

# MYKOLOGIE

## ZUSAMMENFASSUNG

### ÜBERSICHT

#### PHYLOGENIE DER PILZE

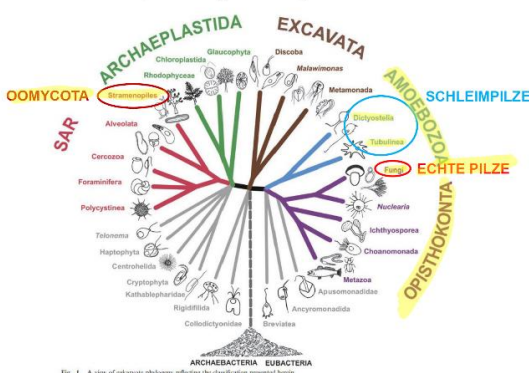
**3 Domains of life:** EUBACTERIA, ARCHAEA, EUKARYOTES

**5 Kingdoms of life:** EUBACTERIA, ARCHAEA, Plants, Animals, Fungi

- ➔ Pilze bilden das **5. Reich** (5th Kingdom) des Lebens
- ➔ Sind **am nächsten mit den Tieren verwandt**
- ➔ Das Reich der Pilze umfasst viele verschiedene Phyla und Subphyla
- ➔ Die phylogenetisch ältesten Pilzphyla sind die **aquatischen Pilze mit motilen Sporen**
- ➔ Schleimpilze gehören nicht zu den echten Pilzen
- ➔ Durch **Differenzierung** (erfordert Septen!) konnten immer **spezialisiertere Pilze und Zellen** entstehen
- ➔ Pilzgenome weisen deutlich weniger nicht-codierende Regionen als Pflanzen und Tiere auf (höhere Gendichte)
- ➔ Durch die hohe Gendichte werden zwar die **Rekombinationsmöglichkeiten verringert**, aber gleichzeitig die **Replikation beschleunigt**.
- ➔ Pilze können filamentös sein (mehrzellig) oder einzellige Hefen (s. *cerevisae*) bilden
- ➔ Hefen haben weniger Gene als filamentöse Pilze. Sie verzichten auf Differenzierung und setzen stattdessen auf schnelle und häufige Reproduktion (e.g. durch binäre Fission oder Knospung).

### Phylogenie der Pilze

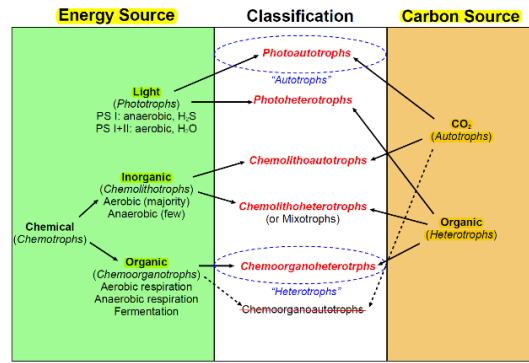
Unterteilung der Eukaryonten



### ERNÄHRUNG

#### Chemoheterotrophe Ernährung

- ➔ Absorptive (osmotrophe) Ernährungsweise
- ➔ Abbau der Nahrung ausserhalb des Organismus
- ➔ Sekretion von Exoenzymen welche komplexen Nahrungsmoleküle zu kleineren Molekülen abbauen
- ➔ Aufnahme von kleineren Molekülen durch **Zellwand und Zellmembran** (Transporter)



➔ Sind **bezüglich C-Quellen:**

- *Saprophyten*=Zersetzer
- *Mutualisten* (z.B. *Mykorrhiza*)
- *Parasiten* (*antagonistisch*)

➔ Pilze **leben direkt auf ihrem Substrat** (zwingend erforderlich, da sie **immobil** sind)

➔ Hauptproblem ist **Kompetition** um Nährstoffe mit anderen Organismen ähnlicher Ernährungsstrategien

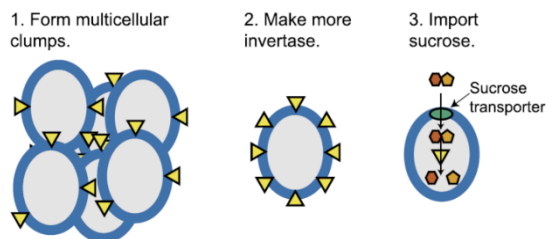
➔ Pilze können auch in **Kollaboration** mit anderen Organismen stehen (bezgl. Nahrungsbeschaffung): z.B. besitzen sie Kanäle für die Aufnahme von Nahrungsbestandteilen, die von anderen Organismen zersetzt werden

#### Ernährungsweise beeinflusst die Körperform der Pilze

- ➔ Hyphe erlaubt optimale Aufnahme von Nahrungsbestandteilen (grosse Oberfläche, Ein- und Durchdringen des Substrates)
- ➔ Verzweigte Hyphen bilden ein Netzwerk (Myzel) für den Transport von Nährstoffen und Information
- ➔ Es gibt Pilze mit Septen und solche ohne

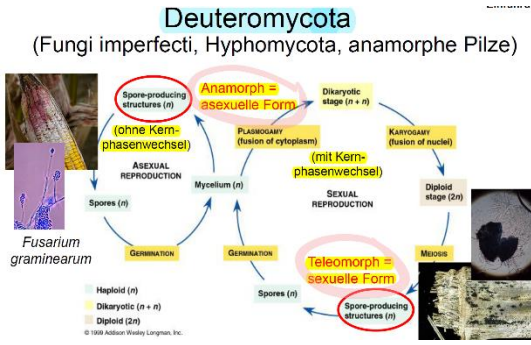
### OSMOTROPHE ERNÄHRUNG UND MULTIZELLULARITÄT

In **nahrungsarmer Umgebung** greifen Pilze auf unterschiedliche Strategien zurück, um ihr Überleben zu sichern:



1. **Multizellularität:** Formung eines Zellhaufens, sodass Nahrungsbestandteile konzentriert angesammelt und ausgetauscht werden können  
 ⇒ *Kooperativität, Biofilme usw.*  
 ⇒ *Hefen bilden dann sog. Pseudohyphen, werden also auch filamentös*
2. **Stärkere Produktion von** hydrolytischen Enzymen und damit intensivere Nahrungsaufnahme
3. **Sucrose importer** an Zelloberfläche befördern

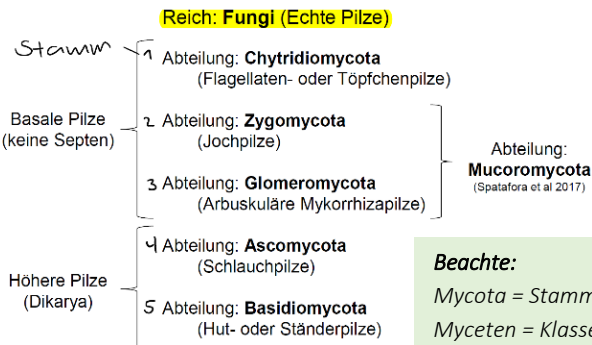
VERBREITUNG UND VERMEHRUNG



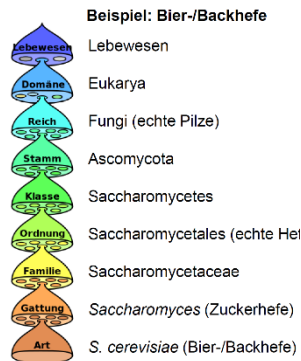
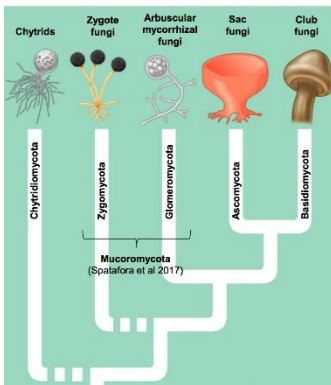
- ➔ Spore als Verbreitungs- und Vermehrungseinheit
- ➔ werden auf vielfältige Arten (Teilung, Sprossung, etc. -> sexuell/asexuell) gebildet
- ➔ Art der sexuellen Sporenbildung als grundlegendes taxonomisches Merkmal der Systematik
- ➔ **Deuteromyceten** (oder *fungi imperfecti*) = Pilze ohne (bekanntes) sexuelles Stadium

SYSTEMATIK DER PILZE

- **Basale Pilze:** mikroskopisch klein, keine Fruchtkörper oder Septen
- **Höhere Pilze (Dikarya):** besitzen Heterokaryon (Mehrkernstadium), makroskopisch erkennbar, Fruchtkörperbildung, häufig Septierung



**Beachte:**  
Mycota = Stammname,  
Myceten = Klassenname!

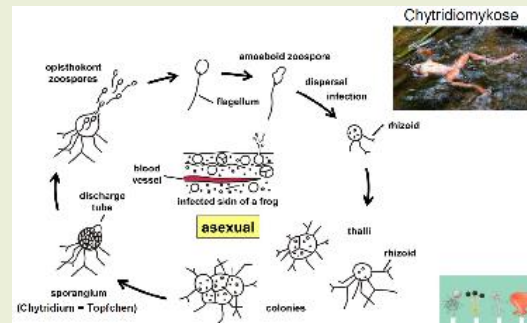


Take home messages

- Pilze bilden phylogenetisch ein eigenes Reich und sind näher verwandt mit den Tieren als den Pflanzen
- Pilze sind chemo-organo-heterotrophe Organismen, die sich durch Absorption (Osmotrophie) ernähren
- Pilze beziehen den reduzierten Kohlenstoff entweder als Saprophyten oder als (antagonistische oder mutualistische) Symbionten
- Pilze treten als einzellige Hefen oder als vielzellige Myzelien auf
- Pilze verbreiten und vermehren sich durch Sporen

<b>Chytridiomycota</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ca. 1250 bekannte Spezies</li> <li>• phylogenetisch älteste Pilze</li> <li>• Saprophyten, Parasiten, Symbionten</li> <li>• Typisch: begeißelte Sporen (Zoosporen)</li> </ul>
<b>Zygomycota</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ca. 1350 bekannte Spezies</li> <li>• Schnell wachsende Schimmelpilze, Parasiten, Symbionten</li> <li>• Typisch: Sporangien und Zygo-sporen</li> </ul>
<b>Glomeromycota</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kleiner Stamm (275)</li> <li>• Symbionten -&gt; vesikulär-arbuskuläre Mykorrhiza</li> </ul>
<b>Ascomycota</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Im Wasser und auf dem Land</li> <li>• 87'000 (grösster Stamm)</li> <li>• Bildung von sexuellen Sporen im Askus</li> <li>• Aber auch asexuelle Sporen (Koni-dien)</li> <li>• Unterschiede Grössen und Komplexität: einzellige Hefen, Schimmelpilze oder komplexe fruchtkörperbildende Arten</li> </ul>
<b>Basidiomycota</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ca. 50'000</li> <li>• oft komplexe Reproduktionszyklen z.T. mit Wirtswechsel</li> <li>• Hutpilze aber auch pflanzenpathogene Rost- und Brandpilze</li> <li>• Typisch: Bildung von Basidiosporen im sexuellen Reproduktionszyklus</li> </ul>

CHYTRIDIOMYKOSE



Chytridien befallen die Haut von Amphibien und beeinträchtigen so deren **Gasaustausch, Immunsystem** und **andere Körperfunktionen**, indem die Haut verhornt und verdickt wird. Die Krankheit ist einer der Gründe für **globale Massensterben von Amphibien**.

Die Behandlung mit Fungiziden ist darum schwer, da die Pilze phylogenetisch sehr nah mit den Tieren verwandt sind und damit häufig auch der Wirt durch Bekämpfungsmittel Schaden nimmt.

