacktsamer (Gymnospermen) oder Bedecktsamer (Angiospermen). [21] Außerdem ist diese Art der Symbiose vorwiegend in der gemäßigten Klimazone und nur vereinzelt in den Subtropen oder den Tropen zu finden. [10] Ein konkretes Beispiel für eine solche Lebensgemeinschaft, ist die Ektosymbiose zwischen Birke und Birkenpilz (hochspezialisiert).

Während der Ektomykorrhiza kolonisieren die Hyphen des Mykorrhiza – Pilzes die jungen und unverkorkten Wurzelenden der Seitenwurzeln (siehe Anhang, Abb.5). [22] Das Hyphengewebe verdickt sich und ein sogenannter „Pilzmantel“ (Hyphenmantel) entsteht. [3] Aufgrund dieses Pilzmantels wird die Bildung von Wurzelhaube und Wurzelhaaren eingestellt. Der Pilz übernimmt nun jegliche Funktionen. [20] Nachdem sich das Zellskelet der Rinde „umorganisiert“ hat, können die Pilzhyphen in die Zellzwischenräume bzw. in den Apoplasten (Zellwände samt Interzellularraum) der Wurzel gelangen (siehe Anhang, Abb.7.1). Die Hyphen verzweigen sich sehr stark, sodass das Hartig'sche – Netz (aufgefaltete Pilzhyphen), welches den Nährstoffaustausch ermöglicht, entsteht. Das Hartig'sche – Netz durchdringt bei den

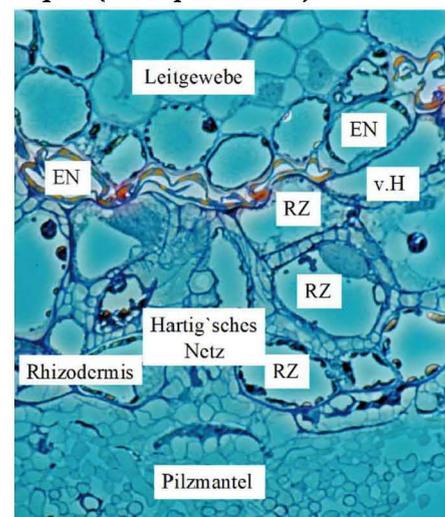


Abb.6: Querschnitt einer Wurzel, die sich in einer Ektomykorrhiza befindet. Rindenzellen (RN); Endodermis (EN); vorgedrungene Hyphen (v. H)

Gymnospermen die äußere Rindenschicht und gelangt bis hin zu der Endodermis (siehe Abb.6). Bei den Angiospermen gelangen die feinen Vegetationsorgane lediglich bis hin zu der Rhizodermis. ^[10]

3.3 Endomykorrhiza

Bei der Endomykorrhiza handelt es sich um Endosymbiose, da die Hyphen des Pilzes in die pflanzlichen Zellen hineinwachsen (siehe Anhang, Abb.7.2). Während diese Lebensgemeinschaft für den Symbiont meist obligatorisch (lebensnotwendig) ist ^[3], kann sein meist krautiger Wirt (Pflanzen, die nicht verholzen) ^[10] auch ohne Symbiose bestehen. ^[19] Zudem existieren mehrere Formen der Endomykorrhiza – Symbiose. ^{[10][21]}

3.3.1 Arbuskuläre Endomykorrhiza

Die arbuskuläre Endomykorrhiza oder auch die vesikular-arbuskuläre Mykorrhiza (VA – Mykorrhiza) ist die älteste Form der Mykorrhiza – Symbiosen. Größtenteils befinden sich Zygomyceten der Ordnung Glomales zusammen mit Farnpflanzen (Pteridophyta), Moosen (Bryophyten), Nacktsamern (Gymnospermen) oder Bedecktsamern (Angiospermen) in einer arbuskulären Endomykorrhiza. ^[21]

Nachdem die Pilzhyphen die Wurzel der Pflanze erreicht haben, beschleunigen sie ihr Wachstum und ein Appressorium auf der Wurzel wird ausgebildet. Infektionshyphen dringen von dort aus in das Wirtsgewebe ein. Die Zellwände der Pflanzenzellen weichen auseinander, sodass sich die Vegetationsorgane der Pilze interzellulär bewegen und eventuell Vesikel bilden können. Später wachsen die Hyphen des Pilzes auch intrazellulär und bilden in den Wirtszellen Arbuskel aus, welche den Nährstoffaustausch regeln. ^{[3][10]} Das Eindringen in die Zelle wird von den Enzymen Lipasen, Cutinasen, Cellulasen und Xylanasen ^[3] und dem sogenannten „penetration apparatus“ ^[22] möglich gemacht. Hierbei verkleinern sich die Poren der Pilzzellwand in einem Appressorium, welches eng an der Pflanzenzelle liegt. Osmotisch aktive Stoffe häufen sich so auf, Wasser strömt in die Zelle und der Druck, der entsteht, durchdringt die Wirtszelle. ^[3] Außerdem sind die Arbuskel, die innerhalb der pflanzlichen Zellen gebildet werden, durch eine pflanzliche Plasmamembranen von dem Cytosol der Pflanze getrennt. ^{[10][22]} Es wird zudem vermutet, dass die Pflanze den „Nährstoffaustausch mithilfe von Mikro – RNA Schnipseln regulieren“ kann (berichtet Franziska Krajinski vom Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie). ^[18]

3.3.2 Ektendomykorrhiza

Diese Mischform der Mykorrhiza – Symbiose findet meist zwischen Nacktsamern (Gymnospermen) bzw. Bedecktsamern (Angiospermen) und Basidiomyceten bzw. Ascomyceten statt. ^[21] Wie der Name dieser besonderen Wechselwirkung schon verrät, besitzt die Ektendomykorrhiza Eigenschaften der Endomykorrhiza und der Ektomykorrhiza. ^[5] Ähnlich, wie bei der Ektomykorrhiza, verzweigen sich die Pilzhyphen in den Interzellulären Zwischenräumen, sodass stark ausgeprägtes Hartig'sches Netz entsteht. Zudem lässt sich meist ein, wenn auch reduzierter, Pilzmantel an der pflanzlichen Wurzel

feststellen. Trotz dieser charakteristischen Strukturen der Ektomykorrhiza, handelt es sich um eine Endosymbiose. Die fädigen Hyphen des Pilzes dringen in die Rindenzellen des Wirts ein. ^[13]

3.3.3 Arbutoide Mykorrhiza

Die Arbutoide Mykorrhiza ist eine abgesonderte Form der Ektendomykorrhiza. ^[10] Auch bei ihr bildet sich ein Hartig'sches Netz zwischen den Zellen und ein reduzierter Pilzmantel an der Wurzel aus. Trotzdem dringen die Hyphen des Pilzes, wie auch bei der Ektendomykorrhiza, in die Wirtszellen der Pflanze ein. Die Arbutoide Mykorrhiza findet jedoch nur zwischen Basidiomyceten und Pflanzen der Familie Ericaceae bzw. deren Unterfamilie den Arbutoideae statt. Des Weiteren ist charakteristisch für diese Mykorrhiza – Form, dass der Pilz das aktive Eindringen in die Zellen beschränkt. ^[21]

