

# Pilze – eine Übersicht mit Fokus auf Basidiomyceten für interessierte Laien

MARIUS SEILER

Seiler, Marius (2019) Funghi – an overview with focus on basidiomycota for interested laypersons. Zeitschrift für Mykologie ...

**Abstract:** The following article gives an overview about the kingdom of fungi. The most important groups of fungi are the Chytridiomycota, Glomeromycota, Basidiomycota and the Ascomycota. The main view lies on the Basidiomycota. They are often structured in hat, stem and hymenium. They are highly adapted to their natural environment with their morphological structure. The cell organelles of fungi are comparable with the one of other eucaryotes. Some cells have a special purpose. Fungi interact with their environment in a diverse way: Either they subsist within a symbiosis with plants (for example Ectomykorrhiza or Arbuscular Mykorrhiza), saprophytic (for example wood or leaf-subverding fungi) or parasitical (on plants, animals or other fungi). The historical meeting-points between fungi and humans are numerous. For example mushrooms as food of paleontological humans, fungi as varmint on crops of Neolithic farmers or as human used organisms for medicine (antibiotics) oder food (yeast & cheese). Mushroom pickers classify Mushrooms as edible, inedible or poisonous. The most dangerous mushroom intoxications are the Phalloides, Orrelanus and Muscarin-syndrome.

**Key words:** Basidiomycota, review, systematics, morphology & anatomy, reproduction, ecology, historical importance, useful funghi

## 1 Zusammenfassung

Der folgende Artikel gibt einen Überblick über das Reich der echten Pilze (Fungi). Die wichtigsten Gruppen der Fungi sind Chytridiomycota, Glomeromycota, Basidiomycota und Ascomycota. Der Hauptfokus liegt bei den Basidiomycota. Diese sind häufig in Hut, Stiel und Fruchtschicht gegliedert. Durch ihren morphologischen Aufbau sind die Pilze gut an die ihre Lebensbedingungen

angepasst. Die Zellorganellen der Pilzzellen, sind denen anderer Eukaryoten ähnlich. Einige Zellen übernehmen spezielle Aufgaben. Pilze interagieren auf vielfältige Art und Weise mit ihrer ökologischen Umgebung: Entweder ernähren sie sich symbiotisch mit Pflanzen (z. B. Ektomykorrhiza und Arbuskuläre Mykorrhiza), saprobiontisch (z. B. holz- oder laubersetzend) oder parasitisch (auf Pflanzen, Tieren oder anderen Pilzen). Die Berührungspunkte in der Vergangenheit zwischen Mensch und Pilzen sind zahlreich, z. B. Pilze als Nahrung paläontologischer Menschen, als Schädlinge neolithischer Ackerbauern und als vom Mensch genutzte Organismen für Medizin (Antibiotika) und Ernährung (Hefe & Käse). Pilzsammler\*Innen ordnen Pilze in essbare, ungenießbare und giftige Pilze ein. Die gefährlichsten Pilzgift-Syndrome sind das Phalloides, das Orellanus und das Muscarin-Syndrom.

**Stichwörter:** Basidiomyceten, Übersichtsartikel, Systematik, Morphologie & Anatomie, Fortpflanzung, Ökologie, Historische Bedeutung, Nutzpilze

## 2 Einleitung

Pilze sind Lebewesen, die das Leben auf der Erde maßgeblich beeinflusst haben und beeinflussen. Man geht davon aus, dass sie für die Landbesiedelung der Pflanzen von fundamentaler Bedeutung waren (SCHIRKONYER & ROTHE 2010; SMITH & READ 2008; SCHÜSSLER 2004; BRUNDRETT 2002). SCHÜSSLER (2004) vermutet, dass Pilze bereits mit Cyanobakterien vergesellschaftet waren, den ersten Lebewesen, die oxygene Photosynthese an Land betrieben haben. Auch heute ist diese Pflanzen Pilz-Interaktion von sehr hoher Bedeutung. Pilze sind jedoch nicht nur für Pflanzen sondern auch für den Menschen und alle anderen Lebewesen unentbehrlich: Als heterotrophe Organismen zersetzen sie totes organisches Material, gehen eine Symbiose mit einer großen Zahl an Pflanzenarten ein und erhöhen dadurch ihre Produktivität, parasitieren aber auch auf Pflanzen, Tieren und anderen Pilzen (MURATI & REXHEPI 2018; LÜDER 2015; SCHWANTES 1996). Vor allem im Ackerbau stellen sie den Menschen dadurch auch vor Herausforderungen (MÜLLER & LÖFFLER 1992).

Menschen kennen und nutzen Pilze seit den Anfängen der Menschheit: SCHWANTES (1996) und MURATI & REXHEPI (2018) betonen, dass das Sammeln von Speisepilzen bereits zur Zeit, als der moderne Mensch (*Homo sapiens*) noch als Jäger und Sammler lebte, eine wichtige Nahrung für die frühen Menschen war. Aber auch auf andere Art und Weise nutzten unsere Vorfahren Pilze. Ötzi, die

bekannte 1991 entdeckte Leiche aus der Jungsteinzeit (KUTSCHERA et. al. 2000), kann als Beispiel angeführt werden: Er trug zwei Pilze bei sich, die zusammen mit seinem Leichnam im Gletscher konserviert wurden. Den Zunderschwamm (*Fomes fomentarius*) und den Birken-Porling (*Piptoporus betulinus*) (PEINTNER & PÖDER 2000). Da das Hutfleisch des Zunderschwamms nur langsam verglüht, ist es praktisch um Glut zu transportieren und im unwirtlichen Gebirge schnell wieder ein Feuer zu entfachen. Beim Birken-Porling wird vermutet, dass Ötzi dessen antibiotische Eigenschaften kannte (LÜDER 2015; PEINTNER & PÖDER 2000).

Die Echten Pilze oder Chitinpilze (Fungi) gehören zu den Eukaryoten, den Organismen mit echtem Zellkern (ADL et al. 2012). Innerhalb der Eukaryoten ordnet man sie den Opisthokonta zu: Das gemeinsame Merkmal dieser Gruppe ist, dass zumindest basale Vertreter in einem Teil ihres Lebenszyklus eine Schubgeißel besitzen. Dieses Merkmal gilt sowohl für die Chitinpilze, als auch für die vielzelligen Tiere (Metazoa) einschließlich des Menschen (ADL et al. 2012). Pilze sind also am nächsten mit den Tieren verwandt und nicht mit Kryptogamen (z. B. Algen und Moosen), wie lange vermutet wurde.

Die Zellen, die den Aufbau und die Lebensweise mehrzelliger Pilze ausmachen, heißen Hyphen. Das sind längliche Zellen, die durch Querwände (Septen), abgetrennt werden (SCHWANTES 1996). Die Gesamtheit der Hyphen eines Pilzes wird Myzel genannt (LÜDER 2015, SCHWANTES 1996). Das Myzel durchdringt das Substrat und ermöglicht eine besonders effektive Nährstoffaufnahme (Abb. 1). Einige Arten wachsen jedoch auch als einzellige Hefezellen, zumindest in Teilen ihres Zyklus, z. B. die Bäckerhefe oder Brandpilze.



Abb. 1: Ein Pilzmyzel durchzieht ein Holzbrett  
Foto: MARIUS SEILER

Umgangssprachlich nennt man die Gebilde aus Hut und Stiel oft Pilze, mykologisch korrekt werden sie als Fruchtkörper bezeichnet, da sie das geschlechtliche Vermehrungsstadium eines Pilzes darstellen (CARRIS et al. 2012). Die geschlechtliche Vermehrung geschieht bei Pilzen durch Sporen, die in der Fruchtschicht (Hymenium) des Fruchtkörpers gebildet werden (LÜDER 2015). Bei Basidiomyceten, die oftmals in Hut und Stiel gegliedert sind, liegt die Fruchtschicht auf der Hutunterseite. Dort wird eine sehr große Anzahl an Sporen produziert. Bei Champignons (*Agaricus*) bis zu 40 Millionen pro Stunde (LÜDER 2015). Sporen können wie Pflanzensamen oder -pollen über viele verschiedene Vektoren verbreitet werden. Die wichtigsten sind auch hier Wind, Tiere und Wasser (HALBWACHS 2015; LÜDER 2015). Dieser Vielfalt entsprechend ist die Oberflächenstruktur von Pilzsporen vielfältig

gestaltet und an den jeweiligen Vektor angepasst (HALBWACHS 2015). Der vorliegende Artikel widmet sich ausschließlich Makromyceten mit besonderem Fokus auf Basidiomyceten.

## 3 Fachwissenschaftlicher Teil

### 3.1 Evolution der Echten Pilze

Der Begriff Pilz entspricht keiner natürlichen Abstammungsgemeinschaft (Monophylum), sondern ist als Organisationsform zu verstehen, die sich mehrfach unabhängig voneinander im Laufe der Evolution entwickelt hat (ADL et al. 2012; Oberwinkler 2012), vergleichbar mit der Flugfähigkeit bei Insekten und Vögeln. In diesem Artikel wird zur besseren Übersichtlichkeit nur auf die Echten Pilze (Fungi) eingegangen. HAWKSWORTH & LÜCKING (2017) schätzen die Diversität der Fungi zwischen 2,2 und 3,8 Millionen Arten.

2007 ordneten 67 mykologische Taxonomen das Reich Fungi neu (HIBBETT et al. 2007). Zur besseren Übersichtlichkeit sollen nur die wichtigsten taxonomischen Gruppen vorgestellt werden, detaillierte Informationen finden sich zum Beispiel in TEDERSOO et al. (2018).

Die erste Abteilung sind die **Chytridiomycota** (Tröpfchenpilze). Nach ADL et al. (2012) besitzen die Zellen Chytridiomycota noch Geißeln, das spricht dafür, dass die Guppe an der Basis der Fungi einzuordnen ist. Sie leben als Saprobionten im Wasser und in Böden, aber auch als Parasiten auf Tieren, Pflanzen, Algen und anderen Pilzen. Chytridiomycota pflanzen sich asexuell fort (ADL et al. 2012).

Die zweite Abteilung sind die **Glomeromycota** (ADL et al 2012; SCHÜSSLER 2004), alle Vertreter besitzen keine Geißeln mehr. Als Ursache für den Verlust der Geißeln vermutet man die Landbesiedelung der Pilze, da die Geißeln außerhalb des Wassers nicht mehr notwendig waren. (OBERWINKLER 2012). ADL et al. (2012) gehen davon aus, dass die Sporenbildung der Glomeromycota asexuell stattfindet. Kennzeichnend für Glomeromycota ist die Arbuskuläre Mykorrhiza (s. u.) die evolutionär älteste Pflanzen-Pilz Symbiose, die mindestens 80 % der Landpflanzen eingehen (SMITH & READ 2008; SCHÜSSLER 2004)

Die dritte phylogenetische Linie sind die **Basidiomycota** (Ständerpilze). Namensgebend für diese Abteilung sind die Basidien (Ständerzellen), in denen die Meiosporen der Pilze gebildet werden (siehe Kap 2.4). Die Basidiomycota besitzen solche Fruchtkörper, die man als Hutpilze mit Stiel aus unseren Wäldern und Wiesen kennt. Allerdings gehören noch weitaus mehr Baupläne in diese

Gruppe: Zum Beispiel Hefen, Rost- und Brandpilze welche vorwiegend auf Pflanzen parasitieren, (LÜDER 2015; ADL ET AL. 2012; OBERWINKLER 2012).

Die letzte wichtige Klasse sind die **Ascomycota**, die einen gemeinsamen Vorfahren mit den Basidiomycota haben, und deshalb mit ihnen die monophyletische Gruppe der Dikarya bilden (HIBBETT et al. 2007). Bei den Ascomyceten (Schlauchpilze) sind ebenfalls die Zellen, die die sexuellen Sporen produzieren, namensgebend: die Asci (Einzahl Ascus), übersetzt Schläuche. Ascomyceten sind die artenreichste Abteilung innerhalb der Echten Pilze (CARRIS et al. 2012). Ascomyceten ernähren sich saprobiontisch, parasitieren auf Pflanzen, leben endophytisch in Wurzeln, oder gehen eine Mykorrhiza mit Bäumen, wie zum Beispiel die bekannten Trüffeln (*Tuber* sp.) ein (ADL ET AL. 2012; CARRIS ET AL. 2012).