**LEBENSSTIL DER PILZE:**

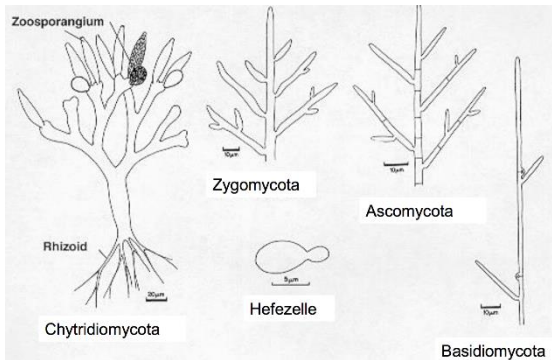
**HEFEWACHSTUM**

- Hefen sind einzellig, können aber unter Nahrungs-knappheit Pseudohyphen ausbilden
- **Sprosshefen:** Vermehrung durch Knospung/Sprossung, ebenfalls polar
- **Spalthefen:** Vermehrung durch polare Ausdehnung und anschließende Septierung. Dann kann Mutter- von Tochterzelle abgetrennt werden.

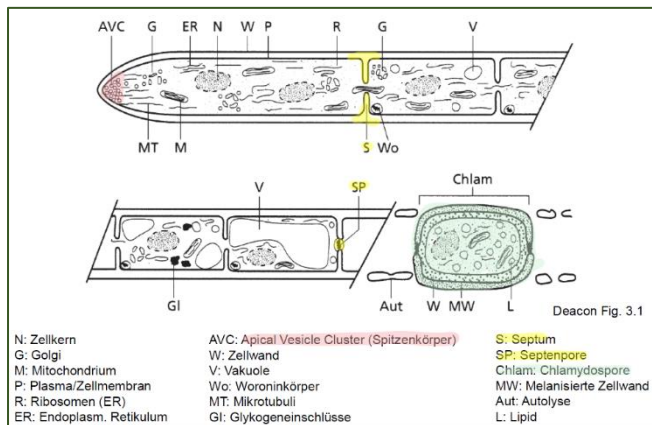
**DIE ERNÄHRUNGSWEISE BEEINFLUSST DIE KÖRPERFORM**

- Pilze besitzen keine Gefässe und müssen daher **über Cytoplasma kommunizieren**.
- Die Cytoplasmata der einzelnen Hyphen können **durch Septen getrennt**, aber durch regulierte **Porenöffnung verbunden** werden.
- Die Hyphenform erlaubt optimale Aufnahme von Nahrungsbestandteilen  
→ grosse Oberfläche, Ein- und Durchdringendes Substrates
- Netzwerk (Myzel) für den Transport von Nährstoffen und Informationen
- Hefeform als Anpassung an Nahrungsüberfluss → erlaubt eine schnellere Vermehrung

**Zelluläre Formen der Pilze:**



**Zellulärer Aufbau einer Pilzhyphe**



- **AVC (apical vesicle clusters):** „Spitzenkörper“, erlaubt polares kozentriertes Wachstum an Hyphenspitze
- **V:** Vakuolen, werden mit zunehmendem Alter grösser
- **SP: Septemporen** regulieren Stoffaustausch, Öffnung streng reguliert
- **S:** Septen ermöglichen Differenzierung (Unterbruch des Stoffaustausches ermöglicht unterschiedliche Genexpression, resp. unterschiedliche TF)
- **Chlam: Chlamydospore**, dickwandige durch Mitose separierte Hyphenzellen, die der Überdauerung bei ungünstigen Umfeld dienen

**ZELLWAND**

- Bei Pilzen **primär** (aber nicht nur!) aus **Chitin (Strukturpolymer)**, bei Pflanzen aus Cellulose (wird von Pilzen verdaut)
- Nicht immer Chitin!
- Aufbau aus **Zuckern mit eingelagerten Proteinen**
- $\beta$  1,6- und  $\beta$  1,3-Glukan sind **Homopolymere** von Glucose
- **fibrilläre** Polymere haben **Stützfunktion**, gelartige hingegen verleihen **Flexibilität**

**Zellwandkomponenten und Zusammensetzung:**

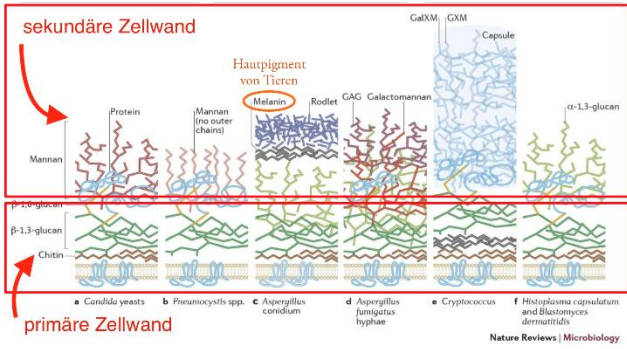
Taxonomische Gruppe	fibrilläre Polymere stützen	gelartige Polymere verleihen Flexibilität, oft hochglycosyliert
Basidiomycota	Chitin $\beta$ 1-3, $\beta$ 1-6-Glukan	Xylomannoproteine $\alpha$ (1-3) Glukan
Ascomycota	Chitin $\beta$ 1-3, $\beta$ 1-6-Glukan	Galactomannoproteine $\alpha$ (1-3) Glukan
Zygomycota	Chitin Chitosan	Polyglukuronsäure Glukronmannoproteine Polyphosphate
Chytridiomycota	Chitin Glukan	Glukan
Hypochoytridiomycota	Chitin Cellulose	Glukan (?)

Zellwandkomponente (Polymerisationsgrad)	Durchschnittliche molekulare Masse (kDa)	%-Anteil der Zellwand	relativer, molarer Anteil
$\beta$ 1-3-Glukan (1500)	240	50	1.0
$\beta$ 1-6-Glukan (150)	24	10	2
Mannoproteine (enthalten über Mannose verbundene Zucker)	160-200	40	1.2 - 2.4
Chitin (120)	25	1-3	0.1 - 0.3

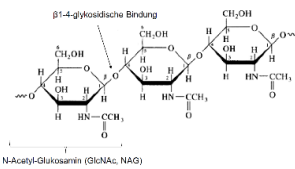
**Aufbau:**

- Zellwand besteht aus zwei Teilen...
  - ⇒ **primäre Zellwand: konservierte, rigide innere Schicht**
  - ⇒ **sekundäre Zellwand: variable gelartige äussere Schicht, erlaubt Unterscheidung zw. verschiedenen Pilztypen und spezifiziert Interaktionsformen mit Umwelt**

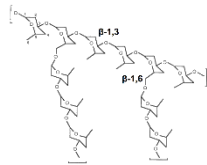


- **Zonaler Aufbau:** je weiter entfernt von der flexiblen dünnwandigen Hyphenspitze (Wachstum), desto dicker die Zellwand
- **Modularer Aufbau:** Zellwand besteht aus vielen kleinen Untereinheiten (Proteine & Polysaccharide), die zu grossem Netzwerk zusammengefügt werden (nicht-kovalent)

**Chitin:**



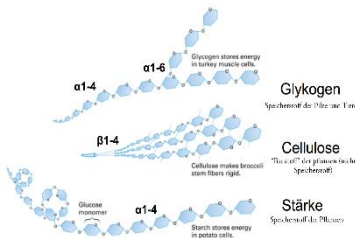
**β-Glucan:**



➔ Struktur der pilzlichen Zellwand ist jener der Cellulose in Pflanzen sehr ähnlich. Eine **leicht unterschiedliche Verknüpfung** ist jedoch **essentiell**, da der Pilz sonst seine eigene Zellwand verdauen würde.

**Speicherpolysaccharide:**

- **Glykogen:** Energiespeicher von Pilzen und Tieren, α1-4 und α1-6 Verknüpfung, bildet verzweigte Ketten
- **Cellulose:** Baustoff von Pflanzen, β1-4, bildet lange lineare Stränge
- **Stärke:** Energiespeicher in Pflanzen, α1-4, bildet Helizes (durch H-Brücken)



**Zellwandproteine :**

**Funktionen:** Auf- & Abbau von Zellwandbestandteilen, deren modulare Verknüpfung, Zell-Zell-Interaktion, Zellwand,

**GPI Anker**

- Einige **Glykoproteine** sind über ihren **C-Terminus** an GPI-Anker in Membran eingebettet

**N-glykosylierte Proteine**

- *N-glykosyliert* = Zucker an Asp
- *O-glykosyliert* = Zucker an Thr/Ser-Rest
- **N-glykosylierte Proteine zu 99.999% auf lumenaler Seite des ER**, da sie ausserhalb der Zelle zu liegen kommen (Kommunikationsfunktionen)
- **Einige angehängte Zucker** werden nur als Qualitätskontrolle benötigt und nach Übertragung **wieder abgeschnitten**
- Glykoproteine werden über **Vesikel** zum **Golgi** transportiert und dort unter **GTP-Verbrauch polyglykosyliert** und **modifiziert** und danach werden sie über **sekretorische Vesikel** an die **Plasmamembran** befördert (insb. an Hyphenspitzen!).

**Hydrophobine:**

«Coaten» Hyphen -> Verursachen Hydrophobe Eigenschaft und ermöglichen es dem Pilz sich in einer wasserlosen, trockenen Umgebung auszubreiten und nicht auszutrocknen

- In der Zellwand eingelagert, 4 Disulfidbrücken, Proteine haben hydrophobe und hydrophile Seite! (Hydrophobe Seite an die Luft)

**Funktion: Wasserspeicher und Schutz vor Austrocknung ➔**

wenn der Pilz sich in die Luft erheben will braucht er Hydrophobine!

**Adhäsine:**

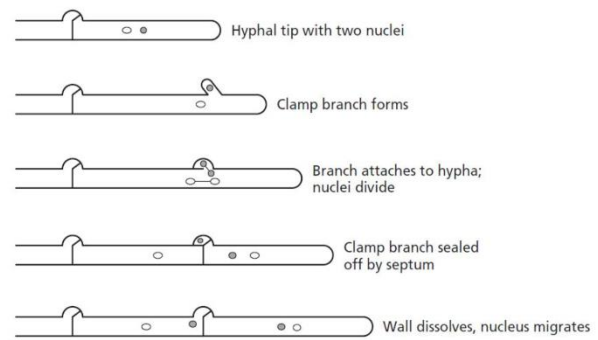
Lectin: Zucker erkennende- und bindende Proteine, sind Ca<sup>2+</sup>-abhängig

- ➔ *Lectine binden Glykoproteine an der Oberfläche anderer Hefezellen und führen so zur **Akkumulation** einer ganzen Hefekultur.*
- ➔ *Die **Interaktion** kann durch **Zugabe von Mannose unterbrochen** werden, die statt der Glykoproteine an die Lectine binden.*
- ➔ ***nur eine der beiden Zellen in Kontakt** muss Lectin enthalten, die andere benötigt für eine Adhäsion lediglich Zucker*

**POLARITÄT DER ZELLWANDSYNTHESE UND VESIKULÄRER TRANSPORT:**

- ➔ Pilzwachstum geschieht an **Hyphenspitzen**
- ➔ **Zellwand** wird dort ständig **ausgebaut**, sodass sie mitwachsen kann
- ➔ **Turgor** wirkt als **treibende Kraft**, die das Wachstum in Richtung flexibler Spitze treibt
- ➔ **Ältere Hyphen** (in Mycelmitte) wachsen nicht mehr
- ➔ **Bulkflow** als **Voraussetzung des Spitzenwachstums** -> Mittels Turgor Gradienten -> Elektrolyt wird hineingelassen, Wasserfließt nach wodurch ein Druck erzeugt wird welcher auf die Spitze wirkt