3.3.4 Monotropoide Mykorrhiza

Diese spezielle Form der Endomykorrhiza erfolgt meist zwischen Basidiomyceten und Pflanzen der Familie der Monotropaceae. ^[21] Die Pflanzen, die sich in einer Monotropoiden Mykorrhiza befinden, verfügen über kein Chlorophyll in ihren Zellen, sodass sie keine Photosynthese betreiben können. Folglich erhalten die Mykorrhiza – Pilz keine Glucose. ^[10] Der Pilz muss nun, die für ihn so wichtigen, Kohlenhydrate aus benachbarten Pflanzen ziehen. ^[13] Außerdem bildet sich ein Pilzmantel um die Wurzeln der Pflanze und ein Hartig'sches Netz zwischen den Rindenzellen aus. Trotz dieser strukturellen Eigenschaften, die denen einer Ektomykorrhiza ähneln, handelt es sich um eine Endosymbiose. Die Pilzhyphen wachsen intrazellulär. ^[10]

3.3.5 Ericoide Mykorrhiza

Diese Form der Stoffwechselsymbiose ist vor allem in nährstoffarmen Gegenden verbreitet. Abiotische Umweltfaktoren, wie sehr feuchte Böden oder extreme pH – Werte, stellen erschwerte Lebensbedingungen für die Pflanzen dar. Zudem sind die benötigten anorganischen Nährstoffe in biologische Makromoleküle eingebaut und zusätzlich mit weiteren Makromolekülen verbunden. Trotz dieser komplizierten Bedingungen ist der Pilz in der Lage die Nährsalze aus dem Boden zu ziehen. Ökosystemen wie das Moor oder die Heide sind Beispiele für solche Standorte. ^[10]

Bei den Pilzen handelt es sich meist um Ascomyceten oder Basidiomyceten. Die Pflanzen gehören meist der Familie der Ericaceae an. Nachdem sich ein lockeres Geflecht aus Pilzhyphen um die Wurzel der Wirtspflanze gebildet hat, wachsen die Hyphen in das Zellinnere (intrazelluläres Wachstum). ^[13] Hier ist einerseits eine großflächige Ausbreitung der Pilzstrukturen, welche den Nährstoffaustausch verbessert, zu beobachten. Andererseits ist erkennbar, dass sich die fädigen Pilzhyphen auf eine Zelle „konzentrieren“ und nur selten innerhalb von zwei unterschiedlichen Zellen verlaufen. ^[21]

3.3.6 Mykorrhiza bei den Orchideen

Diese Form der Mykorrhiza bezieht sich ausschließlich auf Orchideen (Orchidaceae). Orchideen sind in der Lage zumindest während einem Teil ihres Lebenszyklus Photosynthese zu betreiben. In den meisten Fällen sind Basidiomyceten ihre Symbiosepartner. ^[21] Charakteristisch für die Mykorrhiza der

Orchideen ist, dass die Pilzhyphen, die innerhalb der pflanzlichen Zellen wachsen, nach einer Zeit absterben. Der Wirt „verdaut“ die fädigen Vegetationsorgane seines Symbionten regelrecht, da er an die Nährstoffe gelangen möchte. ^{[10][13]}

4 Versuch

Die Wirkung von künstlich beigefügten „Mykorrhiza – Pilzsporen“ sollte durch einen Versuch deutlich gemacht werden. Dabei wurden zwei Buschbohnen der Sorte „Brillant“ ^[c] (bot. Name: *Phaseolus vulgaris*) unter gleichen äußeren Bedingungen eingepflanzt. Eine der Bohnen wurde nach einer gewissen Anwachszeit ½ Teelöffel Mykorrhiza – Granulat ^[b] beigefügt („A – Pflanze“). Da sich die beiden Pflanzen nun nur noch durch einen Faktor unterscheiden, lassen sich viele Unterschiede auf diesen zurückführen. Beide Buschbohnen („A – Pflanze“ und „B – Pflanze“) wurden aufgrund der Jahreszeit innerhalb des Hauses gezüchtet, bei Bedarf gegossen und täglich gemessen.

4.1 Aufbau und Durchführung

Am 16. September 2020 wurden mehrere Buschbohnen der Sorte „Brillant“ ^[c] (bot. Name: *Phaseolus vulgaris*) in herkömmlicher Aussaaterde ^[a] eingepflanzt, um zu keimen und ein wenig zu wachsen. Nach zehn Tagen, am 26. September, wurden zwei Pflanzen mit einem ähnlichen Phänotyp (18 cm und 20 cm) ausgewählt und umgetopft. Dabei wurde ½ Teelöffel des Mykorrhiza – Granulats ^[b] zu einer der Pflanzen hinzugegeben. Die enthaltenen Pilzsporen, die sowohl für Endo- als auch für Ektomykorrhiza (in unserem Fall wird Endomykorrhiza benötigt) geeignet sind, wurden gleichmäßig in der Erde verteilt. Zudem wurde die Pflanze mit den beigefügten Pilzsporen markiert. Sowohl die Größe, als auch der Phänotyp beider Pflanzen wurde über den Zeitraum von dem 26.09.2020 bis hin zu dem 17.10.2020 dokumentiert und festgehalten (siehe Anhang, Abb.19). In diesem Zeitraum konnte man das Wachstum und die Fruchtebildung beider Buschbohnen gut beobachten. Des Weiteren wurde die Erde der Pflanzen durchgängig gegossen und feucht gehalten. Am 30.11.2020 wurden die Früchte (Bohnenstangen) der zwei Bohnenpflanzen schließlich entfernt, gezählt und untersucht. Außerdem wurde am gleichen Tag die Bodenbeschaffenheit mithilfe von pH-Streifen ^[d] überprüft. Dazu wurde aus beiden Töpfen circa eine Hand voll Erde aus 15 cm Tiefe entnommen, mit destilliertem Wasser vermischt und getestet. Um eine bessere Sicht auf die Verwurzelung zu bekommen, wurden beide Pflanzen am 04.12.2020 aus der Erde genommen.

Aufgrund von Schädlingen kann der Versuch eventuell verfälscht worden sein. Nach einer gewissen Zeit konnte man Spuren von Schädlingen, wahrscheinlich Trauermücken (*Sciaridae*), beobachten (siehe Anhang, Abb.8). Trauermücken fressen, als im Boden lebende Larven, neben abgestorbenen Pflanzenteilen auch die Wurzeln der befallenen Pflanzen. Der negative Einfluss dieser Schädlinge bezieht sich somit also primär auf die Nährstoff- und Wasserversorgung einer Pflanze, sodass die Auswirkungen besonders an den Blättern sichtbar waren. ^[27] Da die ausgewählten Buschbohnen resistent gegen Krankheiten sind, konnten sie trotz der Trauermücken weiterwachsen und Früchte

ausbilden. Die teils erfolgreiche Bekämpfung der Schädlinge erfolgte mit dem Haushaltsmittel Pfefferminztee. Da beide Pflanzen den Schädlingen gleichermaßen ausgesetzt waren und auch auf gleiche Weise behandelt wurden, konnten die Unterschiede der Reaktionen auf Nährstoffmangel und Wasserstress auf den einzig veränderten Faktor, dass Mykorrhiza – Granulat, zurückgeführt werden.