## **3.2 Morphologie & Anatomie der Fungi**

### **3.2.1 Morphologie**

Sehr wichtig für Pilzkenner\*Innen und Sammler\*Innen ist die Morphologie, also der äußere Aufbau von Pilzen und ihren Fruchtkörpern, deshalb soll auf diesen genauer eingegangen werden. Die vorliegende Arbeit befasst sich ausschließlich ausschließlich mit Makromyceten, also Großpilzen, die ohne technische Hilfsmittel, wie z. B. einem Mikroskop, sichtbar sind (DÖRFELD & JESCHKE 2001). Fachwissenschaftlich nennt man die Fruchtkörper der Basidiomyceten Basidiocarp, die Fruchtkörper der Ascomyceten Ascocarp (HALBWACHS et al. 2016; DÖRFELD & JESCHKE 2001).

Die Basidiomyceten sollen im Weiteren im Vordergrund stehen.

#### **3.2.1.1 Morphologie der Basidiocarpe**

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, nimmt der Mensch nur zwei Erscheinungsformen von Pilzen wahr. Das unterirdische Myzel und die oberirdischen Fruchtkörper. Fruchtkörper sind allerdings auch aus Myzel aufgebaut. Hier sind die Pilzzellen nur eng zu einem Scheingewebe (Plectenchym) verbunden (LÜDER 2015). Mit den Fruchtkörpern kann sich das Myzel geschlechtlich fortpflanzen (CARRIS et al. 2012). Bei Basidiomyceten gibt es eine ganze Reihe von verschiedenen Bauplänen: Die typischen in Hut und Stiel gegliederten Fruchtkörper, einzellige Hefen, Rost- und Brandpilze an Pflanzen, konsolenförmig wachsende Porlinge mit und ohne Stiel, Korallenpilze, Bauchpilze und viele mehr (CARRIS et al. 2012). Innerhalb der Basidiomycota sind Hutpilze die bekanntesten Vertreter. Ihre Strukturen und die Funktion derselben soll im Folgenden beschrieben werden:

Abbildung 2 stellt die Struktur eines Basidiomyceten-Fruchtkörpers und die ökologischen Funktionen der einzelnen Teile eines Fruchtkörpers dar. Dieser ist in **Stiel**, **Hut** und **Fruchtschicht** gegliedert. Laut HIBBETT et al. (1995) existiert diese Anordnung seit 100 Millionen Jahren. An der heutigen Variabilität dieser Fruchtkörper ist der evolutionäre Erfolg erkennbar (HALBWACHS et al. 2016). Nach KIRK et al. (2011) besitzen 8000 Arten eine solche Strukturierung.

Die **Stiele** von Fruchtkörpern sind vielfältig und wichtig für die Bestimmung von Pilzen. Bei Fruchtkörpern mit geringem Durchmesser sind die Stiele im Verhältnis zum Hut lang, dünn und oft hohl. Bei Fruchtkörpern mit großem Durchmesser, wie zum Beispiel dem Fichten-Steinpilz (*Boletus edulis*), sind die Stiele im Verhältnis zum Hut relativ kurz und gedrungen (HALBWACHS et al. 2016). Der Vorteil der langen und dünnen Stiele ist, dass diese bei Wind mitschwingen und nicht abknicken, und gleichzeitig eine geringere Biomasse benötigen. Allerdings leben solche Fruchtkörper kürzer (HALBWACHS et al. 2016). Pilze mit massigen Stielen leben länger und durch die kurzen Stiele bleibt Feuchtigkeit besser in der Fruchtschicht enthalten (HALBWACHS et al. 2016). Die meisten Stiele sind zylindrisch. Auch hier ist die Struktur durch die Funktion des Stiels bedingt. Er hilft dabei die Fruchtschicht aus dem Substrat herauszuheben und sie gleichzeitig stabil zu halten. Zudem versorgt die Fruchtschicht mit Wasser und Nährstoffen und hebt die nährstoffreiche Fruchtschicht auf Distanz von Räubern (HALBWACHS et al. 2016). An der Stielbasis finden sich oft Strukturen, deren Funktion es ist, wirbellose Räuber von der nährstoffreichen Fruchtschicht (s. u.) fernzuhalten. Diese können zum Beispiel an flockigen oder genatterten Stielen schlechter hochklettern. Oft befindet sich am Stielgrund eine Knolle, diese ermöglicht eine noch effizientere Verankerung des Stiels im Substrat (HALBWACHS et al. 2016).

Der **Hut** ist wohl das bekannteste und markanteste Merkmal, das Pilzen zugewiesen wird. Durchmesser, Farbe, Oberfläche, Wuchsform und viele weitere Merkmale des Hutes sind wichtige Elemente bei der Bestimmung eines Pilzes (LÜDER 2015). Die wichtigste Aufgabe des Hutes ist der Schutz der Fruchtschicht, die auf der Unterseite liegt. Der Hut schützt diese vor biotischen und abiotischen Stressfaktoren (HALBWACHS et al. 2016). Zum Beispiel kann man im Freiland oft Pilze

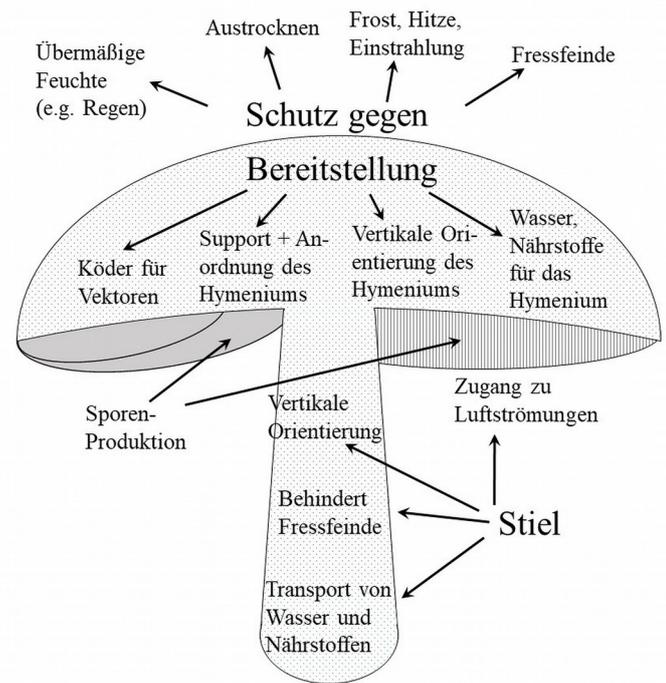


Abb. 2: Struktur und Funktion von Basidiomyceten Fruchtkörpern. Nach Halbwachs & Bässler 2012

finden, deren Huthaut von Schnecken oder Mäusen angefressen wurde, bei denen die Fruchtschicht aber unversehrt geblieben ist. Außerdem bietet der Hut Schutz vor der Sonne, UV-Strahlen und Trockenheit (HALBWACHS et al. 2016). Oft finden sich auf der Huthaut weitere Strukturen wie Stacheln, Härchen, oder eine filzige oder klebrige Huthaut, die den Schutz noch verbessern. Die Farbpigmente von Fruchtkörpern sind sehr vielseitig. HALBWACHS et al. (2016) nennen violett, rot, gelb, blau, grün, braun und schwarz. Zur biologische Funktion der Farben besteht noch Forschungsbedarf. Es wird vermutet, dass die Pigmente z. T. vor Giftigkeit warnen, wie zum Beispiel die rote Hutfarbe bei Täublingen (LÜDER 2015) oder sie können Tiere als Vektoren für die Sporenverbreitung anlocken (HALBWACHS et al. 2016). Neure Forschung (XU et al. 2019) weist darauf hin, dass sich Pilze über Farbstoff auch vor Fressfeinden schützen.

Die **Fruchtschicht** der Ständerpilze ist ebenfalls sehr variabel (Abb.3-5). Es gibt Lamellen, Röhren, Poren, Stacheln, Korallen, Bauchpilze und vieles mehr (HALBWACHS et al. 2016; LÜDER 2015. Lamellen vergrößern die Oberfläche der Fruchtschicht am effizientesten (HALBWACHS et al. 2016). Röhren schützen die Sporen besser vor Räubern und halten die Feuchtigkeit effizienter in der Fruchtschicht. Stacheln sind vorteilhaft bei der Windverbreitung (HALBWACHS et al. 2016). Lamellen sind immer kreisförmig angeordnet und können an Stiel angewachsen, herablaufend oder frei sein. Lamellen können eng oder weit entfernt angeordnet sein. Oft trägt die junge Fruchtschicht mit unreifen Sporen eine andere Farbe als eine alte Fruchtschicht mit reifen Sporen (siehe. Kap. 3.4).



Abb. 3: Lamellen des Gemeinen Weiß-Täublings (*Russula delica*) Foto: MARIUS SEILER



Abb. 4: Röhren des Wurzelnden Bitter-Röhrlings (*Caboboletus radicans*) Foto: MARIUS SEILER



Abb. 5: Oberflächenvergrößerung durch Stacheln beim Igel-Stachelbart (*Hericium erinaceus*) Foto: MARIUS SEILER

Verschiedene Formen der Oberflächenvergrößerung des Hymeniums bei Basidiomyceten: Lamellen (3), Röhren (4) und Stacheln (5)

Um die junge, noch nicht ausgereifte Fruchtschicht bei jungen Fruchtkörpern zu schützen haben sich verschiedene Art und Weisen entwickelt. Für interessierte Laien sind Teilhülle (Velum parziale) und Gesamthülle (Velum universale) relevant (HALBWACHS et al. 2016; LÜDER 2015).

Das Velum universale bedeckt den jungen unreifen Fruchtkörper komplett, um ihn vor äußeren Einflüssen zu schützen (A). Es ist ein gemeinsames Merkmal der Wulstlinge (*Amanita* sp.). Zu dieser Gattung gehören z. B. der Fliegenpilz (*A. muscaria*) und der grüne Knollenblätterpilz (*A. phalloides*). Mit zunehmendem Alter und der Vergrößerung des Hutes reißt das Velum universale auf und hinterlässt z. B. beim Fliegenpilz die bekannten weißen Pusteln auf der Huthaut (C). Beim Grünen Knollenblätterpilz hinterlässt das Velum universale selten Hüllreste auf der Hutoberseite, sondern eine Scheide an der Stielbasis (D). Diese wächst vollständig um die Stielknolle und ist damit ein essentielles Merkmal, um diesen tödlich giftigen Pilz zu erkennen (LÜDER 2015). Das Velum parziale bedeckt im Jugendstadium nicht den kompletten Fruchtkörper, sondern nur die Fruchtschicht desselben (B). Es dient dem Schutz der unreifen Sporen. Mit zunehmendem Wachstum des Hutes reißt auch das Velum parziale auf und bleibt am Stiel in Form eines Ringes (C & D) oder Schleiers zurück. Es ist ebenfalls ein wichtiges Merkmal beim Bestimmen von Fruchtkörpern. Viele Wulstlinge (*Amanita* sp.), Champignons (*Agaricus* sp.), aber auch einige Schmierröhrlinge (*Suillus* sp.) besitzen ein Velum parziale (HALBWACHS et al 2016; LÜDER 2015). Der Schleier ist hingegen namensgebend für die Gattung Schleierlinge (*Cortinarius*).