- Falls aussen die Konzentration erhöht wird (hyperosmotisch), findet kein Hyphenwachstum mehr statt!
- Vesikeltransport durch Turgordruck Richtung Zellspitze (Synthese im ER) -> aktiver, gerichteter Transport entlang des Mikrotubuli-Zytoskellets (gekoppelt an Motorproteine)
- Anhäufung von Vesikeln im Spitzenkörper, Vesikelfusion ist Ca<sup>2+</sup> Konzentration abhängig
- Chitin stabilisiert die Zellwand und verhindert, dass der Pilz aufgrund des hohen Turgor Drucks platzt
- Durch Exozytose werden am Spitzenkörper Hydrolytische Enzyme und Zellwand-synthetisierende Enzyme ausgeschieden
- Durch Endozytose wird am Spitzenkörper wieder Membran aufgenommen → stellen **Gleichgewicht zw. Zellwand- und Zellmembransynthese** her (Membran wird sonst durch Exocytose schneller vergrößert als Wand)
- Recycling, Lipide zurückholen
- **Septine**: an innerer Hyphenspitze (und nur dort) werden auch **mRNA und Ribosomen** transportiert, um lokal sog. Septine herzustellen. Sie erstellen **Diffusionsbarriere** zw. apikalem und subapikalem Hyphenteil, die **laterale Diffusion** spezialisierter Proteine aus der Wachstumszone verhindern.
- **Transport** wird über Motorproteine vermittelt, die unidirektional auf MT (Kinesin & Dynein) oder Aktinfilamenten (Myosin) wandern
- **Polyoxin und Nikkomycin** inhibieren Chitin Synthase → Turgor steigt, aber Zellwand kann nicht ausgebaut werden → Hyphe platzt

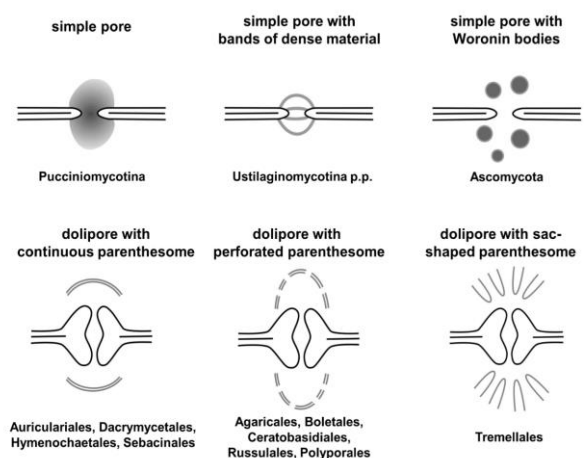


### Septenporen Verschluss:

- In **jungen Mycelteilen** meist **geschlossene** Poren, um Differenzierung zu gewährleisten
- In **alten Mycelteilen** meist offene Poren, da insb. Nährstofftransport gewährleistet werden muss, aber keine Differenzierung stattfindet
- Poren werden bei Verletzungen oder aufgrund kompartimentdifferenzierungen geschlossen
- Pilze haben verschiedene Verschlussmechanismen:

⇒ **Einfache Pore**: Verschluss durch peroxisomale Vesikel (**Woronin Bodies**) bei Verletzung

⇒ **Dolipore**: spezialisiertes ER liegt direkt an Pore und rekrutiert Verschlussmaterial



### BILDUNG VON HYPHENQUERWÄNDE / SEPTEN:

- Insb. in **Hyphenspitze**, da dort **Differenzierung** wichtig
- **Altes Mycel** wird **nicht mehr septiert** & ist weniger differenziert
- Glomeromycota haben keine Septen
- Septumbildung mittels Ringbildung von Aktin, SepA und Septin (basal und apical) -> Membraneinbau von aussen nach innen, Invagination der Zellwand

### Schnallenbildung bei Dikaryon in Basidiomycota

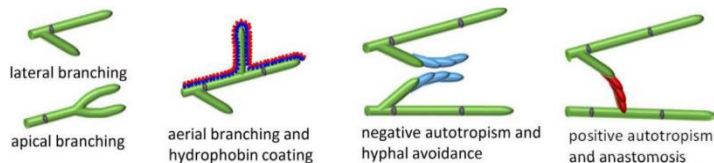
**Problem:** wieder **zwei Kerne** müssen in neuem Kompartiment enthalten sein.

**Lösung:** Spindel der beiden Kerne werden bei Teilung **nicht parallel** zueinander ausgerichtet, sondern in 90°-Winkel, was zu einer **„Ausstülpung“** des einen Kerns führt (⇒ Clamp formation). Nach Teilung **bestehen kurzzeitig 3 Kompartimente**. Der Kern in der Ausstülpung wird nachträglich wieder mit der **ursprünglichen** (alten) **Hyphe** fusioniert, resp. die Trennwand aufgelöst. Die Ausstülpungen bleiben als narbenartige Gebilde bestehen.

### Take home messages

- Pilzzellen zeichnen sich durch polares Wachstum aus
- Die pilzliche Zellwand besteht aus Glykanen und darin eingelagerten Proteinen, die meist selber glykosyliert und mit den Glykanen kovalent vernetzt sind
- Das polare Wachstum der Pilzzelle bedingt eine polare Synthese der Zellwand. Die Zellwandbausteine werden durch vesikulären Transport entlang des Zytoskellets an den Wachstumspol transportiert
- Septen mit verschliessbaren Poren ermöglichen eine Kontrolle des zytoplasmatischen Flusses durch die Pilzhypen

## ÜBERBLICK: VERZWEIGUNGEN, AUTOTROPISMUS UND FUSION VON HYPHEN



### Verzweigungen:

- Bildung von Verzweigungen aufgrund externen Signalen
- Braucht Enzyme, die die Zellwand elastischer machen und Vesikel zum Transport (**Lokal wird Zellwand flexibilisiert** und polares Wachstum abseits der Hyphenspitze ermöglicht)
- **Regulation: Cyclosporine** stimulieren Verzweigung und verringern damit Verlängerung des Mycel
- Verzweigungsmuster kann durch die Umwelt beeinflusst werden. Verzweigung wird vor allem bei günstigem und nahrhaftem Umfeld vorgenommen  
→ **Nahrungsangebot**  
→ **Fressfeinde**

### Negativer Autotropismus:

- Hyphen stoßen sich gegenseitig ab -> Oberflächenvergrößerung oder Differenzierung

### Positiver Autotropismus und Anastomosis:

- Hyphen wachsen zusammen und bilden ein stabiles Netzwerk
- Pilz wird dadurch weniger differenziert, dafür generalisiert
- **Vor allem bei jungen Hyphen ??? oder im alten?**
- Nur zwischen genetisch identischen Hyphen möglich

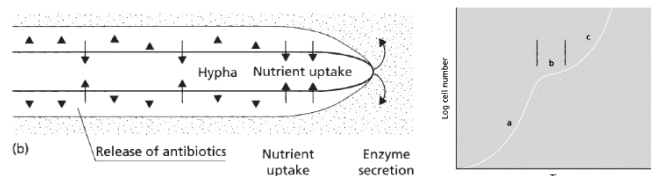
### Pseudohyphen:

- Zellen hängen aneinander an, keine Septen
- Nur **diploide Hefen** können Pseudohyphen bilden (müssen dazu **distale Knospen** bilden)
- **Haploide Hefen** können nur **proximale Knospen** ausbilden und somit keine Zellketten bilden



## ERNÄHRUNG DER PILZE

- Absorptiv
- Enzym-Ausscheidung an der Spitze der Hyphe



- Externe Zerkleinerung und «Verdauung» der Nahrung
- Subapikaler Bereich: Nahrungsaufnahme mittels Transporter
- Endozytose als Ausnahme:  
→ sekretierte Membran wird wiederaufgenommen  
→ Eisenkomplex
- Antibiotikafreilassung dient als Schutz der Hyphenspitze und zur Abwehr von Nahrungskonkurrenten
- Hefen sind gebaut, um Nahrung in flüssiger Form aufzunehmen
- Kurze Unterbrechung des Wachstums (b) aufgrund der Freilassung von Abbauenzymen und Transportern

### TRANSPORTWEGE:

- Mittels Transporter
- Transmembranproteine (Es gibt G-gekoppelte Rezeptoren, Non-transporting Rezeptoren und Tranceptors -> dienen zum Signaling und zur Aufnahme)

Transport nur entlang eines Konzentrationsgefälles! Lösung:

1. Gekoppelter Transport mithilfe eines Gradienten
2. Vakuole als Speicherort -> spezifische Räume schaffen!

### WAS BRAUCHEN PILZE UM WACHSEN ZU KÖNNEN?

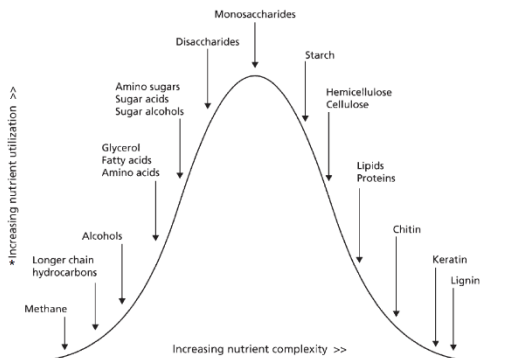
- **Essentielle pilzliche Nahrungskomponenten** sind...  
⇒ Salze:  $KCl$ ,  $MgSO_2$   
⇒ N-Quellen:  $NaNO_3$  oder  $NH_4NO_3$ , Aminosäuren  
⇒ C-Quellen: **lebende oder tote Tiere, Pflanzen oder Bakterien**  
⇒ Zucker: *Sucrose* oder *Glucose* ⇒  
⇒ Spurenelemente ( $ZnSO_4$ ,  $FeSO_4$ ,  $CuSO_4$ )  
⇒ Vitamine (*Biotin*, *Thiamine*)

### C-Quellen:

- Pilze bevorzugen C-Quellen **mittlerer Komplexität** (Gauss-Kurve), insb. Monosaccharide, Disaccharide und Stärke.
- **lebende oder tote Pflanzen, Tiere oder Bakterien:** Glukose, Fruktose, Maltose, Xylose, Succrose, Mannose, Organische Säuren
- **Pflanzliches Gewebe:** Stärke, Insulin, Proteine, Kutin(Kutikula)

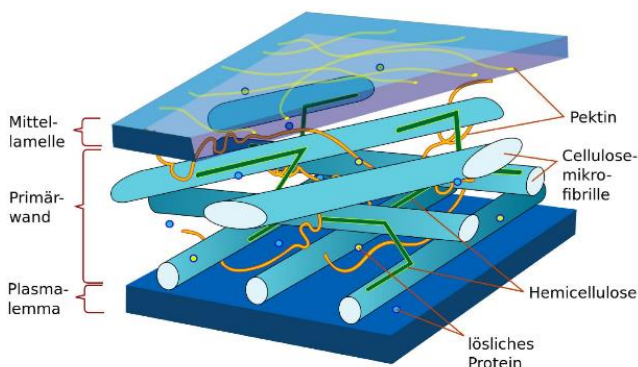
- **Pflanzliche Zellwände:** Hemicellulose, Cellulose, Pektine, Lignin
- **Tierische Zellen:** Glykogen, lipide, Proteine, Chitin, Keratin