4.2 Beobachtungen

Während man anfangs keinen großen Unterschied bei dem Wachstum beider Pflanzen feststellen konnte, begann die Pflanze mit künstlich beigefügter Mykorrhiza, nach ungefähr fünf Tagen, rasant zu wachsen. Dieser „plötzliche Wachstumsschub“ kann durchaus mit der Symbiose begründet werden. Denn um der Pflanze die nötigen Mineralstoffe liefern zu können müssen die Pilzsporen vorerst keimen und ein Mycel ausbilden. Des Weiteren war zu beobachten, dass beide Pflanzen nach nur 18 Tagen bzw. insgesamt 28 Tagen, am 14.11.2020, ihr Wachstum vollendet haben (siehe Anhang, Abb.10). Nach dem angegebenen Datum konnte keine der Pflanzen ein wirklich sichtbares Höhenwachstum aufweisen. Die A – Pflanze konnte am 14.11.2020 eine Höhe von 68 cm, aufweisen und ist somit seit der Umpflanzung bzw. dem Anfang des Dokumentierens 48 cm gewachsen (siehe Anhang, Abb.9.A). In der gleichen Zeit ist die B – Pflanze 32 cm gewachsen, wies also eine Gesamthöhe von 50 cm auf (siehe Anhang, Abb.9.B). Zudem lässt sich bei dem Wachstum (cm pro Tag) keine Regelmäßigkeit erkennen.

Die Fruchtbildung sah bei den zwei Pflanzen ähnlich aus, weswegen sich nichts Weiteres dazu sagen lässt. Beide Pflanzen wiesen schon nach nur kurzer Zeit weiße Blüten auf, denen nur wenig später Bohnenstangen (die Ernte) folgten. Die ersten Früchte waren bei der B – Pflanze am 10.11.2020 und bei der A – Pflanze am 11.11.2020 zu erkennen. Das Wachstum der Buschbohnen selbst wurde zwar nicht genauer dokumentiert, ein sichtbarer Unterschied konnte zwischen den Pflanzen jedoch nicht festgestellt werden.

Bei der Quantität und Qualität der Blätter konnten wiederum Ungleichheiten beobachtet werden. Obwohl die Gesamtanzahl der Blätter (44 Stück bei der Pflanze mit beigemischten Pilzsporen und 39 Stück bei der Pflanze ohne künstlich beigefügte Pilzsporen) nur wenig variiert, unterscheiden sich die Blätter doch in ihrer Länge und Größe. So sind 5 der Blätter an der A – Pflanze über 15 cm, 12 Stück über 10 cm, 17 Stück über 5 cm und 10 Stück unter 5 cm lang. An der B – Pflanze weisen lediglich 3 Blätter eine Länge über 15 cm und 5 Stück eine Länge über 10 cm auf. Hinzukommt, dass 18 Blätter über 5 cm und 13 Stück unter 5 cm lang sind (zur Verbildlichung siehe Anhang, Abb. 17). Die Qualität der Blätter konnte hauptsächlich in der Zeit des Schädlingsbefalls beobachtet werden. Hier reagierten die zwei Pflanzen bzw. besonders die Blätter der beiden Pflanzen verschieden auf den Wasserstress bzw. den Nährstoffmangel. Während die Blätter der B – Pflanze sehr schnell welk wurden und teilweise sogar abfielen, waren bei den Blättern der A – Pflanze weniger Veränderungen zu beobachten. Die Blätter wiesen zwar auch Spuren von den Schädlingen (Trauermücken) auf, konnten deren Auswirkungen jedoch besser kompensieren.

Bei der Testung des pH – Wertes beider Pflanzen konnte kein sichtbarer Unterschied beobachtet werden. Die entnommene Erde wies bei beiden Überprüfungen einen pH – Wert von ca. 7,25 auf (siehe Anhang, Abb.11). Da die Aussaaterde zu Beginn einen pH – Wert von 5,6 hatte, ist dieser bei beiden Pflanzen gleichermaßen um 1,65 angestiegen. Somit liegt der pH – Wert sowohl bei der A – Pflanze als auch bei der B – Pflanze im optimalen Bereich (6,0 – 7,5).^[15] Die Verwurzelung der Pflanzen zeigen wiederum deutliche Unterschiede auf. Obwohl beide Wurzeln eine ähnliche Länge besitzen (A – Pflanze: 14 cm; B – Pflanze: 13 cm), variieren sie in ihrer Verzweigung. So sind bei der A – Pflanze mehr Verzweigungen festzustellen (siehe Anhang, Abb.12). Da die Wurzel nun eine größere Oberfläche einnimmt, verbessert sich bspw.: die Nährstoffaufnahme und die Stabilität.

4.2.1 Ernte

Die Ernte, der letzten Endes ausschlaggebende Teil des Versuchs, zeigt deutliche Unterschiede auf. Als „Ernte“ werden bei den Buschbohnen die einzelnen Bohnenstangen (Bohnensamen samt deren Hülse) bezeichnet. Folgender Text vergleicht sowohl, wie oben definiert, die gesamten Bohnenstangen als auch die einzelnen Bohnensamen der zwei Pflanzen.

Die Ernteerträge der A – und B – Pflanze variieren in ihrer Quantität nur wenig. Beide Bohnenpflanzen brachten insgesamt neun Bohnenstangen, die sich auch in ihrer individuellen Länge nur wenig unterscheiden, hervor (siehe Anhang, Abb.13). Obwohl sich die Gesamtanzahl der Bohnensamen, mit 35 Bohnensamen bei der A – Pflanze und 30 Samen bei der B – Pflanze, nur wenig unterschieden, variierten die Samen doch in ihrer Länge bzw. ihrem Phänotyp (siehe Anhang, Abb.14). So sind 22 Bohnensamen der A – Pflanze länger als 1 cm und nur 13 der Samen kürzer als 1 cm. Bei der B – Pflanze ist die Mehrheit der Samen (18 Stück) kleiner als 1 cm und die Minderheit (12 der Bohnensamen) länger als 1 cm.

Bedeutendere und deutlichere Unterschiede waren jedoch bei der Qualität der Ernteerträge zu beobachten. Während alle Bohnenstangen der A – Pflanze nach der gleichen Reifezeit ungefähr die gleiche Farbe (dunkelgrün) angenommen haben und somit zu vermuten ist, dass die Pflanzenzellen der Bohnenstangen allesamt isotonisch sind (siehe Anhang, Abb.15.A), weisen die Bohnenstangen der B – Pflanze unterschiedliche „Reifestadien“ auf (siehe Anhang, Abb.15.B). Vier der Bohnenstangen sind ähnlich wie die der A – Pflanze dunkelgrün, die anderen fünf Stück sehen bereits vertrocknet aus. Dies weist auf hypotonische Pflanzenzellen hin. Die unterschiedlichen Zustände der Zellen finden zudem Bestätigung in dem Gewicht der Bohnenstangen. So beträgt das Gesamtgewicht, aufgrund der wassergefüllten Zellen, aller neun Bohnenstangen der A – Pflanze 23 Gramm. Da sich die Zellmembranen, der hypotonischen Zellen, von der Zellwand gelöst und die Vakuole an Volumen verloren hat, beträgt das Gesamtgewicht aller neun Bohnenstangen der B – Pflanze nur noch 11 Gramm. Geschmacklich ist bei den dunkelgrünen, essbaren Bohnenstangen jedoch kein bemerkbarer Unterschied zu erkennen. Beide verfügen über einen Gras – ähnlichen Geschmack. Ähnliche Merkmale bzw. Qualitätsunterschiede weisen auch die jeweiligen Bohnensamen der A – und der B – Pflanze auf.