Die Fruchtkörper der Basidiomyceten variieren extrem in der **Größe**, vor allem interspezifisch, aber auch intraspezifisch (HALBWACHS et al. 2016). Die Fruchtkörper des Nadel-Blasssporrüblings (*Gymnopus perforans*) werden z. B. 0,5-1 cm groß

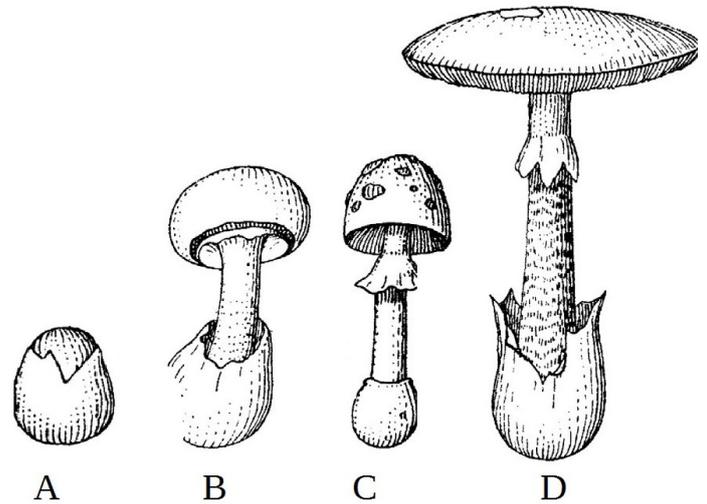


Abb. 6: Teil und Gesamthülle bei Basidiocarpen, nach Lindau & Ulbrich (1928) verändert



Abb. 7: Die Lamellen dieses Pilzes sind teilweise noch von einer Teilhülle, hier ein Schleier, bedeckt.

(GERHARDT 2014), die Hüte von *Termitomyces titanicus* erreichen einen Durchmesser von 1m (PEGLER & PEARCE, 1980). Die Fruchtkörper des Fichten-Steinpilzes (*Boletus edulis*) können laut GERHARDT (2014) zwischen 5 und 25 cm groß sein, ein Unterschied um den Faktor fünf. Die Ursachen innerartlicher Unterschiede beruhen vor allem auf Temperaturschwankungen (AUSTWICK 1968) sowie Nährstoff- und Wasserknappheit (MOORE 1998). Je günstiger die Bedingungen sind, desto größer sind die Fruchtkörper (HALBWACHS et al. 2016). BÄSSLER et al. (2014) fanden heraus, dass Ektomykorrhiza-Pilze, also Pilze, die mit Bäumen eine Symbiose eingehen, größere Fruchtkörper bilden als saprobiontische Pilze (siehe Kap 3.5.2). Als Ursache wird vermutet, dass die Ektomykorrhiza-Pilze durch die Ernährung der Wirtsbäume weniger abhängig von der Umgebung sind als die Saprobionten. Weitere Vorteile von großen Fruchtkörpern sind eine längere Überlebensdauer, womit eine größere Sporenproduktion einhergeht (MOORE ET AL. 2008; DÖRFELT & GÖRNER 1989). Durch ein dickeres Hutfleisch beschützen dicke Hüte auch die Fruchtschicht effizienter als dünne Hüte. Dafür erregen große Fruchtkörper eher die Aufmerksamkeit von Prädatoren als kleine (HALBWACHS et al. 2016). Fruchtkörper können wenige Stunden bis 30 Tage überleben, es wurden auch schon Fruchtkörper des Zunderschwamms (*Fomes fomentarius*) gefunden, die 30 Jahre alt waren (HALBWACHS et al. 2016).

In der Fruchtschicht werden die Meiosporen der Pilze produziert. Auch **Sporen** sind in ihrer Morphologie extrem vielfältig, an dieser Stelle soll auf die wichtigsten morphologischen Merkmale und kurz auf ihre ökologische Bedeutung verwiesen werden (HALBWACHS & BÄSSLER 2015): Basidiosporen variieren in der **Größe**: Laut (KNUDSEN & VESTERHOLD 2012) sind die kleinsten 2,3-3 µm lang, sehr große Sporen sind 16 µm lang und 16 µm breit. Große Sporen sind langlebiger und können mehr Nährvorräte speichern (DEACON 2006; CHARLILE & GOODAY 2001). Kleine Sporen sind leichter, fliegen weiter und können leichter Hindernisse passieren (NORROS ET AL. 2014; TOULLOSS 2005).

Die **Form** der Sporen unterschieden sich mitunter stark: Sie können elliptisch, rundlich, glatt, feinwarzig, ovale, nieren-, würstchenförmig und eine ganze Reihe weiterer Formen besitzen (LÜDER 2015; DÖRFELT & JESCHKE 2001). Die Form wirkt sich ebenfalls auf den Verbreitungsvorgang aus: Kugelige Sporen haben eine geringere Oberfläche als längliche Sporen (CHARLILE & GOODAY 2001), und bieten Parasiten und Fressfeinden kleinere Angriffsflächen (HALBWACHS & BÄSSLER 2015). Längliche Sporen können durch den Wind weiter verteilt werden (INGOLD 1965).

Die **Wanddicke** wirkt sich auf die Widerstands- und Keimfähigkeit von Sporen aus. Dickwandige Sporen sind besser gegen äußere Einflüsse geschützt und überleben die Verdauungsorgane von

Tieren als Verbreitungsvektoren eher als dünnwandige Sporen. Dünnwandige Sporen keimen allerdings schneller als Dickwandige (TULLOSS 2005).

Manche Sporen besitzen einen **Keimporus**, dieser ermöglicht eine leichtere Keimung der Spore, nachdem diese von einem Tier ausgeschieden wurde. Vor allem solche Sporen, die ihr Substrat schnell besiedeln müssen haben oft einen Keimporus (HALBWACHS & BÄSSLER 2015)

Sporen können **ornamentiert** sein, das bedeutet, dass Strukturen auf die Sporen aufgelagert sind (DÖRFELD & JESCHKE 2001). Abbildung 8 zeigt Beispiele für Sporenornamente.

Durch die Ornamentierung haften die Sporen besser an Substraten und Vektoren (JENNINGS & LYSEK 1999). Beispiele für diese Vektoren

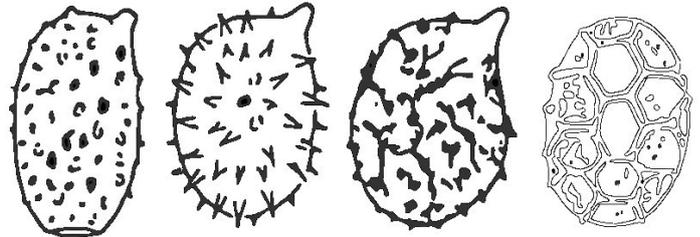


Abb. 8: verschiedene Ornamentierungen bei Pilzsporen, Dörfelt & Jeschke 2001.

sind zum Beispiel Nebeltröpfchen (GREGORY 1973) und wirbellose Tiere (WÖSTEN & WESSELS 1997).

Schon in dieser kurzen und vereinfachten Darstellung wird deutlich, dass Pilzsporen auf vielerlei Art und Weise verbreitet werden können. Zur Ökologie von Basidiosporen liegt derzeit wenig Literatur vor, die Sporeneigenschaften scheinen jedoch von ökologischer Bedeutung für Pilze zu sein (HALBWACHS & BÄSSLER 2015).

Sporen können verschiedene **Farben** besitzen. Häufig verfärben sich die Sporen während ihres Reifungsprozesses, zum Beispiel beim Grünblättrigen Schwefelkopf (*Hypholoma fasciculare*) oder beim Riesenbovist (*Calvatia gigantea*). Beispielfarben bei reifen Sporen sind oliv, cremefarben, weiß oder braun. Das Erkennen der reifen Sporenpulverfarbe ist sehr wichtig zum Bestimmen und Erkennen und Gruppen und Arten. Elias Magnus Fries (1794-1878) und Adalbert Ricken (1851-1921) teilten Pilze durch ihr Sporenpulver in Gruppen ein. Diese Einteilung hat sich bis heute in der Mykologie bewährt (LÜDER 2015). Man grenzt weißes, rosafarbiges und braunes Sporenpulver voneinander ab. Dazwischen gibt es unzählige Zwischennuancen wie cremefarben, milchkaffeefarben, rostbraun u. v. m. (GERHART 2014 ).



Abb. 9: Das rosabräunliche Sporenpulver eines Dachpilzes

### 3.3 Anatomie der Basidiomyceten

Die Anatomie der Basidiomyceten ist bei der Pilzbestimmung von zentraler Bedeutung. Da Hyphen verhältnismäßig dünn sind (1-5 µm Durchmesser) ist ihre Mikroskopie dadurch anspruchsvoller als die von Pflanzen- oder Tierzellen. Das Thema der Pilzmikroskopie ist allerdings so komplex, dass an dieser Stelle nur ein flüchtiger Einblick in die Anatomie der Basidiomyceten gegeben werden kann. Interessierte Leser\*Innen werden in CLEMENÇON (1999) umfangreicher informiert.

Wie schon in der Einleitung erwähnt, sind die Echten Pilze zellulär aus Hyphen aufgebaut. CLEMENÇON (1999) gibt an, dass sich die vegetativen Hyphen des Myzels kaum von den generativen Hyphen der Fruchtkörper unterscheiden. Eine vegetative Hyphe besteht aus folgenden Organellen (CLEMENÇON 1999): Einer dünnen Wand, von außen nach innen bestehend aus einer Schleimschicht, einer Außenschicht und einer Innenschicht. Die Schleimschicht ist sehr wichtig für die Lebensweise der Pilze. Durch sie können die Hyphen besser in die Bodenporen eindringen und die Bodenpartikel verkleben, wodurch der Boden besser Wasser speichert. Vor allem bei Mykorrhizapilzen, die eine enge Verbindung mit Pflanzenwurzeln eingehen, (Kap. 3.5.1) ist das von wichtiger Bedeutung (SCHÜSSLER 2009). Echte Pilze besitzen als Eukaryoten Zellkerne, mit einer Kernhülle und Kernkörperchen (Nucleolus). Dort befindet sich das Erbgut der Pilze, die DNA. Hyphen besitzen wie Pflanzen und Tiere Mitochondrien, die durch Zellatmung Energie gewinnen (CAMPBELL & REECE 2011). Besonders viele Mitochondrien finden sich in der Spitze der Hyphe, weil Hyphen fast ausschließlich dort wachsen und am Ort des Wachstums die meiste Energie benötigt wird (CLEMENÇON 1999). Hyphen enthalten zudem Ribosomen, die Organellen der Proteinsynthese. Dort werden auch die Enzyme produziert, die für den pilzlichen Stoffwechsel, zum Beispiel beim Holzabbau, von zentraler Bedeutung sind. 80-90 % der pilzlichen Proteine sind Enzyme, manche von ihnen werden auch wirtschaftlich genutzt (DÖRFELT & JESCHKE 2001). Außerdem finden sich Vesikel, Chitosomen, Mikrotubuli, Endoplasmatische Reticula und Vacuolen in Pilzzellen (CLEMENÇON 1999).

Je nach Funktion der Hyphen lassen sich verschiedene Typen differenzieren:

1. Bei **Sklerohyphen** ist die Hyphenwand verdickt, die Fruchtkörper bekommen eine holzartige Konsistenz. Sie finden sich bei vielen holzzeretzenden Porlingen wie dem Zunderschwamm (*Fomes fomentarius*) oder dem Rotrandigen Baumschwamm (*Fomitopsis pinicola*). Sie bilden das Stützgeflecht dieser Fruchtkörper (CLEMENÇON 1999).
2. In **Speicherhyphen** werden Kohlenhydrate in wasserunlöslicher Form als Energieträger zum Überwintern (Sklerotien) mancher Pilze, wie zum Beispiel des Mutterkorns (*Claviceps*

- purpurea*). Nach dem Ende des Winters bildet das Sklerotium Fruchtkörper, die benötigte Energie liefern die Speicherhyphen (CLEMENÇON 1999).
3. Das Kennzeichen von **Physalohyphen** ist die Vergrößerung des Zellinnendrucks (Turgor). Dies geschieht durch eine erhöhte Wasseraufnahme der Hyphen. Wegen der Begrenzung der Hyphenwand vergrößert sich der Innendruck. Diese Zellen finden sich im Stützgeflecht von fleischigen Arten, die bei Trockenheit schrumpfen, z. B. Röhrlinge und viele Lamellenpilze (CLEMENÇON 1999).
  4. **Gelifere Hyphen** sind Hyphen, bei denen die äußere Hyphenwand verquollen ist. Es wirkt wie eine gallertige Masse, die eine ähnliche Konsistenz wie Knorpel aufweist. Die so verklebten Hyphen bilden dadurch ein mechanisch belastbares Scheingewebe (CLEMENÇON 1999).
  5. Der letzte besondere Hyphentypus ist die **Sekrethyph**, von denen es verschiedene Formen gibt, je nachdem, welches Sekret sie produziert (CLEMENÇON 1999). Ein bekanntes Beispiel für Sekrethyphen sind Laticifieren, die milchsaftführenden Hyphen der Milchlinge (*Lactarius*) (KRÄNZLING 2005).