### Pilzliche C-Quellen: Präferenzen und Komplexität



- **Kot als cellulosehaltiges Substrat:** Pilz gelangt nicht nachträglich auf Kot, sondern Sporen werden vom Vieh über Nahrung aufgenommen und überleben Verdauung. Sobald ausgeschieden, keimen Sporen aus.
- **Besiedlung** von verschiedenen Pilzen auf einem Substrat ist oft **parallel** → Es herrschen gleiche Präferenzen (jedoch gibt es eine Versetzung im Fruchtkörperwachstum) ⇒ **unterschiedliche Komplexität und Zeitaufwand für Fruchtkörperwachstum aufweisen** (Zygo < Asco < Basidio)
- ⇒ **unterschiedlich starke Konkurrenten sind** (Basidiomycota sehr stark auf lange Sicht)

### ABBAU EINER PFLANZENZELLWAND:



### Cellulose-Abbau:

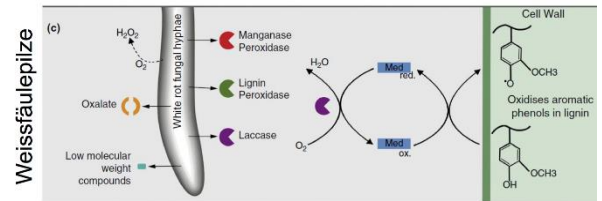
- *Evolutione Neuerung der Basidiomycota*
- *Mykorrhiza haben sich sekundär zurückgewandelt -> Keine Cellulasen und Ligninasen mehr!*
- ⇒ Mittels Endocellulase, Exocellulase (Beta1-4-Bindungen) Ligninasen, Glukosidasen und LPMOs
- ⇒ **Amorphe Regionen** sind **weniger dicht gepackt**, welche deshalb öfters abgebaut werden → **klassischer Abbau**
- ⇒ **Kristalline Regionen** sind **dichter gepackt** und werden mittels **Oxidation durch LPMOs** (Lytsche Polysaccharide Mono Oxigenasen) abgebaut → **oxidativer Abbau**

### Pektin-Abbau:

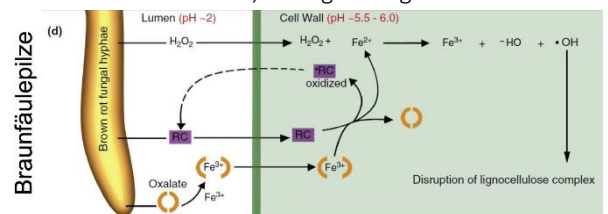
Abbau von Pektin mittels Pektinesterase (PE) (oder PMG, PMGL, PG, PGL -> Spaltung der alpha 1-4-Bindung)

### Lignin-Abbau:

- **Lignin:** Polyalkohol (3 vernetzte Alkohole), kein Zucker, Verknüpfung über **radikalische Reaktionen** und nicht einfach mittels Hydrolasen zu spalten
- ⇒ **Weissfäule:** Peroxidasen und Laccasen-> Enzymatisch Abbau durch Produktion von O-Radikalen, die radikalische Verknüpfungen angreifen.

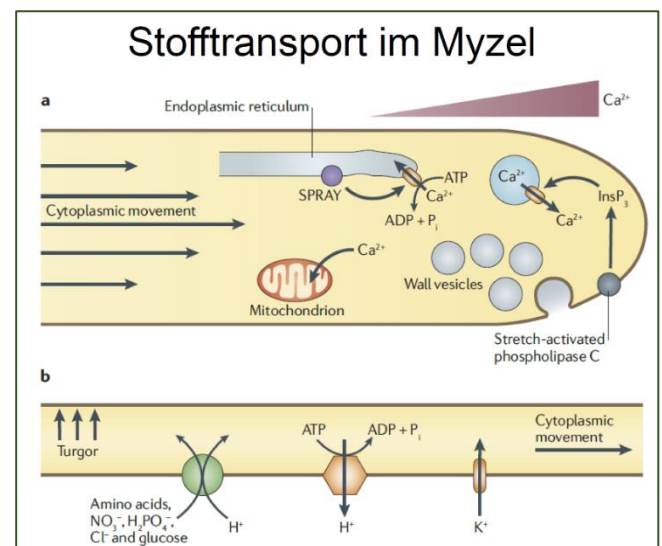
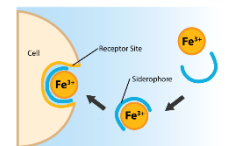


- ⇒ **Braunfäule:** Oxalate (Bilden Eisenkomplexe) und Peroxid-> Chemischer Abbau indem **Fe-Ionen** in Oxalaten in pflanzliche Zellwand diffundieren und aus H2O2 reaktive OH-Radikale herstellen, die Lignin angreifen



### STOFFAUFNAHME & TRANSPORT

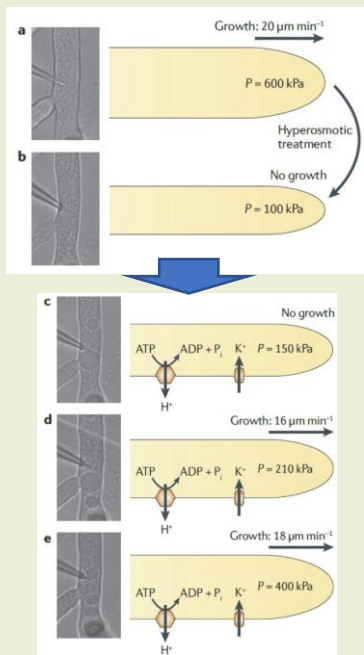
- Über **Endozytose:** eher selten, insb. zur Aufnahme von Spurenelementen. Dazu werden gelöste Elemente mit Rezeptoren (**Siderophore**) verbunden und internalisiert.
- Über **Transportsysteme:**
  - ⇒ oft mit **H<sup>+</sup>-gekoppelter Cotransport**
  - ⇒ Verwendung innerer **Kompartimente mit Transportern** (insb. Vakuolen), um Konzentrationsgradienten zw. Cytoplast und extrazellulärem Raum zu beeinflussen.



### EXPERIMENT: ist Turgor wirklich Wachstumsmotor?

Zur Überprüfung wird Elektrolytkonzentration ausserhalb der Zelle erhöht und damit eine hypertone Umgebung geschaffen.

**Beobachtung:** Turgor nimmt ab, das Wachstum wird gestoppt, was die Turgorhypothese bestätigt. Die Hyphe beginnt dann jedoch wieder mit dem aktiven Elektrolytimport, um wieder einen osmotischen Druck nach innen und damit einen Turgor herzustellen. Das Wachstum kann dann wieder einsetzen (nach 70 Min.).



#### Genauer Mechanismus:

1. Turgor wird durch **Elektrolytimport** erstellt
2. Druck wird an Spitze von **stretch-activated phospholipase C** oder **SPRAY** in ER-Membran wahrgenommen
3. Signaltransduktionsweg stimuliert **Ca<sup>2+</sup>-Ausschüttung** aus ER und Vakuolen.
4. Ca<sup>2+</sup> stimuliert **Exocytose sekretorischer Vesikel**
5. Hyphenwachstum

### Take home messages

- Die Netzwerke (Myzelien) von filamentösen Pilzen entstehen durch Verzweigung und Fusion (Anastomose) der Hyphen.
- Viele pathogene Pilze sind dimorph d.h. haben eine hefeartige und eine filamentöse Wachstumsphase.
- Die hauptsächliche C-Quelle von Pilzen ist die pflanzliche Zellwand d.h. Cellulose. Basidiomycota haben sich auf den Abbau von Lignocellulose (Holz) spezialisiert.
- Niedermolekulare Nahrung wird durch Transporter in die pilzliche Zelle aufgenommen und durch zytoplasmatischen Fluss im Myzel verteilt.
- Pilze besitzen Sensoren in der Plasmamembran, um ihren Metabolismus dem Nahrungsangebot anzupassen.

### DIFFERENZIERUNG VEGETATIVER HYPHEN

#### HYPHENHETEROGENITÄT:

Hyphen exprimieren nicht alle diegleichen Gene! Sind verschieden!

- Im jungen Myzel (Im alten Myzel keine Differenzierung)
- Differenzierung aufgrund der Verschlussbarkeit von Septenporen (Genexpression verschieden)
- Gibt Aufgabentrennung -> Transport- und Kommunikationshyphen vorhanden (z.B. spezifische Transporthyphen mit Glukose-permeablen Septen)
- Gibt optische Differenzierung (Einige sind dicker/ andere Verzweigungsmuster)

#### TRANSPORTHYPHEN

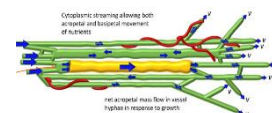
- Hyphen kommunizieren trotz Aufgabenteilung miteinander und tauschen Stoffe aus

#### RHYTHMISCHES WACHSTUM

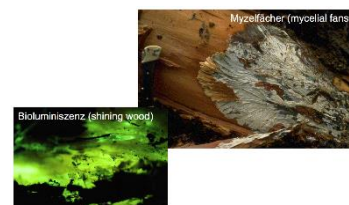
- Wachstum kann abhängig von **periodischen Einflüssen** wie Licht sein, sodass spezielle **Wachstumsmuster** entstehen können.
- Pilze besitzen einen **circadianen Rhythmus**, der auch ohne die oberen Einflüsse das rhythmische Wachstum aufrechterhalten kann.

#### MYZELSTRÄNGE:

➔ Bildung von Verzweigungen in extrem spitzem Winkel (praktisch parallel) zu «**Hyphenbündeln**».



- Ermöglichen **schnelleres** und **gezieltes Wachstum**
- Verleihen **mechanische Stabilität** und **Robustheit**
- **Gebündelte Ausdehnung**
- Können **Rhizomorphe** bilden: innerste Hyphen der Bündel werden **hohl** (tot) und dienen **H<sub>2</sub>O-Transport**
- ➔ «Wurzelfäule»: Rhizomorphie
- Können auch **Myzefächer** und **Biolumineszenz** als Differenzierungen bilden



#### APPRESSORIUM/HAUSTORIUM:

- Parasitisch (nicht-parasitisches Analogon: Arbuskeln)
- Beinhaltet zwei zentrale Differenzierungen:
  1. **Appressorium**: darin wird lokal **riesiger Turgor (bis 20 atm!)** aufgebaut (Schutz durch Ring aus **Aktin & Septin**), mittels dem sie eine spezielle Hyphe (**Penetrationshyph**) zum Wachstum bringen, welche sogar Kutikulas durchbohren kann.



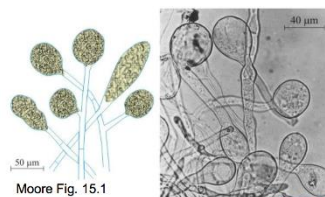
2. **Haustorium:** Verästelung der Penetrationshyphe ins Innere der Pflanzenzelle (Wand und Membran werden aber nicht durchdrungen!)

**ARBUSKELN:**

- **Mutualistisch**
- Genau gleiche Morphologie wie Haustorien, lediglich der Effekt ist anders: die Pflanze geht auf den Pilz ein, **keine Abwehrmechanismen**, sondern sogar **aktiver Austausch**.