Die Samen der A – Pflanze verfügen allesamt über ein gleichartiges Reifestadium und über ein weißes und pralles Aussehen (Phänotyp). Des Weiteren sind die Pflanzenzellen der Bohnenstangen schätzungsweise isotonisch und haben ein Gesamtgewicht von 8 Gramm (siehe Anhang, Abb.16.A). Bei der B – Pflanze besitzt lediglich ein kleiner Teil der Bohnensamen diesen Zustand (siehe Anhang, Abb.16.B). Genauer lassen sich drei unterschiedlich Phänotypen erkennen (siehe Anhang, Abb.18). Fünf der Samen haben ähnlich wie die der A – Pflanze ein weißes und pralles Aussehen. 12 Stück der Bohnensamen sind zwar weiß, jedoch bereits vertrocknet. 13 der Samen sind grün, sehr klein und befinden sich dementsprechend noch am Anfang ihres Reifeprozesses. Wegen den unterschiedlichen Reifestadien bzw. Zuständen haben nur ein paar der Bohnensamen isotonische Zellen. Andere Bohnensamen verfügen über hypotonische Zellen oder befinden sich in einem sehr niedrigen Reifestadium, sodass die Samen kaum ausgebildet sind. Das Gesamtgewicht aller 30 Samen beträgt 3 Gramm.

4.3 Ergebnisse und Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde das Thema Mykorrhiza behandelt. Anhand von theoretischen Hintergründen konnte der Zweck, der Ablauf und die Auswirkungen ermittelt werden. Mykorrhiza ist eine Stoffwechselsymbiose, die den Nährstoffaustausch zwischen Pflanze und Pilz ermöglicht. Grundlegend unterscheidet man zwischen Endomykorrhiza und Ektomykorrhiza.^[5] Da es zusätzlich viele Mischformen und Untergruppen gibt, ist ein allgemeiner Ablauf schwer zu beschreiben.^[10] In allen Fällen ziehen die Pilzhyphe jedoch anorganische Nährstoffe aus dem Boden und geben diese mithilfe von interzellulärem oder intrazellulärem Wachstum an die Pflanze ab.^[3] Die zentralen Auswirkungen der Wechselwirkung sind eine verbesserte Vitalität der Pflanze, eine optimierte Bodenstruktur^[10] und in manchen Ökosysteme eine unterirdische Vernetzung von mehreren Organismen.^[19]

Die verbesserte Vitalität konnte auch anhand des Versuches bestätigt werden. Neben dieser konnte zudem die Abhängigkeit der Buschbohnen von den Pilzsporen beobachtet werden. Der Versuch hat zusätzlich gezeigt, dass die Buschbohnen mithilfe der Pilzsporen ein verbessertes Höhenwachstum haben und mehr Wurzelverzweigungen, die den Halt und die Nährstoffzufuhr verbessern, ausbilden. Außerdem sind die Bohnenstangen (Ernteerträge), vermutlich aufgrund des Mykorrhiza – Granulats, einheitlicher gewachsen. Des Weiteren lassen die Unterschiede der Ernteerträge auf eine verbesserte Wasserversorgung durch die beigemischten Pilzsporen vermuten. Die Bohnenstangen sind dunkelgrün und die Samen prall. Während des Schädlingsbefalls (Trauermücken) konnte zudem eine optimierte Vitalität der Pflanze bzw. ein verstärktes Immunsystem beobachtet werden. Damit beantwortet sich die einleitende Fragestellung: Wie abhängig sind Buschbohnen^[c] von Pilzen bzw. den beigemischten Pilzsporen^[b].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Pilzsporen zwar nicht obligatorisch für die Buschbohnen sind, jedoch einen entscheidenden Einfluss auf diese haben. Das Leben der Pflanze wird in vielerlei Hinsicht verbessert.

5 Anhang

A – Pflanze: Bohnenpflanze samt beigemischter Pilzsporen^[6] in der Erde. Durch die Pilzsporen soll eine Mykorrhiza künstlich hervorgerufen werden.

B – Pflanze: Bohnenpflanze ohne beigemischte Pilzsporen.

5.1 Bilder, Statistiken und Aufnahmen

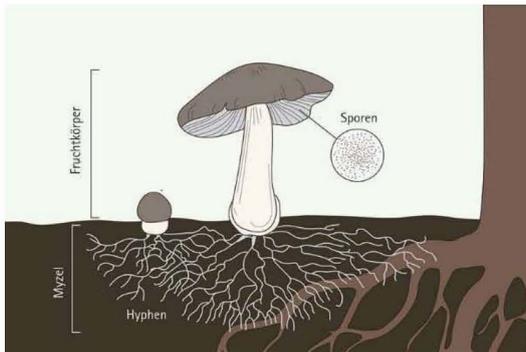


Abb. 1: Aufbau des Pilzes; oberirdischer und sichtbarer Fruchtkörper verfügt über Pilzsporen (Fortpflanzung); unterirdisches Mycel besteht aus vielen feinen Hyphen, die eine große Oberfläche einnehmen können (Nährstoffaufnahme und Stabilität)^[2]

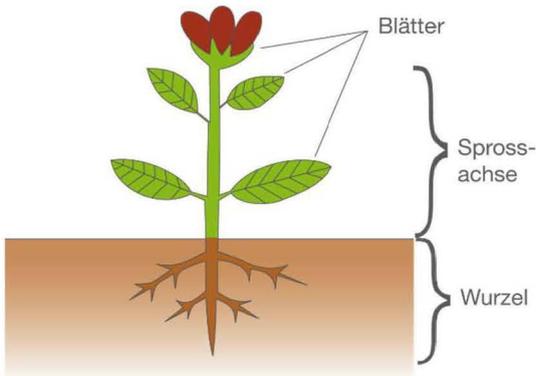


Abb. 2: Aufbau einer Pflanze; die zentralen Organe der höheren Pflanzen sind die Wurzel und der Spross (Sprossachse samt Blättern); die Blüte ist genaugenommen kein Grundorgan^[23]

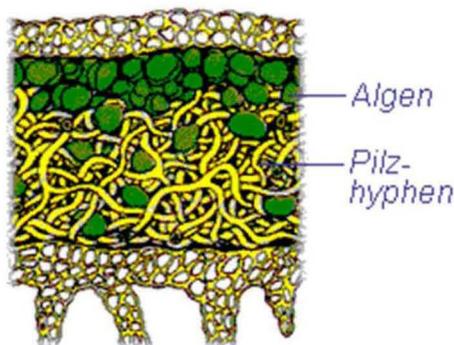


Abb. 3: Struktur einer Flechte; gemeinsam Thallus; Algen bzw. die Cyanobakterien sind in Pilzhypen eingebettet^[3]