### 3.4 Fortpflanzung der Basidiomyceten

Um sich geschlechtlich fortpflanzen zu können, bilden Basidiomyceten wie Ascomyceten eine Fruchtschicht (Hymenium) (LÜDER 2015). Gleichzeitig ist diese Fruchtschicht ein zentrales Merkmal bei der Bestimmung (LÜDER 2015, GERHART 2014). Um eine große Anzahl an Sporen zu produzieren, haben sich im Laufe der Evolution verschiedenste Typen der Oberflächenvergrößerung wie Lamellen, Leisten, Röhren, Stacheln u. v. m. gebildet (HALBWACHS et al. 2016; LÜDER 2015).

Die Ontogenese eines Basidiomyceten ist in Abb. 10 dargestellt. Zunächst wirft der Fruchtkörper Sporen aus und sie werden von Vektoren verbreitet (E). Die Sporen keimen, wenn die Bedingungen günstig sind und bei Basidiomyceten entsteht aus der gekeimten Spore ein Primärmyzel, das haploid ist (F) (HALBWACHS & BÄSSLER 2015, LÜDER 2015). Erst wenn dieses Primärmyzel auf ein

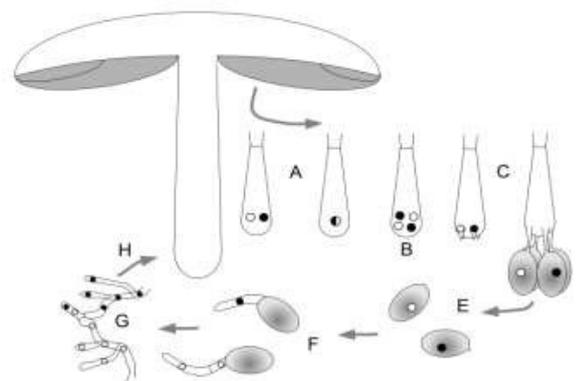


Abb. 10: Ontogenese eines Basidiomyceten, Halbwachs & Bässler 2015.

anderes Primärmyzel trifft, das ein anderes Geschlecht aufweist, können diese verschmelzen

(Plasmogamie) und ein dikaryotisches Pilzmyzel entsteht (G), das Fruchtkörper bilden kann (H) (KOTHE 2016; HALBWACHS & BÄSSLER 2015; LÜDER 2015). Bei Basidiomyceten ist diese Verschmelzung besonders, weil zunächst nur das Zellplasma der Primärmyzele verschmilzt, nicht aber die Zellkerne (LÜDER 2015). Die Zellkerne verschmelzen erst im Hymenium eines neuen Fruchtkörpers (A), aus diesem diploiden Zellkern entstehen durch Meiose vier haploide Kerne (B). Die Basidien und Sporen werden gebildet (C) und können wiederum verbreitet werden (HALBWACHS & BÄSSLER, 2015; LÜDER 2015). Die Sporen der Basidiomyceten nennt man Basidiosporen (HALBWACHS & BÄSSLER 2015).

## **3.5 Ökologie der Pilze**

Echte Pilze werden abhängig von ihrer Ernährungsweise in drei ökologische Gruppen eingeteilt: Symbionten, Saprobionten und Parasiten. Allerdings können die Übergänge zwischen diesen Ernährungsweisen fließend sein (SCHWANTES 1996). Pilze ernähren sich nicht autotroph, wie Pflanzen es über die Photosynthese tun, sondern heterotroph, d. h. sie sind wie Tiere auf organische Substanz anderer Lebewesen angewiesen (LÜDER 2015). Die ökologischen Funktionen der Pilze sind für uns Menschen von zentraler Bedeutung und sollen daher genau betrachtet werden:

### **3.5.1 Symbiosen mit Pflanzen**

Pilze bilden mit einer ganzen Reihe von Pflanzenarten eine Symbiose. Die bekannteste Form der pilzlichen Symbiose nennt man Mykorrhiza, zu deutsch Pilzwurzel. Dabei tauschen die Pflanze und der Pilz im Wurzelbereich Stoffe aus. Laut KOTHE (2016) gehen aller 95 % Landpflanzen Mykorrhizen ein.

Der Durchmesser von Hyphen ist bis zu 60 mal dünner als der von Wurzeln (SHARMA 2017). In 2,5 m<sup>2</sup> Boden sind Hyphen von 40000 km Länge vorhanden (SCHÜSSLER 2009). Durch die vergrößerte Oberfläche können Pilze Wasser und Nährstoffe, wie zum Beispiel Stickstoff, Phosphor, Magnesium und Aminosäuren (KOTHE 2016) sehr viel effizienter aus dem Boden aufnehmen. Aufgrund ihres geringeren Durchmessers können Hyphen im Gegensatz zu Wurzeln und Wurzelhaaren in die kleinsten Bodenporen eindringen. Durch den Stoffaustausch sind die Wirtspflanzen sind resistenter gegenüber Stress, wie zum Beispiel Nährstoffknappheit oder Trockenheit (POWELL & RILLIG 2018; KAMEL et al. 2016). Die Mykorrhizapilze erhalten von ihrer Wirtspflanze Zucker oder Fette, die die Pflanze über die Photosynthese erzeugt (POWELL ET AL. 2018; KOTHE, 2016). Laut JENNINGS (1999) und SCHÜSSLER (2004) verbrauchen Mykorrhizapilze

im Rotbuchenwald (*Fagus sylvatica*) immerhin ein Drittel des produzierten Zuckers. Mykorrhizapilze übernehmen noch weitere Aufgaben: Sie vernetzen sich mit anderen Mykorrhizapilzen sowohl desselben Wirtsbaumes, als auch mit denen anderer Bäume (LÜDER 2018; KLEIN et al. 2016; SIMARD et al. 2015). Dabei werden nicht nur zwei Individuen derselben Art, sondern auch artenübergreifend Bäume vernetzt (KLEIN et al. 2016; GORZELAK et al. 2015; SIMARD et al. 2015). Dadurch können die Pflanzen Wasser, Zucker, Stickstoff (GORZELAK et al. 2015; SIMARD et al. 2015), Phosphor (EASON AND NEWMAN 1990; EISSENSTAT 1990), Pflanzenhormone (SONG et al. 2010) und sogar genetisches Material (GIOVANNETTI et al. 2006), aber auch Signale, wie zum Beispiel bei einem Schädlingsbefall, untereinander austauschen (BABIKOVA et al. 2013). Durch die große Ähnlichkeit mit dem *world wide web* nennt man dieses Zusammenspiel *wood wide web*. Dieses kann sehr effizient und flexibel auf Umwelteinflüsse reagieren (HALBWACHS 2017).

Man unterscheidet **verschiedene Formen** der Mykorrhiza:

Bei der **Ektomykorrhiza** umschließen die Hyphen des Pilzes die Wurzelzellen, dringen aber nicht in die Wurzelzellen ein, so stehen sich Pflanze und Pilz in engem Kontakt. Man nennt diese Struktur aus Wurzelzellen und Pilzzellen Hartigsches Netz (WEISS ET AL. 2016; KOTHE 2016; SCHIRKONYER & ROTHE 2010). Durch dieses Netz können die Wirtspflanze und der Ektomykorrhizapilz wie oben beschrieben Wasser, Nährstoffe und vieles mehr austauschen (KOTHE 2016). In Deutschland, vor allem gekennzeichnet durch die sommergrünen Laubwäldern der gemäßigten Zone, ist die Ektomykorrhiza weit verbreitet. Aber auch für Nadelbäume ist die Ektomykorrhiza sehr wichtig (HALBWACHS 2017). Wegen der hohen Bedeutung für die heimischen Ökosysteme soll auf die Ektomykorrhiza etwas genauer eingegangen werden: Bei ihr stehen relativ wenige Arten von Wirtsgehölzen einer sehr großen Anzahl an Mykorrhizapilzen gegenüber (HALBWACHS 2017). Im Bialowieża-Nationalpark, zwischen Polen und Weißrussland, kommen auf 1100 km<sup>2</sup> 27 Baumarten vor, von denen 90 % eine Ektomykorrhiza-Symbiose eingehen (FALIŃSKY & FALIŃSKA 1986). Vergleicht man dies mit tropischen Zonen, so zählten VALENCIA et al. (1994) im Amazonasgebiet zwischen 150 und 470 Baumarten. Hier dominiert ein anderer Mykorrhiza-Typ, die Arbuskuläre Mykorrhiza (JANOS 1980) (s.u.).

Ektomykorrhizapilze verfolgen zwei unterschiedliche Strategien: Entweder sie spezialisieren sich auf einen bestimmten Wirt oder sie können eine Mykorrhiza mit verschiedenen Wirten eingehen (SIMARD et al. 2015, HALBWACHS 2017). Ein Beispiel für einen Spezialisten ist die Weißstielige Rotkappe (*Leccinum aurantiacum*), sie geht nur mit Zitter-Pappeln (*Populus tremula*) eine Symbiose ein (GERHARDT 2014). Ein Beispiel für einen Generalisten ist der Flockenstielige

Hexenröhrling (*Boletus erythropus*), er kann mit der Rotbuche (*Fagus sylvatica*), mit der Stiel-Eiche (*Quercus robur*), mit der Trauben-Eiche (*Qu. petraea*) und mit der Gewöhnlichen Fichte (*Picea abies*) eine Mykorrhiza eingehen (GERHARD 2014). KNUDSEN & VESTERHOLT (2012) bestätigen, dass es weniger Spezialisten als Generalisten gibt. Beide Strategien haben Vor- und Nachteile: Spezialisten „kosten“ den Baum mehr Zucker (BRUNS et al. 2002), da die Pilze eine besonders spezifische ökologische Nische haben, zum Beispiel bei Rotbuchen auf Kalkboden. Dadurch helfen sie ihren Wirtspflanzen auch in solchen Gebieten durchsetzungsfähig zu sein. Generalisten sind in solchen Habitaten eher im Nachteil (NENTWIG et al. 2009). Generalisten bekommen von ihren Wirtspflanzen weniger Zucker als Spezialisten und sind dadurch von mehreren Nahrungsquellen (=Wirtsbäumen) abhängig, sind allerdings auch nicht einem bestimmten Wirtsbaum ausgeliefert und dadurch resistenter gegenüber Ökosystem-Störungen, wie zum Beispiel Bodenverdichtung oder dem Klimawandel.

Um zu verhindern, dass Ektomykorrhizapilz und Pflanze sich gegenseitig ausnutzen, haben beide Mechanismen entwickelt, um die Abhängigkeit zum jeweils anderen zu erhalten (HALBWACHS 2017). KJØLLER et al. (2012) beschreiben, dass Wirtsbäume nach Düngungen des Bodens die Zuckerabgaben an Ektomykorrhizapilze vermindern. CORRÊA et al. (2011) bestätigen, dass die Wirtsbäume bei geringer Stickstoffaufnahme der Ektomykorrhizapilze ebenfalls die Zuckerabgaben reduzieren. Auf der anderen Seite investieren Ektomykorrhiza-Pilze in ihre eigene stickstoffbindende Biomasse, um die Abhängigkeit der Wirtsbäume zu vergrößern (KUYPER & KIERS 2014).