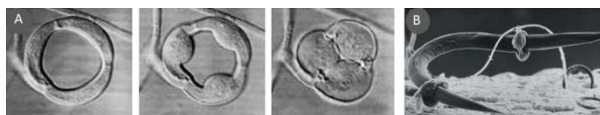
**GONGYLIDIEN (BROMATIEN):**

- **Blasenartige Vergrößerungen** als Speicherort
- Symbiose z.B. mit den Blattschneiderameisen



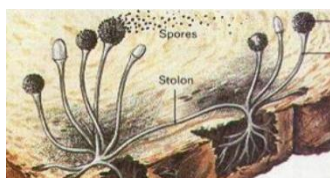
**FANGHYPHEN:**

- **Nematophage Pilze** → Einfangen von Nematoden
- Nahrungsergänzung → **Nematoden als Stickstoffquellen**
- Bilden Netze oder Ringe mit Klebstoff oder sogar kontraktile Ringe
- Ringbildung durch Anastomose (Hyphenfusion)
- Strukturen werden nur ausgebildet falls Nematoden vorhanden sind → Brauchen **spezifische Rezeptoren zur Wahrnehmung und zudem Berührungsempfindlichkeit und internes Signaling**
- ⇒ **Rezeptoren** nehmen **Hormone** der Nematoden wahr (Ascaroside)
- ⇒ **Thigmensation:** Pilze nehmen Berührung wahr, indem Erschütterungen der Zellwand mechanisch an Druckrezeptoren der Membran gekoppelt sind. Diese vermitteln interne Signaltransduktion...
- ...**Kontraktion der Ringe durch erhöhten Innen-Turgor**
- ...**Ausschüttung von Exoenzymen** führen zu **Lähmungen**
- ...**Pilzhypfen können sich „um Pflanzenzellen“ herumbeugen**



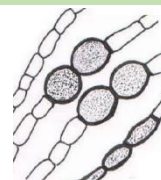
**RHIZOIDE UND STOLONE:**

- Hyphen, die der Verbreitung dienen → «Lufthyphen»



**CHLAMYDOSPOREN:**

- **Dauerphase**, Zeitüberbrückung → sehr widerstandsfähig
- Teile der Hyphe, wo sich die Zellwände verdicken
- Keine Örtliche Verbreitung!



**KONIDIEN:**

- Sporenbildendes Organ auf der Oberfläche eines Myzels

**SPORENBILDUNG:**

- Es gibt **sexuelle und asexuelle** Sporenbildung
- Sporenbildung findet **im Sporangium** statt → Durch Zellteilung
- **Normalfall:** Viele Sporen, **passive Verbreitung** über Wind, Wasser oder Tiere
- **Ausnahme: Sporangiolen** (wenige Sporen im Sporangium), **aktive Verbreitung** insb. durch Abschussmechanismen (siehe unten)
- Sehr verschieden in Form, Aufbau und Grösse

**2 FORMEN VON SPOREN:**

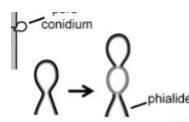
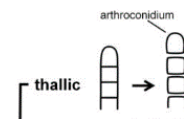
**Xenosporen:** kurze Überlebensdauer, eher klein, dünnwandig (nicht so robust und ohne Reservestoffe), entfernen sich vom Myzel, keine Keimhemmung -> Sollen gleich wieder auskeimen

**Memnosporen:** lange Überlebensdauer, grösser, dickwandig, mit Reservestoffen, bleiben in der Regel am Ort, oft Keimhemmung

**ASEXUELLE FORTPFLANZUNG:**

**2 VERSCHIEDENE ARTEN DER KONIDIENBILDUNG BEI ASCOMYCOTA**

- **thallische** Sporenbildung: Die jüngste Spore befindet sich an der Spitze
  - **blastische** Sporenbildung: Die jüngste Spore befindet sich am untersten Ende
- Es werden ketten von Sporen gebildet und die ältesten und reifsten werden vorne abgetrennt



**REGULATION DER KONIDIEN(=SPOREN) BILDUNG:**

- Durch **Interne oder Externe Signale**
- Viele Pilze haben eine asexuelle und sexuelle Fortpflanzungsmöglichkeit → Sie entscheiden sich je nach Umweltbedingung für einen anderen Weg:
- **Asexuelle Sporenbildung** → stabile, gute Umweltbedingungen, Vorteil: schnellere Vermehrung

- ➔ **Sexuelle Sporenbildung** -> schlechte Umweltbedingungen, Nahrungsmangel -> sind robuster Vorteil der Meiose: genetische Variation, Möglichkeit einer besseren Anpassung
- ➔ Ziel der Sporenträger ist es, an die **Oberfläche/Luft zu gelangen** ➔ Wollen die Sporen durch Luft und Tiere an der Oberfläche verbreiten
- Phototropismus:** Ermöglicht es dem Sporenträger, sich nach dem Licht auszurichten
- Negativer Gravitropismus:** Wachstum entgegen der Schwerkraft
- ➔ Oft passive Verbreitung der Sporen durch Tiere und Wind, gibt aber auch aktive Verbreitung

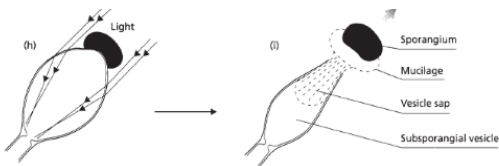
**Beispiele für passive Verbreitung der Sporen durch Sporenträger:**

Wind, Regen, Tiere



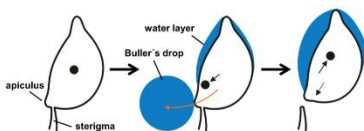
**AKTIVE VERBREITUNGSMÖGLICHKEITEN:**

**1. Aktive Verbreitung der Sporen durch Sporenträger**



**Sporangiophore** biegen das **Sporangium** zum Lichts (mittels einseitigem Wachstum der Zellwand) und können so die Sporangien zur Lichtquelle schießen. **Die Sporen bleiben zusammen** im Sporangium, welches an der Musilage gemacht ist (dient als Klebstoff und sorgt dafür, dass die Sporangien am Gras haften bleiben) Ziel ist es, von Herbivoren gegessen zu werden!

Abschuss findet durch Bildung von zwei Wassertropfen statt, die bei Verschmelzung die Spore von Lamelle lösen.



**Beispiel:** Sporangium von *Pilobolussp.* Oder Basidiospore von *Itersonilia perplexans*

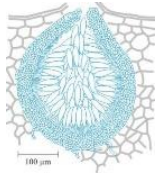
**2. Aktive Verbreitung von Sporen in Wasser durch Beweglichkeit der Sporen**

- Sporen besitzen eine Geißel am hinteren Ende

**3. Bildung multizellulärer plectenchymale Strukturen:**

**Conidiomata:**

- Synnema/Coremium (prosenchymal)
- Pyknidium (pseudoparenchymal) (Pseudoparenchymal= Bestehen im innern aus Hyphen, an der Oberfläche werden Sporen gebildet)



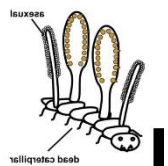
**Sklerotien:**

= Sterile und oft harte Überdauerungs- oder Speicherorgane von Pilzen, die aus fest verflochtenen, oft dickwandigen, zusammengelagerten Hyphen bestehen



**Stromata:**

**Hyphengeflecht** in welchem mindestens ein, oft aber mehrere bis viele **Fruchtkörper** eingebettet sind.



**Fruchtkörper:**

**Ziel: Oberflächenvergrößerung** ➔ Sporenbildung an der Oberfläche, Hyphen im Innern

- Fruchtkörper entstehen durch Zusammenlagerung der Hyphen zu einem Hyphenkörper

**Basidiomycota bilden Basidiomata:** Hyphen lagern sich zu Hyphenium zusammen, das von Schleier (veil) umgeben ist. Schirm wird dann aufgeklappt und Schleier reißt, sodass Lamellen freigelegt & Sporen verbreitet werden können.

**Ascomycota bilden Ascomata** mit Ascosporen: auch hier verschiedenste Formen

**Take home messages**

- Myzelien enthalten differenzierte Hyphen. Diese Differenzierung ist nicht immer morphologisch erkennbar.
- Differenzierung bedingt eine Septierung der entsprechenden Hyphenkompartimente.
- Die Differenzierung von Hyphen erfolgt aufgrund von internen und externen Signalen.
- Pathogene Pilze können mittels Appressorien die Kutikula von lebenden Pflanzen und Tieren durchstossen.
- Sporenbildung ist eine Hauptdifferenzierung von Pilzhyphen, die in unterschiedlichsten Arten erfolgen kann.
- Hyphen können sich zu Geweben unterschiedlichster Funktion z.B. Fruchtkörpern zusammenlagern.

**SEXUELLE FORTPFLANZUNG/REPRODUKTIONSZYKLEN:**

**TIERE, PFLANZEN UND PILZE:**

**Tiere -> DIPLONT:** Hauptsächlich in diploider Phase -> Meiose nur, um Geschlechtszellen herzustellen

**Pflanzen -> HAPLO-DIPLONT:** Generationswechsel -> diploide Sporophyten und durch Meiose werden haploide Gametophyten gebildet

**Pilze -> HAPLONT:** Haploide Phase ausgeprägt, extrem kurze Diplophase-> nur die Zygote ist diploid und gerade darauf folgend ist die Meiose

**Ausnahme:** Bäckerhefe kann sowohl haploid als auch diploid vorliegen und sich auch haploid oder diploid ausbreiten!

**SEXUELLEN REPRODUKTIONSSYSTEME:**

**Monözie =** Beide Geschlechtszellen sind auf derselben Pflanze (Männlich und weiblich zusammen)

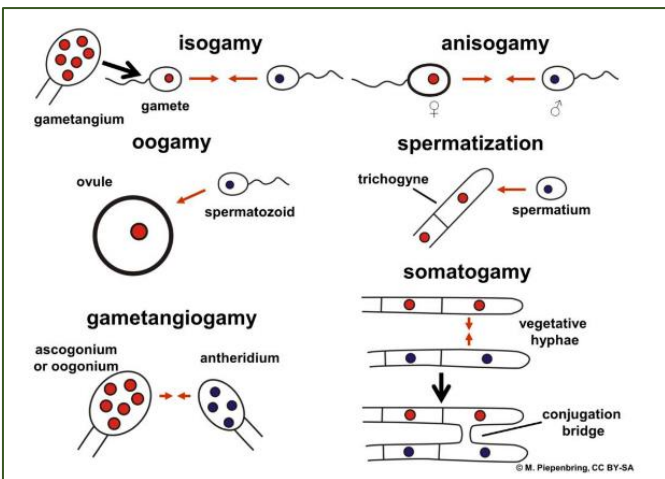
**Diözie=** Getrenntgeschlechtlich

Die zwei häufigsten Arten bei Pilzen:

**Homothallisch:** (Monözie, compartibel) Bildet Gameten von beiden Geschlechtstypen auf demselben Thallus (diese könnten sich auch paaren (Inzucht))

**Heterothallisch:** (Diözie, physiologisch) Fusion vegetativer Zellen -> Es werden hier keine speziell ausgebildeten Zellen zur Fortpflanzung gebildet

**BEFRUCHTUNGSMODI BEI PILZEN (...GAMY):**



**Isogamie:** Verschmelzung gleichartiger Gameten (gleiche Morphologie)

**Anisogamie:** Verschmelzung unterschiedlicher Gameten

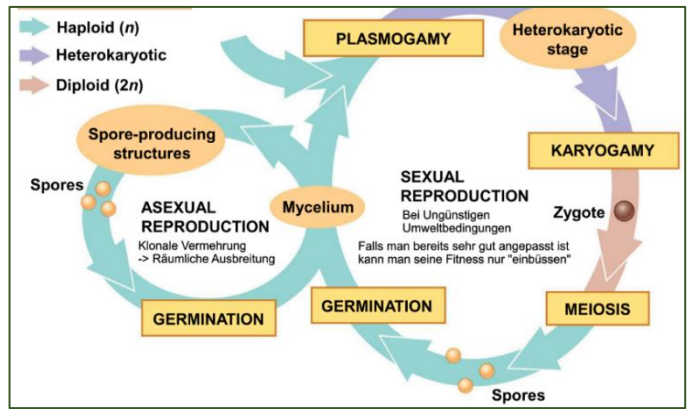
**Oogamie:** Bewegliche Spermien und unbewegliche Eizelle