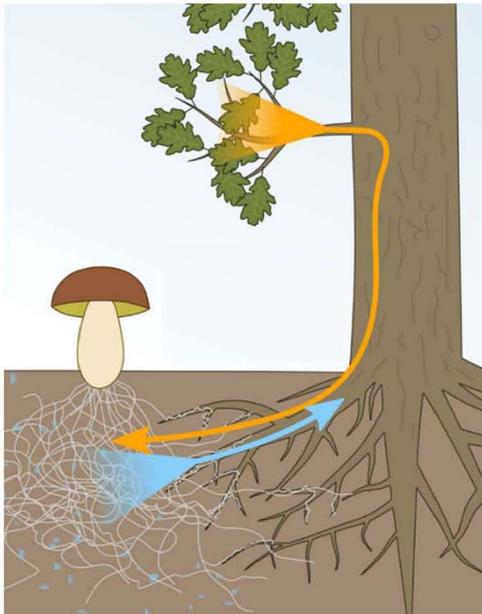


Abb. 4: Nährstoffaustausch einer Mykorrhiza; die Hyphen gelangen gut an die anorganischen Nährstoffe im Boden; die Nährsalze werden dem Wirt zur Verfügung gestellt; im Gegenzug erhält der Pilz das Photosynthese – Produkt Glucose, welches in den Blättern gewonnen wird^{[3][5][10]}

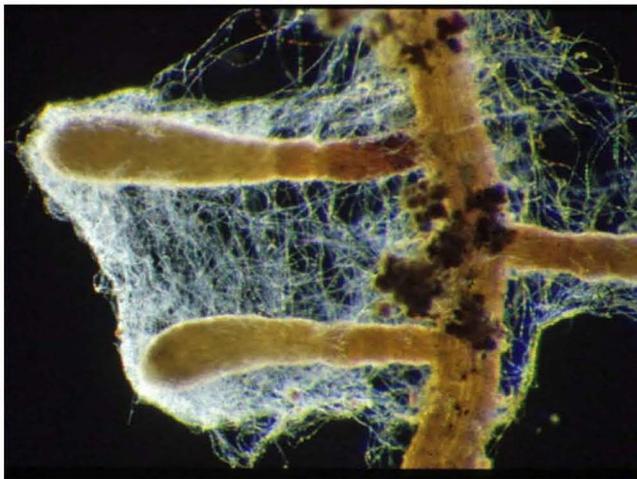


Abb. 5: Hyphenmantel bzw. Pilzmantel; die feinen Vegetationsorgane der Pilze umhüllen die Wurzelenden der Seitenwurzeln^{[10][21]}

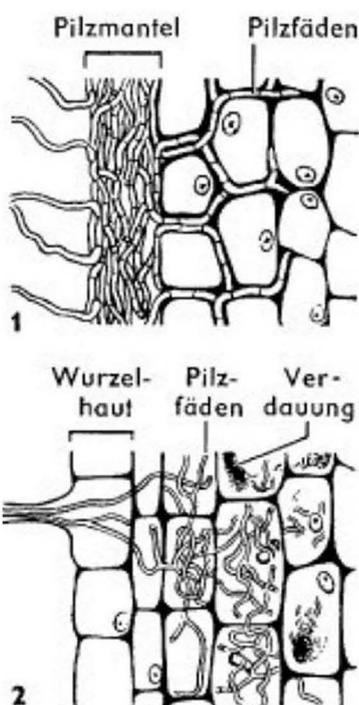


Abb. 7: die Pilzfäden (Hyphen) dringen in das Wurzelgewebe der Pflanze ein; (1) Ektomykorrhiza: die Hyphen bilden einen Pilzmantel aus und wachsen interzellulär; (2) Endomykorrhiza: die Hyphen dringen in die Wirtszellen ein, wachsen intrazellulär^[Abb.7] und bilden Arbuskel aus^[3]



Abb. 8: die Larven der Schädlinge; auf diesem Bild sind die Larven der Schädlinge (wahrscheinlich Trauermücken) eindeutig zu erkennen

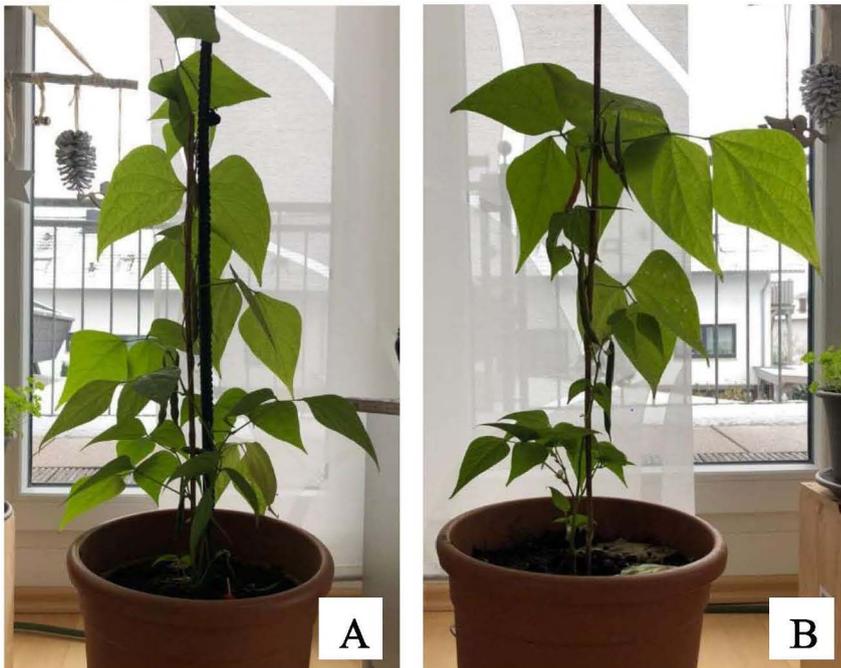


Abb. 9: die Bohnenpflanzen; das Bild zeigt die die A – Pflanze (A) und die B – Pflanze (B) am 30.11.2020

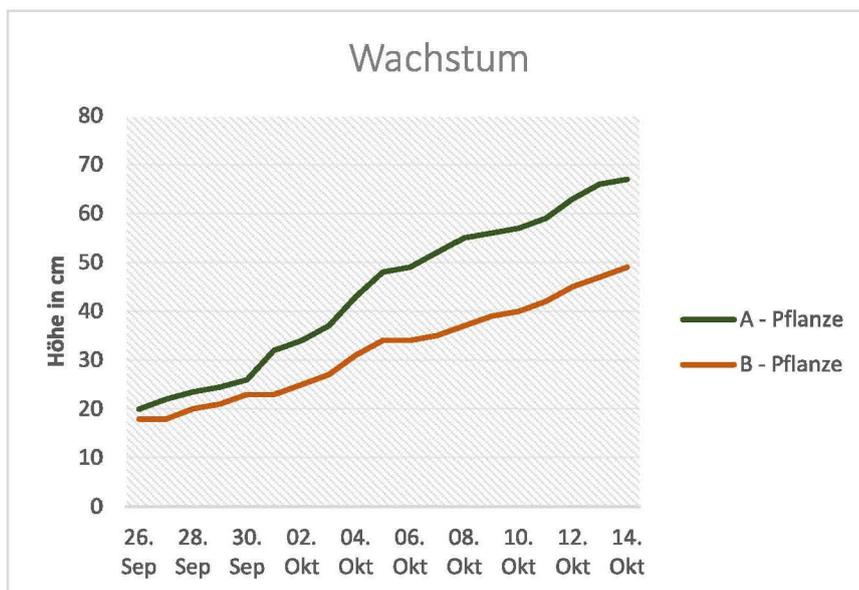


Abb. 10: Wachstum der Pflanzen; die Grafik zeigt die Entwicklung des Wachstums der Pflanze mit beigemischten Pilzsporen (grün) und der Pflanze ohne beigemischte Pilzsporen (braun)