Ein Baum geht nicht nur mit einer bestimmten Pilzart, sondern mit einer ganzen Bandbreite an Pilzen eine Ektomykorrhiza ein (HALBWACHS 2017). So kann zum Beispiel die Hänge-Birke (*Betula pendula*) eine Lebensgemeinschaft mit über 100 Pilzarten eingehen (LÜDER 2015; ROY-BOLDUC et al. 2015). Darunter sind bekannte Pilze wie der Fliegenpilz (*Amanita muscaria*), der Birkenpilz (*Leccinum scabrum*) und die Birken-Rotkappe (*Leccinum versipelle*) (GERHARDT 2014). Weitere bekannte in Deutschland heimische Ektomykorrhiza-Pilze sind zum Beispiel der Fichten-Steinpilz (*Boletus edulis*), der Echte Pfifferling (*Cantharellus cibarius*) und der tödlich giftige Grüne Knollenblätterpilz (*Amanita phalloides*) (LÜDER 2015).

Eine besondere Herausforderung für Ektomykorrhizapilze ist es, ihre Sporen gezielt in die Nähe ihrer Baumwirte zu bringen, da sie ohne Wirt nicht lebensfähig sind (LINDAHL & TUNILD 2015). Die Sporen der Ektomykorrhizapilze bleiben oft in Haaren von Verte- und Invertebraten hängen oder passieren den Verdauungstrakt der Tiere unbeschadet (HALBWACHS & BÄSSLER 2015). Durch bestimmte Wurzelsignale kann dann eine Sporenkeimung ausgelöst werden (HASSAN & MATHESIUS

2012), aber auch Ektomykorrhizapilze können Signalstoffe in die Umgebung abgeben, die das Wurzelwachstum in Richtung des Ursprungsmyzels anregt (DITENGOU et al. 2015). Von Klein- und Großsäugern können die Sporen über weite Strecken, von Wirbellosen über kürzere Strecken verbreitet werden (HALBWACHS & BÄSSLER 2015).

Für die Europäische Forstwirtschaft ist die Ektomykorrhiza von herausragender Bedeutung: Eichen (*Quercus* sp.), Rot-Buche (*Fagus sylvatica*), Gewöhnliche Fichte (*Picea abies*), Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris*), Lärche (*Larix decidua*), Weiß-Tanne (*Abies alba*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und auch Hänge-Birke (*Betula pendula*) gehen eine Ektomykorrhiza mit Pilzen ein (HALBWACHS 2017; LÜDER 2015; SCHÜSSLER 2009). Laut der letzten Bundeswaldinventur (2013) des BUNDESMINISTERIUMS FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT machen die oben erwähnten Ektomykorrhiza-Wirte 82 % der bewaldeten Fläche Deutschlands aus. Der Anteil an Nadelbäumen liegt gerundet bei 54 %, der von Laubbäumen bei 44 % (BUNDESMINISTERIUMS FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT 2013).

Ein weiterer wichtiger Mykorrhiza-Typ ist **Arbuskuläre Mykorrhiza**. Bei diesem Typ leben die Pilze in der Wurzelrinde und dringen bäumchenförmig in die Zellen ihrer Wirtspflanze ein (NAADEM ET AL. 2017; SCHÜSSLER 2009). Man nennt diese Strukturen Arbuskeln. Die Hyphen sind hier sehr fein verzweigt, was einen effizienten Stoffaustausch ermöglicht (SCHÜSSLER 2009). Wie bei der Ektomykorrhiza stellt der Pilz der Pflanze Nährstoffe wie Phosphor und Stickstoff zur Verfügung und bekommt dafür Zucker oder auch Lipide von der Wirtspflanze (POWELL & RILLIG 2018; NAADEM ET AL. 2017; SCHÜSSLER 2009). Den größten Anteil der Nährstoffe, den Arbuskuläre Mykorrhizapilze ihren Pflanzenwirten zukommen lassen, stellt Phosphor (RAID & GREENE 2012). Arbuskuläre Mykorrhizapilze verkleben die Bodenpartikel, indem sie Glycoproteine ausscheiden (SCHÜSSLER 2009). Dadurch speichert der Boden besser Wasser, was auch einen Vorteil für die Wirtspflanzen darstellt. Die arbuskuläre Mykorrhiza ist die häufigste und älteste Mykorrhiza-Form der Erde: 80% der Kormophyten-Arten bilden eine Arbuskuläre Mykorrhiza (SCHÜSSLER 2009; SMITH & READ 2008). In unseren gemäßigten Breiten finden wir sie vor allem bei krautigen Pflanzen, zum Beispiel bei Süßgräsern (Poaceae). Die einzigen Pflanzengruppen, die keine Arbuskuläre Mykorrhiza bilden, sind die Heidekrautartigen, die Orchideen, die Kreuzblütler und die meisten Baum- und Straucharten der kalten und gemäßigten Zonen (SCHÜSSLER 2009). Dadurch ist die Arbuskuläre Mykorrhiza besonders bedeutsam für die menschliche Ernährung: Die zehn in der Landwirtschaft meistgenutzten Pflanzenarten gehen Arbuskuläre Mykorrhizen ein, u. a. Mais (*Zea mays*), Reis (*Oryza sativa*), Weizen (*Triticum aestivum*), und Kartoffel (*Solanum*

*tuberosum*) (SCHÜSSLER 2009). Um eine zukunftsorientierte Ernährung zu gewährleisten, sollten wir unser Wissen über deren arbuskuläre Mykorrhizen ausbauen (SCHÜSSLER 2009), zumal die Phosphorvorräte für Kunstdünger bei anhaltendem Konsum in 50-100 Jahren erschöpft sein werden (GREULING 2011).

Die weiteren Symbiosen-Typen mit Pflanzen sollen hier nur der Vollständigkeit genannt werden, da sie für Laien eine geringere Bedeutung haben. Die **Orchideen-Mykorrhiza**, Mykorrhizapilze als Symbionten von **mykoheterotrophe Pflanzen**, endotrophe Mykorrhiza und Endophyten, die auch eine Symbiose zwischen Pilzen und Pflanzen darstellen (SHARMA 2017; WEISS et al. 2016).

### 3.5.2 Pilze als Saprobionten

Saprobiontische Pilze spielen eine zentrale Rolle im Stoffkreislauf um Holz, Blätter, Pilze, Dung und viele weitere organische Stoffe in Humus umzuwandeln. Man kann sie auch als Recycler der Natur bezeichnen (GRIFFITH & RODERICK 2008). DÖRFELT & JESCHKE (2001) definieren Saprophyten als Organismen, die sich von toter organischer Substanz ernähren. Die Nährstoffe werden dabei unmittelbar über Osmose aus dem Substrat aufgenommen und mithilfe von Enzymen aufgeschlossen (DÖRFELT & JESCHKE 2001, SCHWANTES 1996). Der Begriff organisches Material ist grob, daher soll er noch konkretisiert werden: Man unterscheidet boden-, holz-, blatt-, moos-, pilz-, dung- und brandstellenbewohnende Saprobionten (GRIFFITH & RODERICK 2008, SCHWANTES 1996). Die für Hobbymykolog\*Innen wichtigsten Typen sollen kurz vorgestellt werden: **Bodenbewohnende Saprobionten:** Für die meisten Menschen ist der Boden das typische Substrat von Pilzen (SCHWANTES 1996). Wenn man den Waldboden aufgräbt, findet man stets Myzel. Das Myzel befindet sich v. a. in der Pflanzenstreu und in der Humusschicht unterhalb der Streu (GRIFFITH & RODERICK 2008; SCHWANTES 1996). Ein Beispiel für einen Boden bewohnenden Saprobionten ist der Wiesen-Champignon (*Agaricus campestris*).

**Holzbesiedelnde (lignicole) Pilze** sind von hoher Bedeutung für alle Wald-Ökosysteme, da fast ausschließlich Pilze dazu in der Lage sind Holz abzubauen. Erst durch die Zersetzung des Holzes können die im Holz gespeicherten Stoffe wieder für andere Organismen zugänglich werden (LÜDER 2015). Holz besteht vorwiegend aus Zellulose und Lignin.

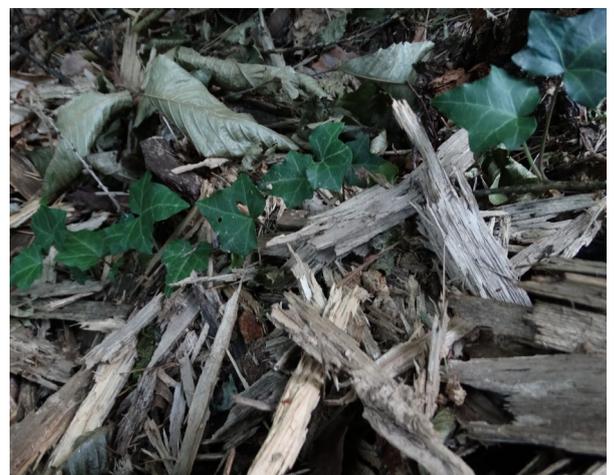


Abb. 11: von Weißfäuleerregern zersetztes Holz

Holzzersetzende Pilze haben sich im Laufe der Evolution auf diese beiden Stoffe spezialisiert. Pilze, die nur Lignin abbauen können erzeugen eine Weißfäule. Nach dem Abbauprozess bleibt die Zellulose als weißliche, beim Abtrennen oft längstfaserige Struktur zurück (Abb.11). Bei Pilzen, die nur Zellulose abbauen können bleibt das Lignin als bräunliche, quaderförmig brechende Struktur zurück (Abb. 12). Man bezeichnet diesen Vorgang als Braunfäule (LÜDER 2015).

**Pilzzersetzende Pilze** spielen für Hobbymykolog\*Innen eine geringere Rolle. Allerdings werden bekannte Speisepilze wie Röhrlinge und Reizker gelegentlich von Pilzzersetzenden Pilzen befallen und sind dann nicht mehr für den Verzehr geeignet (SCHWANTES 1996).

**Dungzersetzende Pilze** wandeln Kot in Humus um. Sie spielen in einer ökologischen Kreislaufwirtschaft beim Humusaufbau eine wichtige Rolle. Ein schönes Beispiel für einen solchen Pilz ist der Wildscheinkot-Zärtling (*Psathyrella berulinensis*), der nur auf Wildschweinkot wächst (LÜDER 2015; SCHWANTES 1996).



Abb. 12: Ein Braunfäuleerreger zersetzt einen Baumstamm

### 3.5.3 Pilze als Parasiten

DÖRFELT & JESCHKE (2001) definieren Parasitismus als Zusammenleben zweier Organismen mit einseitig vorteilhaften Stoffaustausch. Ein Parasit entzieht einem lebenden Wirt also Nährstoffe und nutzt sie für sich. Wo liegt die Grenze zwischen Parasiten und Saprobionten? Der Zunderschwamm (*Fomes fomentarius*) befällt zu Beginn seines Lebens lebendige *Laubbäume*, parasitiert ihn und bringt ihn zum Absterben. Nach dem Tod des Baumes lebt er im Holz als Saprobiont weiter (LÜDER 2015). Meistens werden solche Bäume befallen, die durch verschiedene Faktoren gestresst sind. Solche Faktoren sind z. B. das Alter, die Nähe zu anderen Bäumen, Trockenheit, unnatürlicher Standort u. v. m. (LÜDER 2015).

Intensive Land- und Forstwirtschaft, vor allem in Form von Monokulturen und intensiver Düngung bei gleichzeitig geringem Bodenleben sind besonders anfällig für parasitische Pilze, vor allem Rost-, Brand- und Mehltaupilze. 70 % der bekannten Pflanzenkrankheiten werden von Pilzen verursacht (CARRIS et al. 2012). Die Sporen werden durch Vektoren verbreitet und besitzen häufig angepasste Hilfsmittel, mit denen sich die Sporen an Oberflächen ihres potenziellen Wirtes festhalten können (DOEHLMANN et al. 2018). Bei günstigen Bedingungen keimen die Sporen aus

und Hyphen wachsen dem Wirt entgegen (DOEHLMANN et al. 2018). Durch spezielle Haftungsorgane (Haustorien), die einen hohen osmotischen Druck auf die Wirtszelle ausüben, kann der Pilz in die Wirtszellen eindringen.