**Spermatisation:** Verschmelzung von Hyphe und Gamet

**Gametangiogamie:** Gametangien verschmelzen direkt

**Somatogamy (Häufig bei Pilzen):** Gehen nicht über die Bildung von Gameten, sondern es fusionieren einfach 2 vegetative Myzelien (Hyphen) miteinander

**REPRODUKTIONSZYKLEN: ÜBERSICHT**



**KOPPLUNG VON ASEXUELLER UND SEXUELLER REPRODUKTION BEI PILZEN**

Es gibt 3 verschiedene Reproduktionszyklen :

- Asexuellen
- Sexuellen
- Parasexuellen

**SEXUELLE REPRODUKTIONSZYKLEN : PARASEXUALITÄT**

=Fusion von Hyphen ohne Produktion von Geschlechtszellen

**PLASMOGAMIE (=ANASTOMOSEN)**

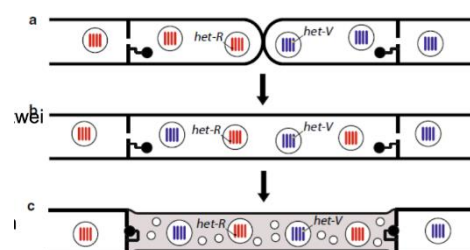
→ Hyphenfusion

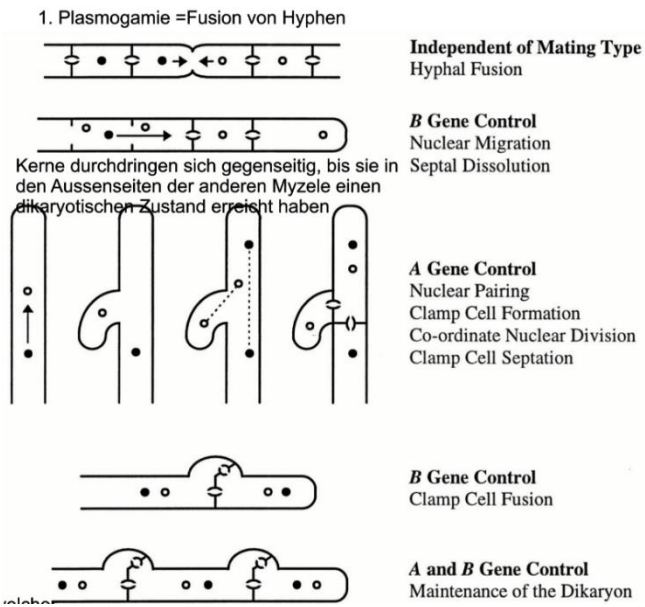
- Fusion der Hyphen führt zum heterokaryotischen Zustand (= Es befinden sich gleichzeitig zwei genetisch verschiedene Zellkerne in einer Zelle)
- Es gibt immer eine **Signaler- und eine Empfängerhyph**e
- Zusammenwachsen der Hyphen erfolgt nicht zwingend an der Spitze
- Wenn Hyphenzellen unterschiedlich differenziert sind → **genetische Ergänzung** ohne sexuelle Fortpflanzung!

**Kontrollmechanismus der Plasmogamie :**

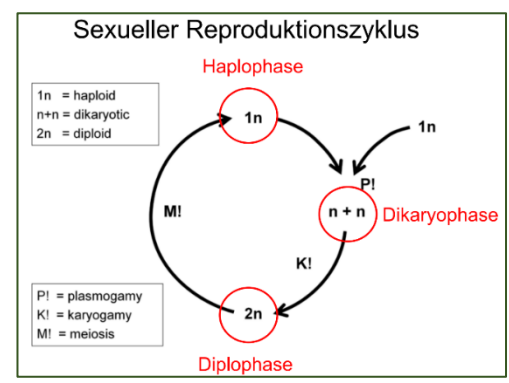
→ Vegetative Inkompatibilität

Checkpoint: «het-loci» müssen kompatibel sein. Falls sie inkompatibel sind, wird der fusionierte Teil abgetötet und die Fusion somit unterbrochen



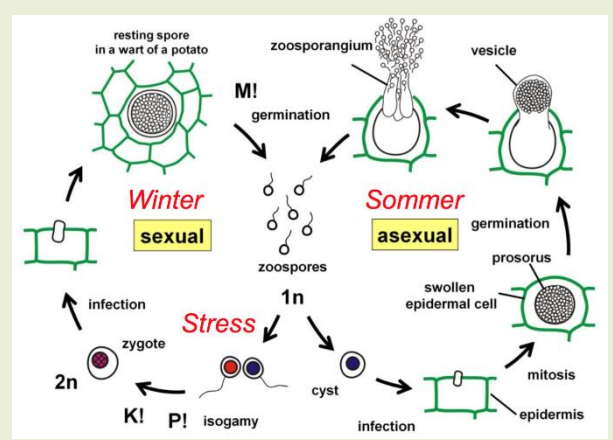


SEXUELLER LEBENSZYKLUS EINES ISOGAMEN UND HETEROTHALLISCHEN PILZES:



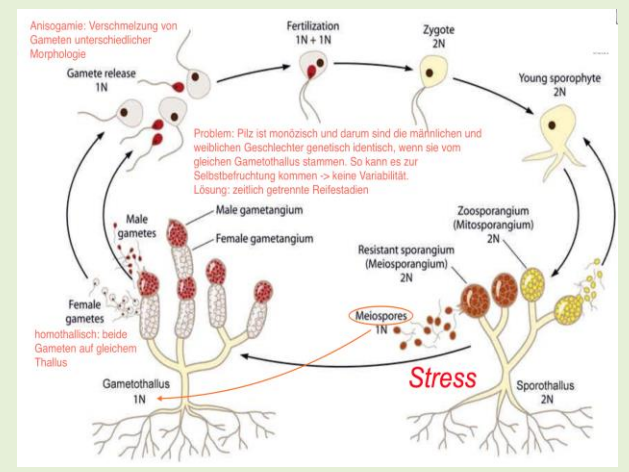
CHYTRIDIOMYCOTA

Beispiel 1: *Synchytrium endobioticum*



1. Überwinterung von 2n-Sporen in resistentem „potato“
2. Meiose und Sporenfreisetzung (Zoosporen, 1n)
3. Unter Stress wird sexuelles Stadium eingegangen (⇒ diploide Sporen), sonst asexuelles Stadium...
4. Befall von Pflanzenzellen und Mitose der Sporen zu Sporangium
5. Sporenfreisetzung

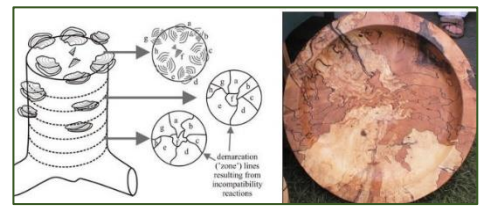
Beispiel 2: *Allomyces macrogynus*



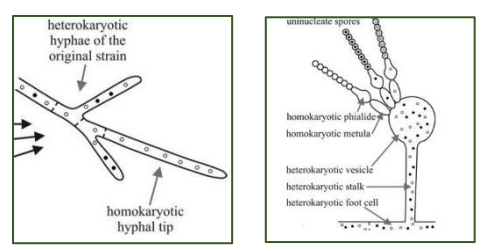
Homothallich: Beide Gametentypen werden auf demselben Thallus gebildet → sind genetisch identisch

Vegetative (In-)Kompatibilität:

- «het-loci» müssen bei Empfänger und Signaler kompatibel sein. Falls sie inkompatibel sind, wird der fusionierte Teil abgetötet. Kann durch verschiedene Phänomene beobachtet werden:
- Grenzlinienbildungen als Zeichen einer abgebrochenen Fusion/ Inkompatibilität



- Phänomene vegetativer Kompatibilität:
- Sektorenbildung homo- und heterokaryotischer Teile
  - Mischung der Kerne wird in der Sporenbildung rückgängig gemacht → Nur einen Kern pro Spore



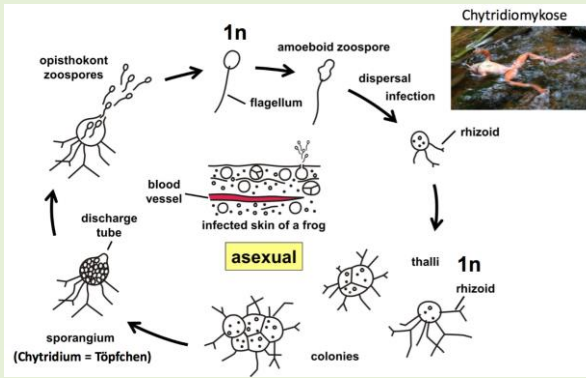
CHYTRIDIOMYCOTA

Geschlechtszellen-abhängige Vermehrung

STABILISIERUNG ALS DIKARYON IM RAHMEN DES SEXUELLEN ZYKLUS:

- ein « Programm » zur Stabilisierung des Stadiums läuft ab

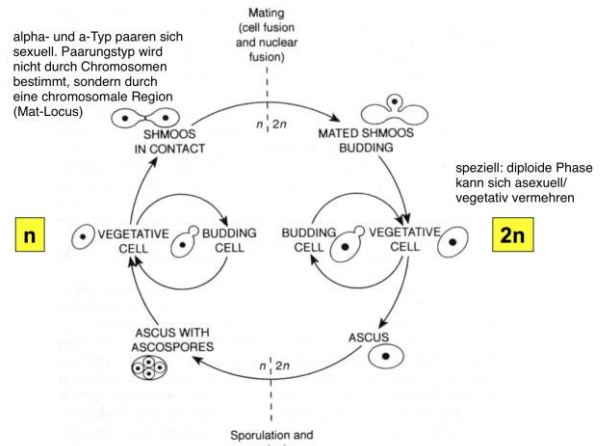
**Beispiel III: *Betrachochytrium dendrobatidis***



**ASCOMYCOTA**

- Ascomycoten sind **bipolar und idiomorph**, d.h. ihr Geschlecht wird von einem einzelnen Genlocus mit **zwei Allelen** unterschieden ( $\alpha$  und  $\alpha$ ). Im Gegensatz dazu sind Basidiomyceten tetrapolar (besitzen 2 Loci, d.h. diploide Form besteht aus je 4 Allelen)

**PAARUNGSTYPEN DER SACCHAROMYCES CEREVISIAE (HEFE)**

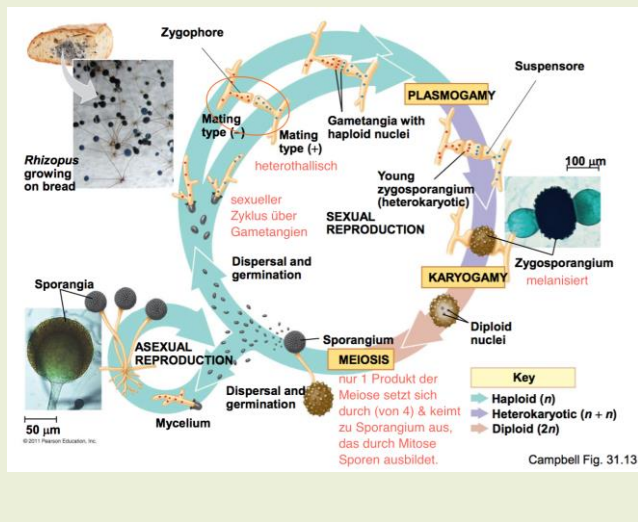


**GLOMERAMYCOTA**

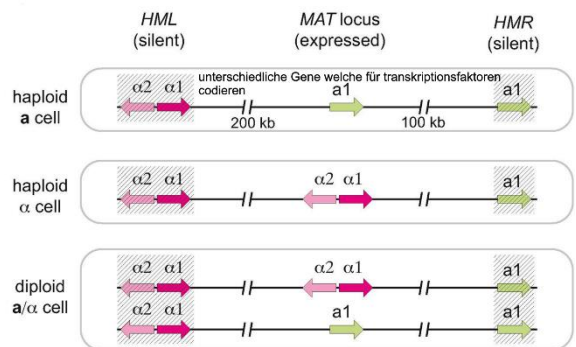
Fehlen von sexueller Reproduktion bei Vesikulär Arbuskulären Mycorrhiza (VAM) Pilzen