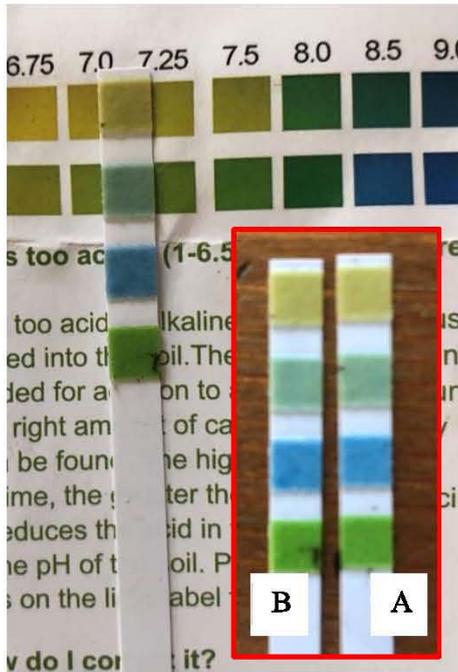


Abb. 11: Auswertung der pH – Streifen; es ist kein Unterschied der Bodenbeschaffenheit zwischen der A – Pflanze (rechts) und der B – Pflanze (links) zu beobachten; die Erde beider Pflanzen hat einen pH – Wert von circa 7,25



Abb. 12: Verwurzelung der Pflanzen; (A) die Wurzel der A – Pflanze ist 14 cm lang und verwurzelter als die der B – Pflanze; (B) die B – Pflanze ist 13 cm lang

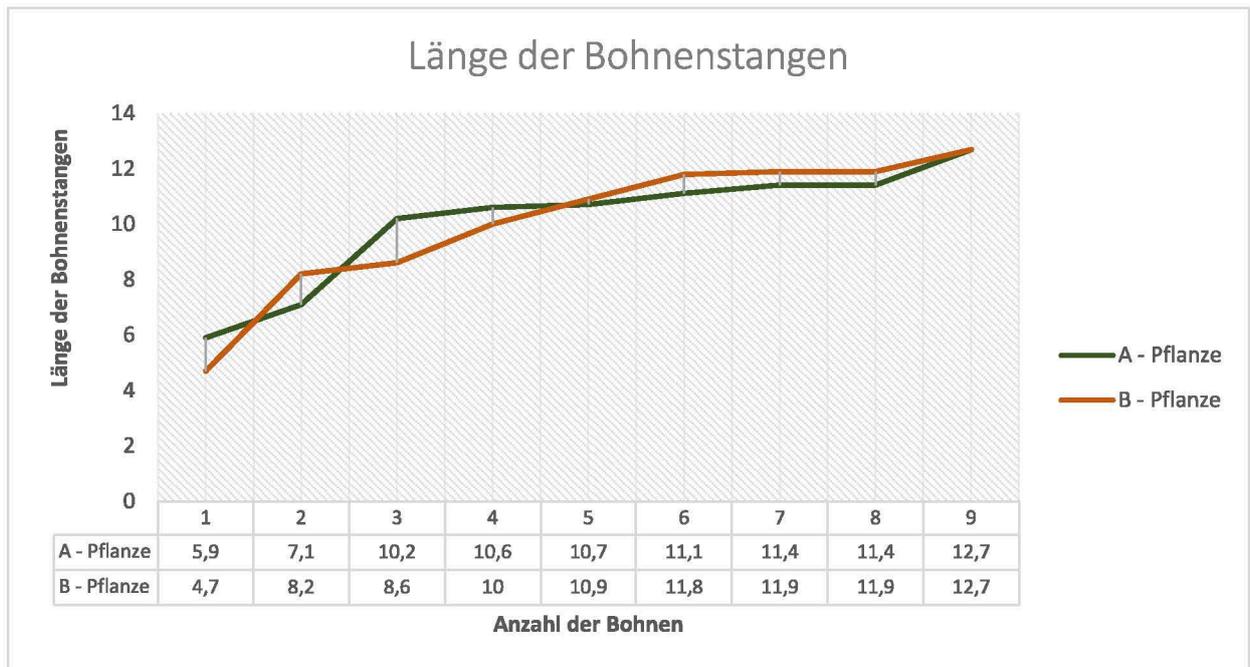


Abb. 13: Länge der Bohnenstangen; die Länge der Bohnenstangen der A – Pflanze (grün) und der B-Pflanze (B) unterscheiden sich nur minimal

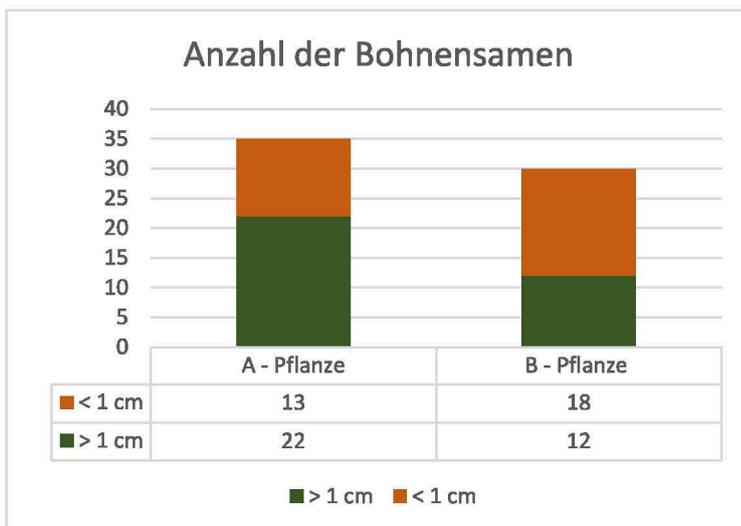


Abb. 14: Anzahl der Bohnensamen; die Gesamtanzahlen der Bohnensamen unterscheiden sich nur wenig; in ihrer Größe variieren die Samen der A – Pflanze (links) und der B – Pflanze (rechts) jedoch



Abb. 15: die Bohnenstangen; (A) die Phänotypen der Bohnenstangen der A – Pflanze sind eher einheitlich; (B) die Phänotypen der Bohnenstangen der B – Pflanze sind unterschiedlich