Der Einfluss von pilzlichen Parasiten auf die Landwirtschaft ist immens, sowohl in der Vergangenheit, als auch in der Gegenwart: Laut MÜLLER & LÖFFLER (1992) belaufen sich die jährlichen Schäden von Krankheiten auf Kulturpflanzen im Milliardenbereich. 10-20% der Ernte geht durch solche Krankheiten verloren. Aber auch Tiere und Menschen können von parasitischen Pilzen befallen werden. Ein bekanntes Beispiel ist der Chitridpilz (*Batrachochytrium dendrobatidis*), der lebende Amphibien befällt und häufig zum Tod der Tiere führt und damit das weltweite Amphibiensterben mit verstärkt (BOURKE et al. 2010). Laut MÜLLER & LÖFFLER (1992) leiden 20% der Bevölkerung unter Fußmykosen. Pilze spielen als Krankheitserreger bei Tieren aber eine geringere Rolle als bei Pflanzen. SCHWANTES (1996) gibt als Grund den eher sauren pH-Wert in Pflanzen, im Gegensatz zum eher basischen Milieu bei Tieren. Bei Tieren spielen Bakterien als Krankheitserreger die größere Rolle (SCHWANTES 1996). Pilze können auch andere Pilze parasitieren: Zum Beispiel parasitiert der Pilz *Ampelomyces quisqualis* auf dem Eichen-Mehltau (*Microsphaera alphitoides*), der selbst auf Eichen (*Quercus*) parasitiert (SCHWANTES 1996).

### **3.6 Meilensteine der historischen Bedeutung von Pilzen für den Menschen**

In diesem Kapitel sollen Schlüsselereignisse vorgestellt werden, wie Pilze das Leben und die Entwicklung des modernen Menschen beeinflusst haben. Dieses Kapitel gibt nur einen kleinen Überblick. Umfangreiche Informationen finden sich in DÖRFELT & HEKLAU (1998).

#### **3.6.1 Steinzeit und Antike**

In der Alt- und Mittelsteinzeit lebten der moderne Mensch und seine phylogenetischen Vorläufer ausschließlich als Jäger und Sammler (BURDA et al. 2014). Vor allem das Sammeln von Früchten, Beeren, Wurzeln, kleinen Insekten aber auch von Pilzen spielte die zentrale Rolle für die menschliche Ernährung. Sowohl *Homo sapiens* als auch *Homo neanderthalensis* ernährten sich regional und saisonal. Im Sommer und Herbst war der Anteil der pilz- und pflanzlichen Nahrung wahrscheinlich relativ hoch (SENCKENBERGER FORSCHUNGSINSTITUT, 2011). Der Mensch machte sich nach und nach auch andere Eigenschaften von Pilzen, wie beispielsweise Heilwirkungen oder den Transport von Glut, zunutze (PEINTNER & PÖDER 2000) (siehe Ötzi in Kap 2). Eine

bedeutsame Rolle nimmt die alkoholische Gärung der Hefepilze ein. Schon die Sumerer und Babylonier nutzen sie vor 8000 Jahren, um ein bierähnliches Getränk herzustellen (SCHWANTES 1996). Wein wird durch von Hefen vergorenem Traubensaft hergestellt und weist ebenfalls eine 8000 Jahre alte Tradition auf (MC GOVERN et al. 2017). Auch beim Backen von Brot oder Kuchen, spielt die Bäckerhefe (*Sacheromyces cerevisiae*) eine wichtige Rolle in Vergangenheit und Gegenwart (MONTAG 2018, SCHWANTES 1996). Pilzkrankheiten, zum Beispiel verursacht durch den Getreideschwarzrost (*Puccinia graminis*), konnten dagegen größere Ernteschäden hervorrufen (CARRIS ET AL. 2012).

### **3.6.2 Mittelalter und Neuzeit**

Im Mittelalter und in der frühen Neuzeit traten Pilze hauptsächlich negativ in Erscheinung. Pilzvergiftungen, verursacht durch das Mutterkorn (*Claviceps purpurea*) kostete die Leben zehntausender Menschen (RAFF 2018, DOEHLMANN et al. 2018). Dieser Schlauchpilz parasitiert auf Süßgräsern, einschließlich der Nutzpflanze Roggen (*Secale cereale*). Durch den Verzehr von verunreinigtem Roggenmehl werden die peripheren Blutgefäße geschädigt, was sich in absterbenden Körperteilen, zum Beispiel Fingern, Zehen und Ohren äußert.

In der Neuzeit nahm das Wissen über die Pilze immer mehr zu, auch aufgrund der Erfindung des Mikroskops (SCHWANTES 1996). Als Wegbereiter der Mykologie sollte man Pier Antonio Micheli (1679-1737), Jakob Christian Schaeffer (1718-1790), Elias Magnus Fries (1794-1878) und Louis Pasteur (1822-1895) nennen.

### **3.6.3 Neuere Entwicklungen**

Einen medizinischen Nutzen hat der Mensch von Antibiotika, einem Stoffwechselprodukt eines Pilzes: Das erste Antibiotikum, 1929 entdeckt von Alexander Flemming bedeutete eine Revolution in der Medizin. Zum ersten Mal konnte man einen Stoff, mit dem Bakterien abgetötet werden konnte. Flemming benannte das Antibiotikum nach dem Pinselschimmel (*Penicillium*), aus dem er es isoliert hatte: Penizillin (BRESINSKY & BRESINSKY 2018, SCHWANTES 1996). Heute kennen und nutzen die Menschen eine ganze Reihe von weiteren Antibiotika (BRESINSKY & BRESINSKY 2018). WANG et al. (2018) betonen die Bedeutung der Pilze für den Ausbau von zellbiologischem, evolutionärem und entwicklungsbiologischen Wissens in der Vergangenheit und bezeichnen Pilze als zukünftige Zugpferde für den Ausbau von genetischem Wissen. Pilze eignen sich für diese Forschungen, weil sie schnell wachsen, Tochtergenerationen zügig entstehen und eukaryotische Organismen sind. Einige Arten, wie z. B. *Neurospora crassa*, lassen sich unter Laborbedingungen

gut kultivieren. Die Bedeutsamkeit der Art ist daran erkennbar, dass ihr Genom seit 2003 entschlüsselt ist (GALAGAN et al. 2003). Eine bedeutende Aufgabe kommt Pilzen bei der Fermentation von Lebensmitteln zu. Viele Käsesorten, Z. B. Camembert, Brie, Gorgonzola und Limburger, aber auch bei Salami und Kefir sind ein Zwischen- bzw. Endprodukt bestimmter Pilze (SCHWANTES 1996). Auch andere Industriezweige entdecken Pilze für sich: So stellt z. B. das amerikanische Unternehmen Ecovative Myzelschaumstoff als Alternative zum gewöhnlichen Schaumstoff aus Plastik her (2018). Dieser Myzelschaumstoff kann für biologisch abbaubare Verpackungen, Füllungen von Möbelstücken und vieles mehr benutzt werden.

### **3.7 Speisepilze, ungenießbare Pilze, Pilzgifte und Hinweise für den Umgang mit Pilzen**

Dörfelt & Jeschke (2001) definieren Speisepilze als Basidio- und Ascomyceten, die für die menschliche Ernährung geeignet sind. Für Anfänger sind Röhrlinge und Sprödblätler die beste Wahl, da es unter diesen keine tödlich giftige Arten gibt und giftige Vertreter relativ selten sind (LÜDER 2015). Viele Bestimmungsbücher wie z. B. GERHART (2014) oder LÜDER (2015) geben einen Überblick über Speisepilze. Von diesen abgegrenzt werden ungenießbare Pilze, die sich nicht für die menschliche Ernährung eignen (LÜDER 2015). Darunter fallen Eigenschaften wie die harte Konsistenz eines Porlings oder der scharfe Geschmack eines Milchlings (*Lactarius* sp.). Als Giftpilze gelten solche Pilze, deren Verzehr gesundheitliche Schäden beim Menschen hervorrufen kann. Die allermeisten Pilzgifte wirken jedoch erst, wenn sie sich im Inneren des Körpers befinden. Es gibt in Deutschland keine Pilze, die auf Hautkontakt Gifte abgeben. Es gibt kein gemeinsames Merkmal der tödlich giftigen Pilze. Nur durch das **Erkennen der Art** kann ein Giftpilz als solcher erkannt werden (LÜDER 2015). Die wichtigsten Giftwirkungen von Pilzen sollen nur kurz erwähnt werden, genauere Krankheitsverläufe schildert LÜDER (2015).

Das Phalloides-Syndrom äußert sich in einer Giftwirkung auf die Leber. Es ist die Pilzvergiftung, die die meisten tödlich Vergiftungen verursachen. Der Grüne Knollenblätterpilz (*Amanita phalloides*) ist die häufigste Art dieser Gruppe, der die Giftstoffe in sehr hoher Konzentration enthält. Laut LÜDER (2015) lassen sich 90% aller tödlichen Pilzvergiftungen auf diesen Pilz zurückführen. Weitere Arten, die diese Giftstoffe enthalten sind *A. virosa* und *A. verna*, die oft als

weiße Knollenblätterpilze zusammengefasst werden, der Gift-Häubling (*Galerina marginata*) und einige Schirmlinge (*Lepiota* sp.) (LÜDER 2015).

Beim Orellanus-Syndrom wirken die Giftstoffe auf die Nieren. Der Spitzgebuckelte Raukopf (*Cortinarius rubellus*) ist der häufigste Vertreter dieser Gattung. Nach dem Verzehr von 50-100g Frischpilz ist eine tödliche Dosis erreicht. Unbehandelt endet diese Krankheit tödlich, denn die Nieren werden chronisch geschädigt. Durch die Behandlung mit Dialyse und Spendernieren ist die Todesrate gesunken, dennoch sind Geschädigte durch die notwendige Dialyse im Alltag sehr eingeschränkt (LÜDER 2015).

Das Pantherina- und das Muskarin-Syndrom wirken auf das Nervensystem und die Verdauungsorgane. Das Pantherina-Syndrom wird z. B. durch den Fliegenpilz (*Amanita muscaria*) und den Pantherpilz (*A. pantherina*) hervorgerufen und äußert sich durch Bauchschmerzen, Erbrechen und Durchfall aber auch Schwindel, Gehstörungen und Speichelfluss. Da beide Pilze auch bewusstseinsweiternde Stoffe enthalten, weisen Betroffene entweder eine erhöhte Fröhlichkeit oder eine erhöhte Niedergeschlagenheit z. T. mit Wutausbrüchen auf.

Das Muskarin-Syndrom kennzeichnet sich durch stark erhöhte Schweißausbrüche, Kopfschmerzen, erniedrigten Blutdruck und langsameren Herzschlag in Kombination mit Magen-Darm Beschwerden. Das Gift ist in vielen Risspilzen (*Inocybe* spec.) und in einigen Helmlingen (*Mycena* spec.) enthalten (LÜDER 2015).

Viele Pilze sind Magen-Darm giftig, ihre Wirkung wird unter dem Gastrointestinales-Syndrom zusammengefasst. Oft treten hier Durchfälle und Erbrechen kurz nach dem Verzehr der Pilze auf, die aber ohne Folgeschäden meist nach 1-2 Tagen wieder zurückgehen. Verursacht wird es z. B. durch Satans-Röhrling (*Boletus satanans*), Karbol-Champignon (*Agaricus xanthoderma*) und Dünnschaligen Kartoffelbovist (*Scleroderma verrucosum*) (LÜDER 2015).

Die meisten Pilzvergiftungen werden jedoch durch eigentlich essbare Arten verursacht. Entweder werden die Pilze nicht lange genug erhitzt, verderben durch zu lange Lagerung, werden zu fettig zubereitet oder der Körper reagiert mit physischen Beschwerden wie Erbrechen auf eine psychische Angst, eine eingebildete Pilzvergiftung.

## 4 Fazit und Ausblick

Die Arbeit konnte einen tieferen fachwissenschaftlichen Blick auf das Reich der Pilze werfen, um Hobbymykolog\*Innen zu informieren und einen aktuellen Einblick in die Pilzforschung der letzten

Jahre zu geben. Der Schwerpunkt der Inhalte lag bei der Abteilung der Basidiomycota. Sie soll eine Brücke schlagen zwischen Hobbymykolog\*Innen und Profi-Mykologen. Interessant wären weitere Übersichtsarbeiten zu anderen Themen und Gruppen, z. B. zum Thema Ascomyceten, Myxomyceten, Sequenzierung und die Auswirkungen des Klimawandels speziell auf unsere Funga.