**ZYGOMYKOTA**

**Beispiel I: *Rhizopus nigricans***

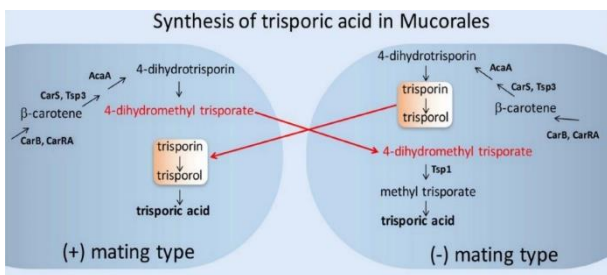


- Man hat bei den Hefen 2 Paarungstypen  $\alpha$  und  $\alpha$
- $\rightarrow$  2 Arten von haploiden Zellen mit unterschiedliche Homeodomänen
- Kodierung von komplementären HMG-Domänen-Transkriptionsfaktoren durch (+) und (-) Paarungstyp-Loci
- Paarungstypen ist vorhanden aufgrund einer beschränkten, chromosomalen mat-Lokus Region
- **ABER:** An der Seite der Mat-loci ist die Information für den anderen Typus vorhanden! parkierte, stillgelegte Gene



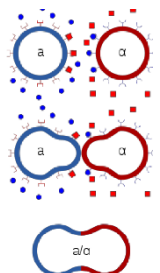
**PAARUNGSTYPEN ALS „GESCHLECHTER“ DER PILZE**

- Kooperative Biosynthese von Trisporinsäure durch (+) und (-) Paarungstyp. Die eine Zelle kann nur in Kooperation mit der anderen die Säure herstellen, da sie gegenseitig die Synthesewege ergänzen.



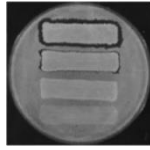
- Kodierung von komplementären HMG-Domänen-Transkriptionsfaktoren durch (+) und (-) Paarungstyp-Loci. Man hat tatsächlich genetische „Geschlechter“ identifizieren können (SexM für (-) und SexP für (+)).
- Pilze können entweder SexM, SexP oder Gemisch sein (kombiniertes Transkriptionsprogramm)

- **Haploide (nicht diploide!) Hefen** schütten zur sexuellen Reproduktion Lockstoffe (Pheromone) aus, die das andere Geschlecht anlocken (Die Pheromonsynthese ist Teil des haploid-spezifischen Programms)
- $\alpha$ -Hefen produzieren  $\alpha$ -Faktoren (Pheromone) und besitzen **a-Rezeptoren** (und umgekehrt)
- Wenn Hefen die Pheromone des anderen Geschlechts auf ihren Rezeptoren erkennen, wachsen sie aufeinander zu und es folgt die **Plasmogamie**.



- Bei einer diploiden Zelle kommen die beiden Mat-loci zusammen -> Heterodimerisierung der Homeodomänen Transkriptionsfaktoren  $\alpha 1/\alpha 2$   
-> Regulation der Meiose ausgehend von dem Dimer

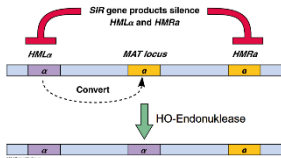
➔ **Beweis einer vollführten Paarung:** Arrest der Zellteilung, damit das Gengut homogen und nicht in Übergangsformen verschmelzen kann. (Rahmenbildung um die Zelle herum)



- Programm ist durch Umweltbedingungen gesteuert -> Hefe kann sich entscheiden, ob sie sich teilen möchte oder nicht -> Nahrungsmangel z.B. führt zur Meiose

**Paarungstyp-Switching:**

$\alpha$  Zelle kann sich in eine a Zelle verwandeln  
➔ Durch das Ersetzen des Ortes der im Genom liegen stillgelegte Gene (herausschneiden, tauschen und wiedereinsetzen) können sich die Hefe in den anderen Typus umwandeln!



**Vorteile:**

- Partnersuche wird erleichtert
- Eine einzelne Hefe könnte so Ascosporen mit sich selber bilden ➔ robustere Sporen

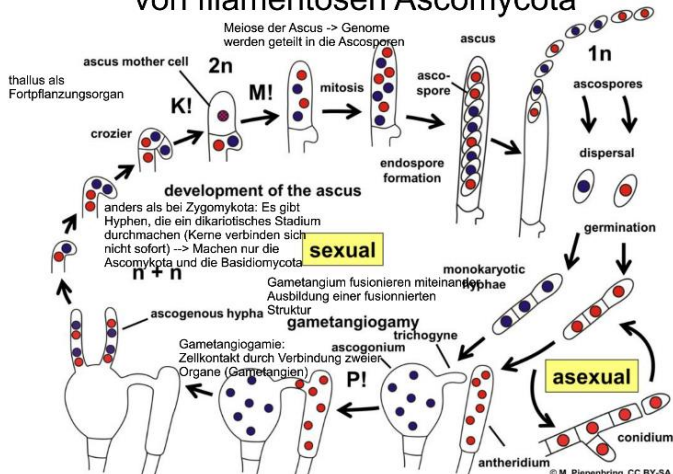
**Problem:**

- Erhöhte Inzuchtmöglichkeit: Von einem Ascii stammen je  $2\alpha$  und  $2a$ -Typen ab, welche sich demnach zu 50% blöderweise mit den "Geschwistern" paaren könnten. Können sie nun alle swtichen, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Inzucht nochmals zusätzlich ➔ **Homothalie**

**FAZIT:** Switching erhöht also die Inzucht und verkleinert das Outcrossing (Fortpflanzung mit einer Hefe mit anderen Genen) ➔ Verkleinert also die sexuelle Reproduktion/Selektion

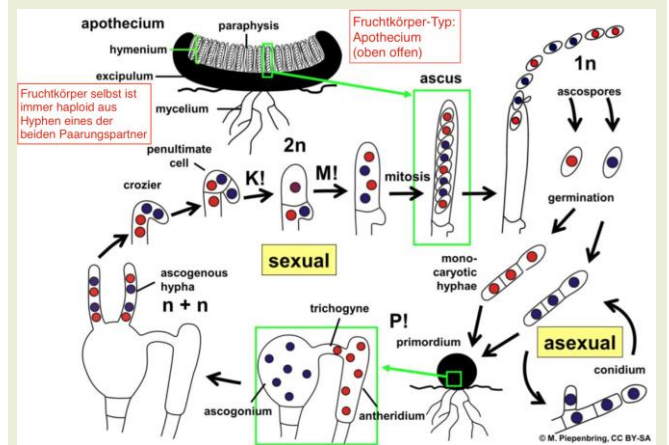
**REPRODUKTIONSZYKLEN FILAMENTÖSER ASCOMYCOTA**

**Genereller Reproduktionszyklus von filamentösen Ascomycota**



- Bildung weiblicher und männlicher **Gametangien** (Ascogonium und Antheridium)

**BEISPIEL 1: Pyronema omphalodes**



**MERKE:**

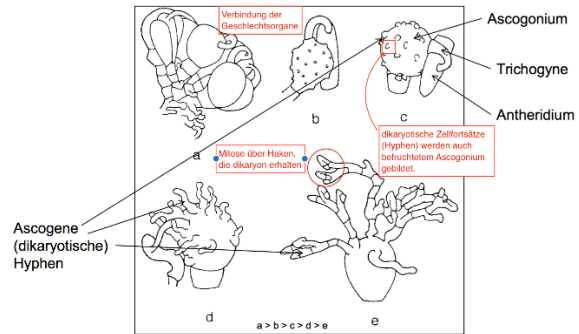
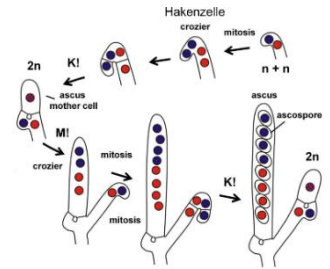
Typisch: **Ascusbildung**

**Gametangiogamy**= Verschmelzung zweier Organe

Speziell: ascogene Hyph: Diese Hyphen sind dikaryotisch und haben bilden eine spezielle Hackenform aus. Erst durch Karyogamie und darauffolgende Meiose und Mitose bilden sich die Ascii.

**Ascusbildung im Detail:**

➔ Mittels Hackenausbildung der ascogenen Hyphen



**Beispiel II: Bissochlamys**

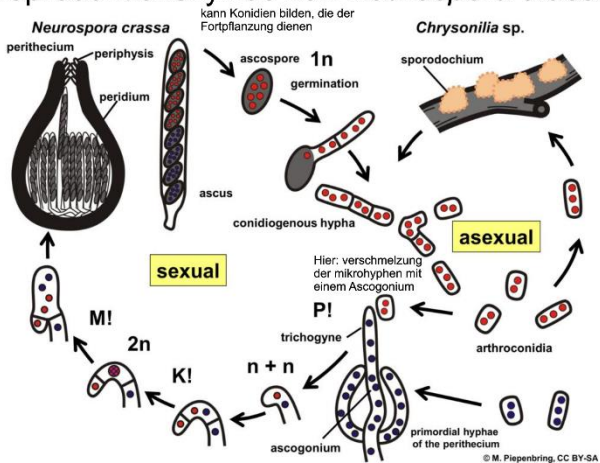
1. Ascogonium umwächst Antheridium schraubenförmig
2. Durch Plasmogamie tritt Paarkernstadium ein (Dikaryon)
3. Hakenbildung => 3.a) Haken über Haken wachsen und bilden Hakenketten
4. An Kettenende bildet sich der diploide Ascusvorläufer (durch Karyogamie der Kerne im Endhaken) und schwillt an.
5. Im Innern des Ascus bildet sich **Vakuole (5.a)**, in der sich der diploide Kern meiotisch in 4 Tochterkerne teilt (5.b)
6. Durch anschließende Mitose entstehen 8 Kerne, die zu Ascosporen heranreifen.

**BEISPIEL 3: *Neurospora crassa***

(Ausnahme der Ascomycota!)

→ Spermatisierung der *Neurospora crassa*

**Reproduktionszyklus von *Neurospora crassa***

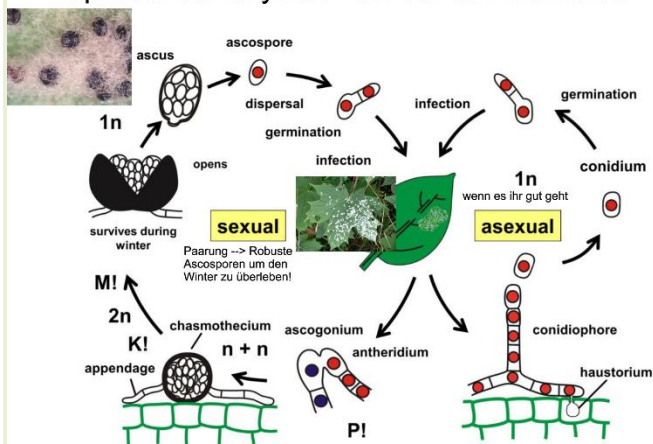


Bildung von Mikrokonidien (*Arthrokonidien*), die mit Gametangium des anderen Geschlechts verschmelzen können → heterothallich (keine Selbstbefruchtung)

Wiederum Hakenbildung zur Erhaltung des Heterokaryons während Ascus-Bildung.