Abb. 16: die Bohnenstangen und Bohnensamen; (A) A - Pflanze; (B) B - Pflanze

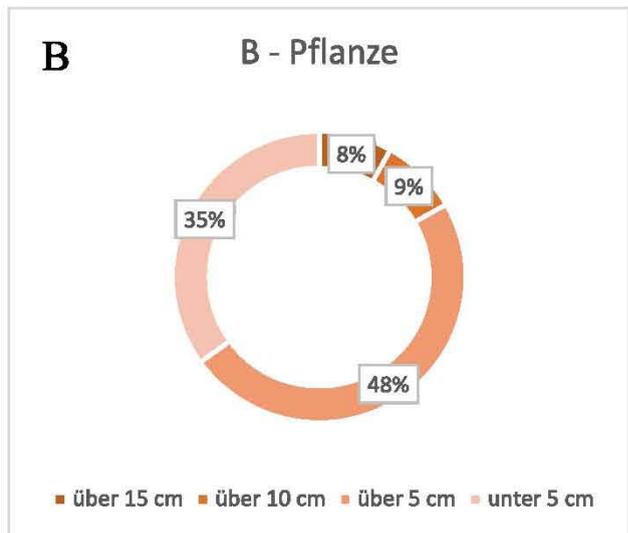
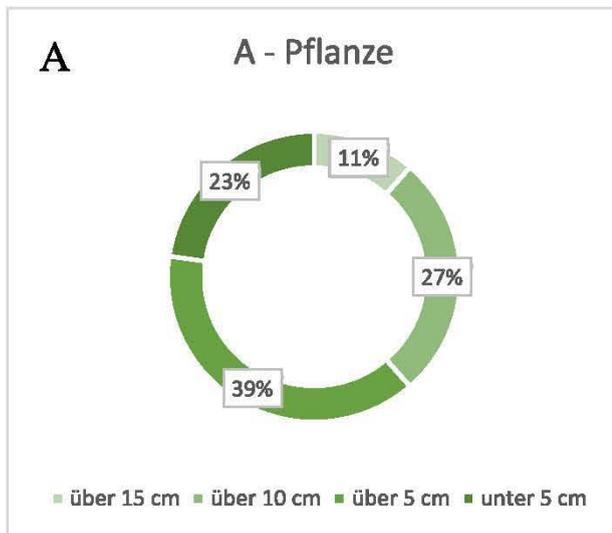


Abb. 17: Länge der Blätter beider Pflanzen; (A) A - Pflanze; (B) B - Pflanze

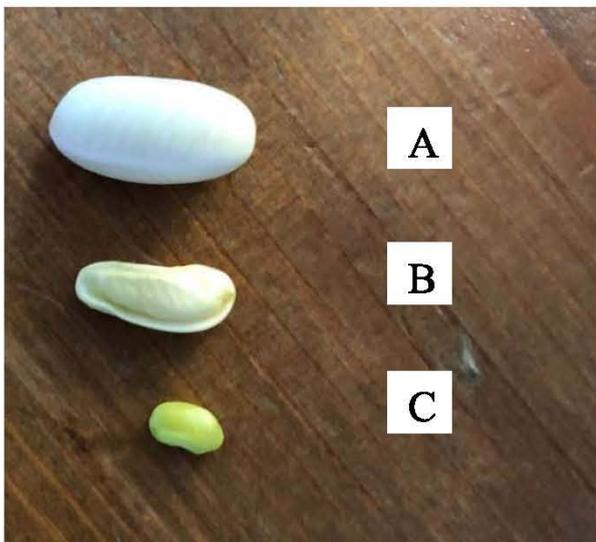


Abb. 18: die verschiedenen Varianten der Bohnensamen der B - Pflanze; (A) weiß und prall; (B) weiß und vertrocknet; (C) grün und sehr klein



video_myko.mp4

Abb. 19: Dokumentation der Phänotypen (wird nochmals separat per E – Mail verschickt)

5.2 Literaturquellen

[¹] Cornelsen (2011): Biologie Oberstufe Einführungsphase (2. Auflage); S. 54 – 57

[²] Engel, Fritz-Martin (1978): Das große Buch der Pilze ,S. 7 – 17

[³] Fuchs, Georg und Schlegel, Hans Günter (2007): Allgemeine Mikrobiologie; S. 56 – 63 und 75 – 79

5.3 Internetquellen

[⁴] Arboristik - Wissen; „Düfte: Die geheime Sprache der Pilze“; URL:

https://www.arboristik.de/baumpflege_wissen_20032015.html

(aufgerufen am 07.01.2021 um 16:40 Uhr)

[⁵] Biologie – Seite; „Mykorrhiza“; URL:

https://www.uibk.ac.at/elearning/eprojekte/projekte11/skript_bau-funktion_20111229-zu-2011240.pdf

(aufgerufen am 07.01.2021 um 16:45 Uhr)

[⁶] Biologie – Seite; „Pflanzen“; URL: https://www.biologie-seite.de/Biologie/Pflanzen#cite_note-1

(aufgerufen am 22.12.2020 um 17:45 Uhr)

[⁷] Biologie – Seite; „Pilze“; URL: <https://www.biologie-seite.de/Biologie/Pilze>

(aufgerufen am 29.12.2020 um 20:15 Uhr)

[⁸] Deeg, Janosch; „Die vernetzte Welt der Pflanzen“; URL: <https://www.spektrum.de/news/die-vernetzte-welt-der-pflanzen/1598658>

(aufgerufen am 22.12.2020 um 17:30 Uhr)

[⁹] DGfM (Deutschen Gesellschaft für Mykologie e.V.); „Wie viele Pilzarten gibt es?“; URL:

<https://www.dgfm-ev.de/infothek/wieviele-pilzarten-gibt-es>

(aufgerufen am 28.12.2020 um 21:00 Uhr)

[¹⁰] Fester, Thomas; Peerenboom, Ellen; Weiß, Markus und Strack, Dieter (Institut für Pflanzenbiochemie); „Mykorrhiza“; URL: <http://www1.biologie.uni-hamburg.de/b-online/myco/index.html>

(aufgerufen am 07.01.2021 um 16:30 Uhr)

[11] Hahn, Katharina; „Beispiel für Symbiose - von Bienen und Blumen oder Ameisen und Läusen“; URL: https://www.helpster.de/beispiel-fuer-symbiose-von-bienen-und-blumen-oder-ameisen-und-laeusen_139310

(aufgerufen am 02.01.2021 um 12:30 Uhr)

[12] Kothe, Erika; „Signalmoleküle in der Mykorrhizasymbiose“; URL: https://pfeil-verlag.de/wp-content/uploads/2016/11/5_14_11.pdf

(aufgerufen am 07.01.2021 um 16:30 Uhr)

[13] Kottke, Ingrid; „Mykorrhiza – Pilz – Wurzel – Symbiosen“; URL: https://de.wikibooks.org/wiki/Mykorrhiza_%E2%80%93_Pilz-Wurzel-Symbiosen/_Druckversion#Die_Aneuroide_Mykorrhiza

(aufgerufen am 08.01.2021 um 19:45 Uhr)

[14] Lauterschlag, Enrico; „Symbiose: Definition, Varianten und Beispiele“; URL: <https://verminscout.de/lexikon/symbiose/>

(aufgerufen am 02.01.2021 um 12:00 Uhr)

[15] Liebe zum Garten; „pH – Wert Pflanzen – Tabelle: der richtige Boden für deine Pflanze“; URL: <https://liebe-zum-garten.de/ph-wert-pflanzen-tabelle/>

(aufgerufen am 03.01.2021 um 19:50 Uhr)

[16] Mayr, Stefan (Institut für Botanik Universität Innsbruck); „Einführung in die Botanik: Bau und Funktion der Pflanzen“; URL: https://www.uibk.ac.at/elearning/eprojekte/projekte11/skript_bau-funktion_20111229-zu-2011240.pdf

(aufgerufen am 22.12.2020 um 15:50 Uhr)

[17] Pflanzenforschung.de (Redaktion); „Krieg der Knöllchen“; URL: <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/journal/krieg-der-knoellchen>

(aufgerufen am 22.12.2020 um 16:00 Uhr)

[18] Pietschmann, Catarina; „Pilzgespinst im Wurzelwerk“; URL: https://www.mpg.de/5021293/F001_Fokus_018-025.pdf

(aufgerufen am 06.01.2021 um 14:00 Uhr)