## 5 Danksagung & persönliche Stellungnahme

Dies ist der fachwissenschaftliche Teil meiner Bachelorarbeit mit dem Thema „Integration des Themas Pilze in den Grundschulunterricht“ - Herausforderungen und Chancen“. Ich habe sie etwas abgeändert und an die Zielgruppe DgFM-Mitglieder\*Innen angepasst. Geschrieben habe ich sie im Hitze-Klimawandel-Sommer 2018. Interessierte Leser\*Innen finden die komplette Arbeit mit fachdidaktischen Teil im Fachportal Pädagogik.

Ich möchte herzlich Dr. Kai Riess für die Betreuung damals danken. Ich möchte mich auch bei meinen Großeltern Magda und Herbert Schorr bedanken, mit denen ich schon als kleiner Junge in die Pilze ging und mich an die Natur herangeführt haben. Ich möchte auch meiner Freundin Merle bedanken, die beim Spaziergehen immer meinen Pilz-Suchblick ertragen muss und sich viel Pilzgeschwafel anhören muss. Zuletzt möchte ich mich bei Hans Halbwachs bedanken, dessen spannende Pilzforschung meine Arbeit bereicherte. Einen Gruß sende ich an meine (Pilz)Freunde Karl-Heinz-Johe, Armin Nilles, Hans-Werner Grass, Joshua Ferency, Julius Albert, David Niederer, Jonas Walter & Margrit Good.

Der Autor versichert, dass keine speziellen Genehmigungen für die Durchführung der Arbeit nötig waren. Die Arbeit wurde aus den Mitteln des Autors finanziert.

## 6 Literatur- und Abbildungsverzeichnis

ADL, S. M., SIMPSON, A. G. B., LANE, C. E., LUKEŠ, J., BASS, D., BOWSER, S. S., . . . SPIEGEL, F. W. (2012). The revised classification of eukaryotes. *The Journal of Eukaryotic Microbiology*, 59(5), 429–493.

- AINSWORTH, G. C., SUSSMAN, A. S. (Hg.). (1968). *The fungi: An advanced treatise*. New York: Academic Press.
- AUSTWICK, P. K.C. (1968). Effects of Adjustment to the Environment on Fungal Form. In G. C. Ainsworth A. Sussman (Hg.), *The fungi: An advanced treatise* (pp. 419–445). New York: Academic Press.
- BABIKOVA, Z., GILBERT, L., BRUCE, T. J. A., BIRKETT, M., CAULFIELD, J. C., WOODCOCK, C., . . . JOHNSON, D. Underground signals carried through common mycelial networks warn neighbouring plants of aphid attack. *Ecology Letters*, 16(7), 835–843.
- BÄSSLER, C., HEILMANN-CLAUSEN, J., KARASCH, P., BRANDL, R., HALBWACHS, H. (2015). Ectomycorrhizal fungi have larger fruit bodies than saprotrophic fungi. *Fungal Ecology*, 17, 205–212.
- BODDY, L. (Ed.). (2008). *British Mycological Society symposia series. Ecology of saprotrophic basidiomycetes* : Elsevier.
- BODDY, L., FRANKLAND, J. C., VAN WEST, P. (Hg.). (2008). *British Mycological Society Symposia Series : Ecology of Saprotrophic Basidiomycetes*: Academic Press.
- BORTENSCHLAGER, S., OEGGL, K. (Hg.). (2000). *The Iceman and his Natural Environment*. Vienna: Springer Vienna.
- BOURKE, J., MUTSCHMANN, F., OHST, T., ULMER, P., GUTSCHE, A., BUSSE, K., . . . BOEHME, W. (2010). Batrachochytrium dendrobatidis in Darwin's frog *Rhinoderma* spp. in Chile. *Diseases of Aquatic Organisms*, 92(2-3), 217–221.
- BREITENBACH, J. (Ed.). (2005). *Pilze der Schweiz: Beitrag zur Kenntnis der Pilzflora der Schweiz*. Luzern: Verl. Mykologia.
- BRESINSKY, A. (Ed.). (2009). *Rundgespräche der Kommission für Ökologie: Vol. 37. Ökologische Rolle von Pilzen: Rundgespräch am 23. März 2009 in München*. München: Pfeil.
- BRESINSKY, A., BRESINSKY M. (2018). Penicillin: Entdeckung eines antibiotisch wirksamen Heilmittels aus einem Pilz vor 90 Jahren. *Der Tintling*, 23(3), 7–10.
- BRUNDRETT, M. C. (2002). Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytologist*, 154(2), 275–304.
- BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (Ed.). (2010). *Biodiversität und Klima - Vernetzung der Akteure in Deutschland XII*.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT. (2013). Fläche der Baumartengruppen. URL:

bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE\_MASTER/content/bilder/diagramme/  
Flaeche\_der\_Baumartengruppe.jpg (12.7.2018)

- BURDA, H., BAYER, P., ZRZAVÝ, J. (2014). *Humanbiologie. Basics: Vol. 4130*. Stuttgart: Ulmer.
- CAMPBELL, N. A., REECE, J. B., KRATOCHWIL, A. (2011). *Biologie* (8., aktualisierte Aufl.). Pearson Studium - Biologie. München: Pearson Studium.
- CARLILE, M.J., WATKINSON, S. C., GOODAY, G. W. (2001). *The fungi* (2nd ed.). San Diego [etc.]: Academic Press.
- CARRIS, L. , LITTLE, C., STILES, C. (2012). Introduction to Fungi. *The Plant Health Instructor*.
- CLÉMENÇON, H. (1997). *Anatomie der Hymenomyceten: Eine Einführung in die Cytologie und Plectologie der Krustenpilze, Porlinge, Keulenpilze, Leistlinge, Blätterpilze und Röhrlinge = Anatomy of the Hymenomycetes*. Teufen AR: Komm. F. Flück-Wirth.
- DEACON, J. W. (2006). *Fungal Biology* (4th ed.). Malden: Blackwell Publishers.
- DEIGELE, C. (Ed.). (2016). *Rundgespräche Forum Ökologie: Band 45. Die Sprache der Moleküle: Chemische Kommunikation in der Natur : Rundgespräch am 6. April 2016 in München*. München: Verlag Dr. Friedrich Pfeil.
- DITENGOU, F. A., MÜLLER, A., ROSENKRANZ, M., FELTEN, J., LASOK, H., VAN DOORN, M. M., . . . POLLE, A. (2015). Volatile signalling by sesquiterpenes from ectomycorrhizal fungi reprogrammes root architecture. *Nature Communications*, 6.
- DOEHLEMANN, G., ÖKMEIN, B., ZHU, W., SHARON, A. (2018). Plant Pathogenic Fungi. *Microbiology Spectrum*, 5(1).
- DÖRFELT, H., GÖRNER, H. (1989). *Die Welt der Pilze*. Frankfurt am Main, Thun: Verlag Harri Deutsch.
- DÖRFELT, H., HEKLAU, H. (1998). *Die Geschichte der Mykologie*. Schwäbisch-Gmünd: Einhorn-Verl. Dietenberger.
- DÖRFELT, H.; JESCHKE, H. (2001). Abb. 8 verschiedene Ornamentierungen von Pilzsporen.
- DÖRFELT, H., JETSCHKE, G. (2001). *Wörterbuch der Mycologie* (2. Aufl.). Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- EASON, W. R., NEWMAN, E. I. (1990). Rapid loss of phosphorus from dying ryegrass roots: the chemical components involved. *Oecologia*, 84(3), 359–361.
- ECOVATIVE. (2018). Home | Ecovative. URL: [ecovativedesign.com/](http://ecovativedesign.com/) (18.7.2018)

- EISSENSTAT, D. M. (1990). A comparison of phosphorus and nitrogen transfer between plants of different phosphorus status. *Oecologia*, 82(3), 342–347.
- GALAGAN, J., CALVO, S., BORKOVICH, K., SELKER, E., READ, N., JAFFE, D., . . . BIRREN, B. (2003). The genome sequence of the filamentous fungus *Neurospora crassa*. *Nature*, 422(6934), 859.
- GERHARDT, E. (2014). *Der große BLV-Pilzführer für unterwegs: 1200 Arten* (Neuausg., 6., durchges. Aufl.). München: BLV.
- GIOVANNETTI, M., AVIO, L., FORTUNA, P., PELLEGRINO, E., SBRANA, C., STRANI, P. (2006). At the Root of the Wood Wide Web. *Plant Signaling & Behavior*, 1(1), 1–5.
- GORZELAK, M. A., ASAY, A. K., PICKLES, B. J., SIMARD, S. W. (2015). Inter-plant communication through mycorrhizal networks mediates complex adaptive behaviour in plant communities. *AoB PLANTS*, 7.
- GREGORY, P. H. (1973). *The microbiology of the atmosphere* (2nd ed.). London: L. Hill.
- GREULING, H. (2011). Rohstoffe: Am Phosphor hängt das Schicksal der Menschheit - WELT. URL: [welt.de/dieweltbewegen/article13585089/Am-Phosphor-haengt-das-Schicksal-der-Menschheit.html](http://welt.de/dieweltbewegen/article13585089/Am-Phosphor-haengt-das-Schicksal-der-Menschheit.html) (26.7.2018)
- GRIFFITH, G., RODERICK, K. (2008). Chapter 15 Saprotrophic basidiomycetes in grasslands: Distribution and function. In L. Boddy, J. C. Frankland, P. van West (Hg.), *British Mycological Society Symposia Series : Ecology of Saprotrophic Basidiomycetes* (pp. 277–299). Academic Press.
- HALBWACHS, H. (2017). Wirtsbeziehungen - Ektomykorrhizapilze und ihre Symbiosepartner. *Zeitschrift Für Mykologie*, 83(2), 349–356.
- HALBWACHS, H., BÄSSLER, C. Abb. 2 Struktur und Funktion von Basidiomyceten-Fruchtkörpern: Hängt der Wachstumsverlauf der Ektomykorrhizapilze vom Wirtsverhalten ab? Messmethoden und erste Ergebnisse.
- HALBWACHS, H., BÄSSLER, C. (2012). Hängt der Wachstumsverlauf der Ektomykorrhizapilze vom Wirtsverhalten ab? Messmethoden und erste Ergebnisse. *Zeitschrift Für Mykologie*, 78(211-223).
- HALBWACHS, H., BÄSSLER, C. (2015). Abb. 10 Ontogenese eines Basidiomyceten: Gone with the wind – a review on basidiospores of malellate agarics.
- HALBWACHS, H., BÄSSLER, C. (2015). Gone with the wind – a review on basidiospores of lamellate agarics. *Mycosphere*, 6(1), 78–112.