[19] Pilzfinder; „Wie funktioniert die Symbiose zwischen Baum und Pilz“; URL: <https://www.pilzfinder.de/symbiose.html>

(aufgerufen am 06.01.2021 um 13:50 Uhr)

[20] Rausch, Claudia (Universität Wien); „Ektomykorrhiza – Ethylenproduktion ausgewählter heimischer Pilze von Fichte, Lärche und Zirbe mit Exkurs zur Biologie und Phytohormonproduktion“; URL: http://othes.univie.ac.at/1669/1/2008-10-06_9000543.pdf

(aufgerufen am 08.01.2021 um 20:10 Uhr)

[21] Sack, Henning (Philipps-Universität Marburg); „Morphologisch-anatomische Untersuchungen zur Mykorrhiza von *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn (Dennstaedtiaceae)“; URL: https://www.researchgate.net/profile/Henning_Sack/publication/332766567_Morphologisch-anatomische_Untersuchungen_zur_Mykorrhiza_von_Pteridium_aquilinum_L_Kuhn_Dennstaedtiaceae/links/5cc893cd299bf120978b447a/Morphologisch-anatomische-Untersuchungen-zur-Mykorrhiza-von-Pteridium-aquilinum-L-Kuhn-Dennstaedtiaceae.pdf?origin=publication_detail

(aufgerufen am 08.01.2021 um 19:45 Uhr)

[22] Schaarschmidt, Sara (ULB Sachsen – Anhalt); „Funktionelle Aspekte des Kohlenhydratmetabolismus während der Mykorrhizierung von Tabak (*Nicotiana tabacum*)“; URL: <https://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/07/07H004/t2.pdf>

(aufgerufen am 08.01.2021 um 19:30 Uhr)

[23] Schweda, Christian; „Die drei Grundorgane der Pflanze“; URL: <https://www.christian-schweda.de/folge-005-die-drei-grundorgane-der-pflanze-kormuspflanzen/>

(aufgerufen am 02.01.2021 um 12:30 Uhr)

[24] Simpleclub – Biologie; „Pflanze und Blüte Aufbau – einfach erklärt“; URL: <https://www.youtube.com/watch?v=jfmoewuHGqA>

(aufgerufen am 22.12.2020 um 16:20 Uhr)

[25] Spektrum, Lexikon der Biologie; „Photosynthese“; URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/photosynthese/51369>

(aufgerufen am 29.12.2020 um 20:50 Uhr)

[26] Spektrum, Lexikon der Biologie; „Pilze“; URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/pilze/51826>

(aufgerufen am 29.12.2020 um 20:45 Uhr)

[27] Ulrike Hanninger und Siemens, Folkert; „Trauermücken“; URL: <https://www.mein-schoener-garten.de/trauermuecken>

(aufgerufen am 29.12.2020 um 15:45 Uhr)

[28] Was ist Was; „Blattschneiderameise: Die schlaunen Pilzzüchter“; URL:

<https://www.wasistwas.de/details-natur-tiere/blattschneiderameise-die-schlaunen-pilzzuechter.html>

(aufgerufen am 02.01.2021 um 12:20 Uhr)

5.4 Bildquellen

Bild Deckblatt; URL: <http://www.bigblogofgardening.com/wp-content/uploads/2012/04/mycorrhiza-fungi-image-1.jpg>

Abb. 1: Aufbau des Pilzes; URL: <https://www.tcmfood.ch/wp-content/uploads/2019/09/tcmfood-pilz-aufbau-grafik.jpg>

(aufgerufen am 02.01.2021 um 20:15 Uhr)

Abb. 2: Aufbau einer Pflanze; URL:

<https://www.schullv.de/resources/images/bio/desktop/gefaesspflanze.png>

(aufgerufen am 02.01.2021 um 20:20 Uhr)

Abb. 3: Struktur einer Flechte; URL: <https://www.oocities.org/dpurch/sympics/flechte.gif>

(aufgerufen am 04.01.2021 um 15:30 Uhr)

Abb. 4: Nahrungsaustausch einer Mykorrhiza:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d3/Mutualistic_mycorrhiza_en.svg/1200px-Mutualistic_mycorrhiza_en.svg.png

(aufgerufen am 04.01.2021 um 14:50 Uhr)

Abb. 5: Hyphenmantel bzw. Pilzmantel; URL: https://www.mycofr.ch/rubrique/assos_bas.jpg

(aufgerufen am 04.01.2021 um 15:40 Uhr)

Abb. 6: Querschnitt einer Wurzel, die sich in einer Ektomykorrhiza befindet; URL:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ECM_Schnitte.tif

(aufgerufen am 08.01.2021 um 21:30 Uhr)

Abb. 7: die Pilzfäden (Hyphen) dringen in das Wurzelgewebe der Pflanze ein; URL:

https://www.spektrum.de/lexika/images/bio/f5f4675_w.jpg

(aufgerufen am 08.01.2021 um 21:15 Uhr)

Abb. 8 – Abb. 18: eigene Fotografien bzw. eigene erstellte Grafiken

Abb. 19: Dokumentation der Phänotypen; URL des Programmes: <https://timelapsetool.com/de>

(aufgerufen am 28.12.2021 um 18:45 Uhr)

5.5 Materialien

^[a] verwendete Erde; Gartenkrone Aussaaterde 20L; URL von dem online – Shop:

https://www.hagebau.de/p/gartenkrone-pflanzerde-anP7000098859/?itemId=B1120592&eqrecqid=b7dfc672-55cb-11eb-ae56-2cf05d0dde3d#lmPromo=la,1,hk,adsunten,fl,epoq_recommendationengine_Productteaser2_1120592_pflanzerde

(der online – Shop wurde am 08.01.2021 um 12:45 aufgerufen)

^[b] verwendetes Mykorrhiza – Granulat; Mykorrhiza – shop.de; URL von dem online – Shop:

https://www.amazon.de/dp/B01LXBNZDO?m=A2I2IAAU7Z72LO&ref_=v_sp_detail_page&th=1

(der online – Shop wurde am 08.01.2021 um 12:45 aufgerufen)

^[c] verwendete Pflanzensamen; Dehner Samen Buschbohne “Brilliant“; URL von dem online - Shop:

<https://www.gbk-shop.de/mykorrhiza-granulat-60g>

(der online – Shop wurde am 08.01.2021 um 12:45 aufgerufen)

^[d] verwendete pH – Streifen; Toulifly Bodenteststreifen; URL von dem online – Shop:

https://www.amazon.de/Bodentester-Teststreifen-Bodenmessger%C3%A4t-Pflanzenerde-Rasenpflege/dp/B089SVTFVJ/ref=sr_1_1_sspa?__mk_de_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=ph+streifen+boden&qid=1610103652&sr=8-1-spons&psc=1&smid=A209G4X3B52VVE&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUExTEg0WlpXRvhlMlZVJmVuY3J5cHRlZElkPUEwMjE5NTI1MU9VNFFDRjk0NkJTVkZlbnNyeXB0ZWRBZElkPUEwOTc2MTMwMUdEMTQwOTJMNDJMNCZ3aWRnZXROYW1lPjNwX2F0ZiZhY3Rpb249Y2xpY2tSZWRpcmVjdCZkb05vdExvZ0NsaWNrPXRydWU=

(der online – Shop wurde am 08.01.2021 um 12:45 aufgerufen)