- HALBWACHS, H., SIMMEL, J., BÄSSLER, C. (2016). Tales and mysteries of fungal fruiting: How morphological and physiological traits affect a pileate lifestyle. *Fungal Biology Reviews*, 30(2), 36–61.
- HASSAN, S., MATHESIUS, U. (2012). The role of flavonoids in root-rhizosphere signalling: opportunities and challenges for improving plant-microbe interactions. *Journal of Experimental Botany*, 63(9), 3429–3444.
- HAWKSWORTH, D. L., LÜCKING, R. (2017). Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species. *Microbiology Spectrum*, 5(4).
- HIBBETT, D. S., BINDER, M., BISCHOFF, J. F., BLACKWELL, M., CANNON, P. F., ERIKSSON, O. E., . . . ZHANG, N. (2007). A higher-level phylogenetic classification of the Fungi. *Mycological Research*, 111(Pt 5), 509–547.
- HIBBETT, D. S., GRIMALDI, D., DONOGHUE, M. J. (1995). Cretaceous mushrooms in amber. *Nature*, 377(6549), 487.
- HORTON, T. R. (Ed.). (2015). *Ecological Studies. Mycorrhizal Networks*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- INGOLD, C. T. (1965). *Spore liberation*,. Oxford: Clarendon Press.
- JENNINGS, D. H. (1999). *Fungal biology : understanding the fungal lifestyle* (2nd ed.). Oxford UK, New York NY: BIOS Springer.
- KAMEL, L., KELLER-PEARSON, M., ROUX, C., ANÉ, J. (2016). Biology and evolution of arbuscular mycorrhizal symbiosis in the light of genomics. *The New Phytologist*, 213(2), 531–536.
- KIRK, P. M., CANNON, P. F., MINTER, D. W., STALPERS, J. A. (2011). *Ainsworth & Bisby's Dictionary of the Fungi*, (10th edition): Cabi Publishing.
- KLEIN, T., SIEGWOLF, R. T. W., KÖRNER, C. (2016). Belowground carbon trade among trees in a temperate forest. *Science*, 352(6283), 342–344.
- KNUDSEN, H., VESTERHOLT, J. (2012). *Funga nordica: Agaricoid, boletoid, clavarioid, cyphelloid genera and gastroid genera*. (2. ed.). Copenhagen: Nordsvamp.
- KOTHE, E. (2016). Signalmoleküle in der Mykorrhizasymbiose. In C. Deigele (Ed.), *Rundgespräche Forum Ökologie: Band 45. Die Sprache der Moleküle: Chemische Kommunikation in der Natur : Rundgespräch am 6. April 2016 in München* (Vol. 45, pp. 93–103). München: Verlag Dr. Friedrich Pfeil.
- KRÄNZLIN, F. (2005). Russulaceae: Milchlinge, Täublinge. In J. Breitenbach (Ed.), *Pilze der Schweiz: Beitrag zur Kenntnis der Pilzflora der Schweiz*. Luzern: Verl. Mykologia.

- KUTSCHERA, W., GOLSER, R., PRILLER, A., ROM, W., STEIER, P., WILD, E., . . . OEGGEL, K. (2000). Dario-carbon dating of equipment from the Iceman. In S. Bortenschlager K. Oeggel (Hg.), *The Iceman and his Natural Environment* (pp. 1–10). Vienna: Springer Vienna.
- KUYPER, T., & KIERS, E. (2014). The danger of mycorrhizal traps? *The New Phytologist*, 203(2), 352–354.
- LINDAHL, B. D., TUNLID, A. (2015). Ectomycorrhizal fungi – potential organic matter decomposers, yet not saprotrophs. *New Phytologist*, 205(4), 1443–1447.
- LINDAU, G., ULBRICH, E. (1928). Abb. 6: Teil und Gesamthülle bei Basidiocarpn.
- LINDAU, G., ULBRICH, E. (1928). *Die höheren Pilze, Basidiomycetes, mit Ausschluss der Brand- und Rostpilze* (Vol. 1). Berlin: Verlag von Julius Springer.
- LÜDER, R. (2015). *Grundkurs Pilzbestimmung: Eine Praxisanleitung für Anfänger und Fortgeschrittene* (4., korrigierte und aktualisierte Auflage). *Quelle-&-Meyer-Bestimmungsbücher*. Wiebelsheim: Quelle & Meyer Verlag.
- LÜDER, R. (2018). Wood wide web - Gemeinsam geht es besser. *Der Tintling*, 23(2), 4–8.
- MCGOVERN, P., JALABADZE, M., BATIUK, S., CALLAHAN, M., SMITH, K., HALL, G. R., . . . LORDKIPANIDZE, D. (2017). Early Neolithic wine of Georgia in the South Caucasus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(48), E10309-E10318.
- MONTAG, K. (2018). Heilpilz Bäckerhefe (*Saccharomyces cerevisiae*). *Der Tintling*, 23(3), 89.
- MOORE, D. (1998). *Fungal morphogenesis. Developmental and cell biology series: Vol. 35*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MOORE, D., GANGE, A. C., GANGE, E. G., BODDY, L. (2008). Chapter 5 Fruit bodies: Their production and development in relation to environment. In L. Boddy (Ed.), *British Mycological Society symposia series. Ecology of saprotrophic basidiomycetes (9780123741851)* (Vol. 28, pp. 79–103). Elsevier.
- MOORE, D., TRINCI, A. P. J., ROBSON, G. D. (2013). *21st century guidebook to fungi* (Repr). Cambridge: Cambridge University Press.
- MÜLLER, E., LÖFFLER, W. (1992). *Mykologie: Grundriß für Naturwissenschaftler und Mediziner ; 31 Tabellen* (5., durchges. Aufl.). *Flexibles Taschenbuch BIO*. Stuttgart: Thieme.
- MURATI, E., REXHEPI, B. (2018). EDIBLE AND POISONOUS MUSHROOMS. *ECOTEC - Journal of Science, Enviroment and Technology*, 1(1), 42–44.

- NAADEM, S. M., KHAN M. Y., WAQAS, M. R., BINYAMIN, R., AKHTAR, S., ZAHIR, Z. A. (2017). Arbuscular Mycorrhizas: An Overview. In Q. WU (Ed.), *ARBUSCULAR MYCORRHIZAS AND STRESS TOLERANCE OF PLANTS* (1st ed.). [S.l.]: SPRINGER VERLAG, SINGAPOR.
- NENTWIG, W., BACHER, S., BRANDL, R. (2017). *Ökologie kompakt* (4., korrigierte Auflage). *Lehrbuch*. Berlin: Springer Spektrum.
- NORROS, V., RANNIK, Ü., HUSSEIN, T., PETÄJÄ, T., VESALA, T., OVASKAINEN, O. (2014). Do small spores disperse further than large spores? *Ecology* 95 (6), 1612-1621.
- OBERWINKLER, F. (2012). Evolutionary trends in Basidiomycota. *STAPFIA*, 96, 45–104.
- PEGLER, D. N., PIEARCE, G. D. (1980). The Edible Mushrooms of Zambia. *Kew Bulletin*, 35(3), 475.
- PEINTNER, U., PÖDER, R. (2000). Ethnomycological remarks on the Iceman's fungi. In S. Bortenschlager, K. Oegg (Hg.), *The Iceman and his Natural Environment* (pp. 143–150). Vienna: Springer Vienna.
- POWELL, J. R., RILLIG, M. C. (2018). Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi and ecosystem function. *The New Phytologist*.
- ROY-BOLDUC, A., LALIBERTÉ, E., HIJRI, M. High richness of ectomycorrhizal fungi and low host specificity in a coastal sand dune ecosystem revealed by network analysis. *Ecology and Evolution*, 6(1), 349–362.
- SCHIRKONYER U., ROTHE G. (2010). Anpassung symbiotischer Pilze an Waldbäume - Stoffwechsel und Klima. In Bundesamt für Naturschutz (Ed.), *Biodiversität und Klima - Vernetzung der Akteure in Deutschland XII* (pp. 91–92).
- SCHÜSSLER, A. (2004). Das fünfte Pilz-Phylum: Die Glomeromycota. *BIOspektrum*, 10(6), 741–742.
- SCHÜSSLER, A. (2009). Struktur, Funktion und Ökologie der arbuskulären Mykorrhiza. In A. Bresinsky (Ed.), *Rundgespräche der Kommission für Ökologie: Vol. 37. Ökologische Rolle von Pilzen: Rundgespräch am 23. März 2009 in München* (Vol. 37). München: Pfeil.
- SCHWANTES, H. O. (1996). *Biologie der Pilze: Eine Einführung in die angewandte Mykologie ; 29 Tabellen. Uni-Taschenbücher: Vol. 1871*. Stuttgart: Ulmer.
- SEILER, M. (2018). Abb. 1: Ein Pilzmyzel durchzieht ein Holzbrett
- SEILER, M. (2018). Abb. 3: Lamellen des Gemeinen Weiß-Täublings (*Russula delica*)
- SEILER, M. (2018). Abb. 4: Röhren des Wurzelnden Bitter-Röhlings (*Caboboletus radicans*)

- SEILER, M. (2018). Abb. 5 Oberflächenvergrößerung durch Stacheln beim Igel-Stachelbart (*Hericium erinaceus*)
- SEILER, M. (2018) Abb. 7 Die Lamellen dieses Pilzes sind teilweise noch von einer Teilhülle, hier ein Schleier, bedeckt
- SEILER, M. (2018) Abb. 9 Das rosabräunliche Sporenpulver eines Dachpilzes
- SEILER, M. (2017). Abb. 11: Ein Braunfäuleerreger zersetzt einen Baumstamm.
- SEILER, M. (2017). Abb. 12: von Weißfäuleerregern zersetztes Holz.
- SENCKENBERGER FORSCHUNGSINSTITUT. Neandertaler-Ernährung: Regionale Vielfalt statt immer nur Fleisch. URL: [spektrum.de/news/regionale-vielfalt-statt-immer-nur-fleisch/1072015](http://spektrum.de/news/regionale-vielfalt-statt-immer-nur-fleisch/1072015) (26.07.2018)
- SHARMA, R. (2017). Ectomycorrhizal Mushrooms: Their Diversity, Ecology and Practical Applications. In A. Varma, R. Prasad, N. Tuteja (Hg.), *Mycorrhiza - Function, Diversity, State of the Art* (pp. 99–131). Cham: Springer International Publishing.
- SIMARD, S., ASAY, A., BEILER, K., BINGHAM, M., DESLIPPE, J., HE, X., . . . TESTE, F. (2015). Resource Transfer Between Plants Through Ectomycorrhizal Fungal Networks. In T. R. Horton (Ed.), *Ecological Studies. Mycorrhizal Networks* (Vol. 224, pp. 133–176). Dordrecht: Springer Netherlands.
- SMITH, S. E., READ, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis* (3rd ed.). Amsterdam: Academic Press.
- SONG, Y. Y., ZENG, R. S., XU, J. F., LI, J., SHEN, X., YIHDEGO, W. G. (2010). Interplant Communication of Tomato Plants through Underground Common Mycorrhizal Networks. *PLOS ONE*, 5(10).
- TEDERSOO, L., SÁNCHEZ-RAMÍREZ, S., KÖLJALG, U., BAHRAM, M., DÖRING, M., SCHIGEL, D., . . . ABARENKOV, K. (2018). High-level classification of the Fungi and a tool for evolutionary ecological analyses. *Fungal Diversity*, 90(1), 135–159.
- TOULOSS, R. E. (2005). Amanita—distribution in the Americas with comparison to eastern and southern Asia and notes on spore character variation with latitude and ecology. *MYCOTAXON*, 93, 189–231.
- VARMA, A., PRASAD, R., TUTEJA, N. (Hg.). (2017). *Mycorrhiza - Function, Diversity, State of the Art*. Cham: Springer International Publishing.
- WANG, Z., GUDIBANDA, A., UGWUOWO, U., TRAIL, F., TOWNSEND, J. (2018). Using evolutionary genomics, transcriptomics, and systems biology to reveal gene networks underlying fungal development. *Fungal Biology Reviews*. Advance online publication.

WEISS, M., WALLER, F., ZUCCARO, A., SELOSSE, M. (2016). Sebaciales - one thousand and one interactions with land plants. *The New Phytologist*, 211(1), 20–40.

WÖSTEN, H. A.B., WESSELS, J. G.H. (1997). Hydrophobins, from molecular structure to multiple functions in fungal development. *Mycoscience*, 38(3), 363–374.

WU, Q. (Ed.). (2017). *ARBUSCULAR MYCORRHIZAS AND STRESS TOLERANCE OF PLANTS* (1ST ED. 2017). [S.l.]: SPRINGER VERLAG, SINGAPOR.

XU, Y., VINAS, M., ALSARRAG, A., SU, L., PFOHL, K., ROHLFS, M., . . . KARLOVSKY, P. (2019). Bis-naphthopyrone pigments protect filamentous ascomycetes from a wide range of predators. *Nature Communications*, 10(1), 3579. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11377-5>

Über den Autor:

Marius Seiler ist Jahrgang 1995, studiert Grundschulpädagogik mit den Fächern Deutsch, Biologie und katholische Theologie an der Universität Landau (Pfalz). Er ist Hobbymykologe mit besonderen Interessenschwerpunkt auf Nachwuchsarbeit, Mykorrhiza, Ökologie, Nachhaltigkeit, Röhrlingen, Champignons und Täublingen.