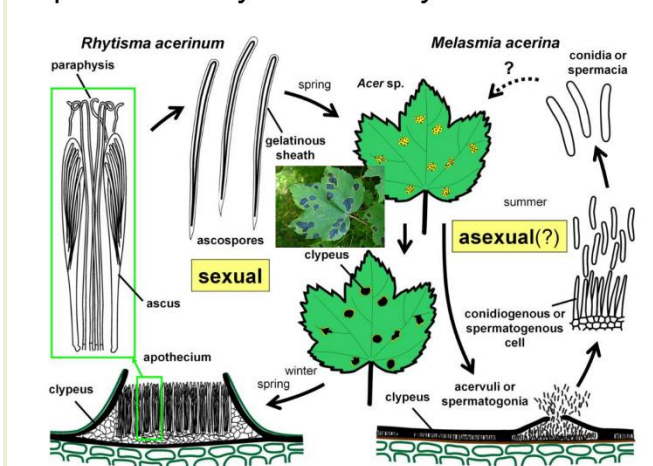
**BEISPIEL 3:**

**Reproduktionszyklus von echten Mehltaus**



**BEISPIEL 4:**

**Reproduktionszyklus von *Rhytisma acerinum***

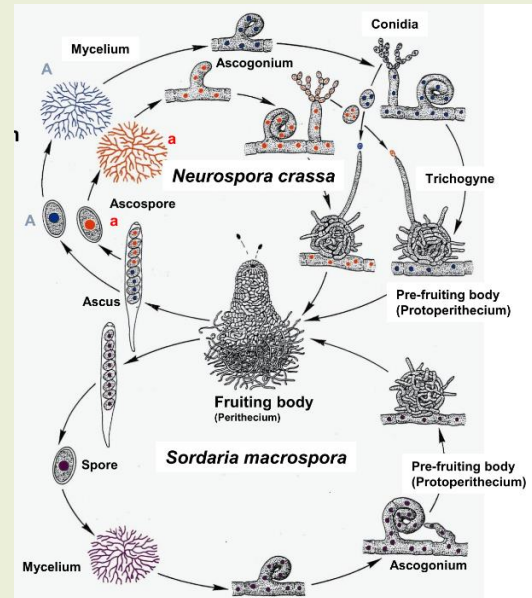


**HETEROTHALLIE, PSEUDOHOMOTHALLIE UND HOMOTHALLIE**

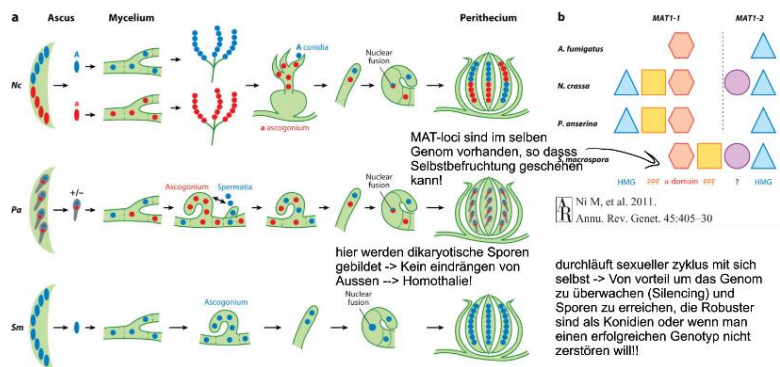
**BEISPIEL: *Sordaria macrospora***

Homothallich → Selbstbefruchtung → Kein mating-partner → durchläuft sexueller Zyklus mit sich selbst

Von Vorteil um das Genom zu überwachen (Silencing) und Sporen zu erreichen, die robuster sind als Konidien oder wenn man einen erfolgreichen Genotyp nicht zerstören will!



**Heterothallie, Pseudohomothallie und Homothallie bei Pezizomycotina**



<b>Nc</b> <b>(<i>n. crassa</i>)</b>	<b>Heterothallich</b> (⇔ Outcrossing): Pro Thallus beide Geschlechtstypen (beide Sporen) ⇔ entweder Bildung eines Ascogoniums oder Antheridiums
<b>Pa</b> <b>(<i>p. anserina</i>)</b>	<b>Pseudohomothallich</b> : bildet dikaryotische Sporen, die verschmelzen und Meiose durchlaufen.
<b>Sm</b> <b>(<i>s. macrospora</i>)</b>	<b>Homothallich</b> (⇔ Inbreeding): Pro Thallus nur ein Geschlechtstyp, der durch Selbstbefruchtung nur einen Typus beibehält. Ein Beispiel ist das <i>Mate-type-switching</i> bei Hefen, die damit mit eigenen Klonen sexuelle Befruchtung eingehen kann.

### Unterschiedliche Arten der Homothallie:

- ➔ Gibt Homothallie bei den Ascomyceten ➔ Braucht keinen anderen Thallus
- ➔ Idiomorphe Mating Type in verschiedenen Genen aber in einem Genom kombiniert ➔ Brauchen so kein Mating Partner mehr
- ➔ Hier hat man kein Outcrossing!
- ➔ «Selbstbefruchtung»
- ➔ Z.B. Pheromon mit seinem eigenen Rezeptor kompatibel (Durch Mutationen)
- ➔ Heterodimerisierung: Man muss es schaffen, innerhalb eines Pärchens eine Komplementation herzustellen -> Transkriptionsfaktoren kovalent miteinander verbinden

#### Two mating types in one nucleus

Two opposite MAT fused into one



Two unlinked, opposite MAT



Only one MAT present

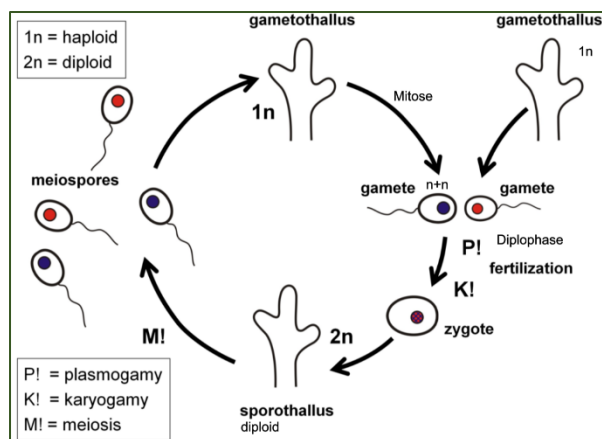


#### b Modes of homothallism

Mating type switching



Pseudohomothallism: two nuclei in one spore

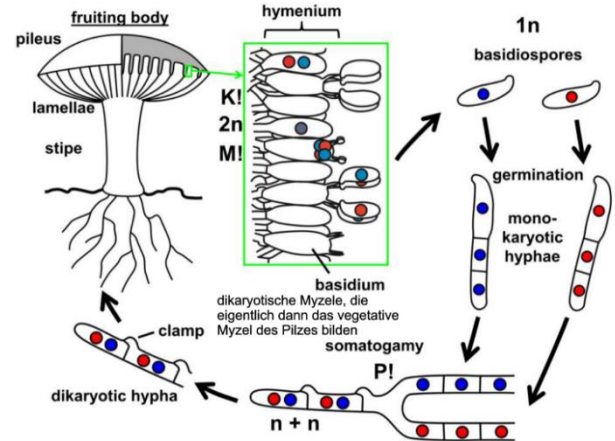


## BASIDIOMYCOTA

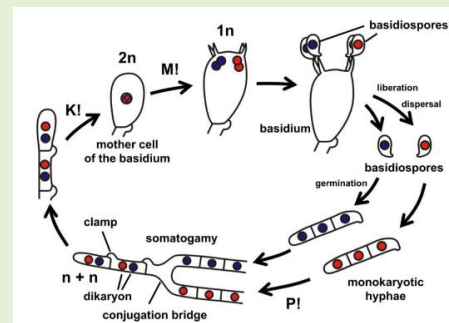
### GENERELLER REPRODUKTIONSZYKLUS VON AGARICOMYCOTINA

#### MERKE:

- Ausbildung von vier Basidiosporen
- Terminal an den Hyphen entsteht eine Zelle, wo Karyogamie stattfindet und die Zellkerne verschmelzen



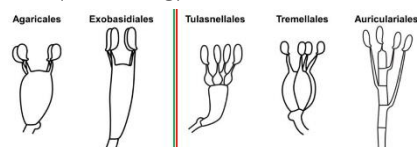
#### Oben: Beispiel I: Agaricomycotina



1. Basidiosporen reifen zu Hyphen und Mycel, welche durch Somatogamie dikaryotische Hyphen bilden.
2. Dik. Hyphen verflechten sich zu dichtem Netzwerk und bilden Fruchtkörper.
3. Fruchtschicht (Hymenium) aus zahlreichen Basidien (sporenbildende Zellen, Analogon zu Hakenzellen der Asci), in denen Karyogamie und anschließende Meiose stattfindet.

#### Basidienbildung bei Agaricales:

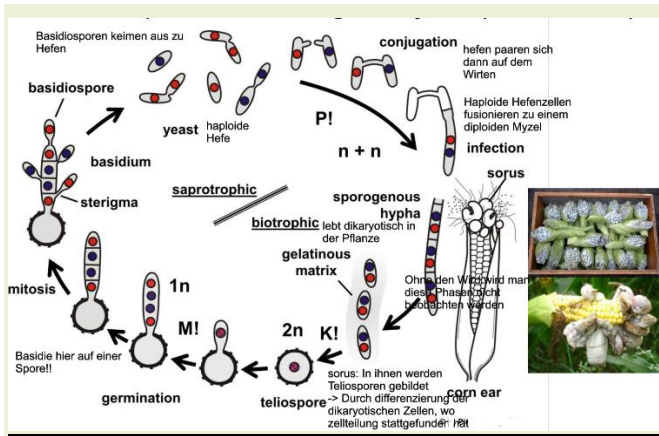
- Basidien= vier genetisch verschieden Sporen als Produkt der Meiose
- Es gibt Holobasidien(einzellig) und Heterobasidien(mehrzellig)!



Es gibt Ausnahmen, bei welchen die Basidiosporen nicht auf dem Myzel, sondern auf einer Spore gebildet werden

#### Beispiel II: Maisbrand (*Ustilago maydis*)





➔ Typisch pathogener Pilz: Verknüpfung zw. sexuellem Stadium und Infektion

**1. Phase innerhalb des Wirts:**

➔ Dikaryotische Hyphen infizieren Pflanze (**parasitisch**) und bilden darin robuste **Teliosporen (2n)** durch **Karyogamie**.

➔ Sporen **überwintern** und bilden im **Frühjahr** Basidien aus (keine Fruchtkörperbildung!)

**2. Phase ausserhalb des Wirts:**

➔ Bildung und Freisetzung weniger robuster Basidiosporien.

➔ Auskeimung zu **einzelligen Hefen** (leben **saprophytisch**), die nach Infektion des Wirts durch **Plasmogamie** wieder in Dikaryont eintreten.

**Merke:** Phase I kann nur beobachtet werden, wenn tatsächlich ein Wirt vorhanden ist.

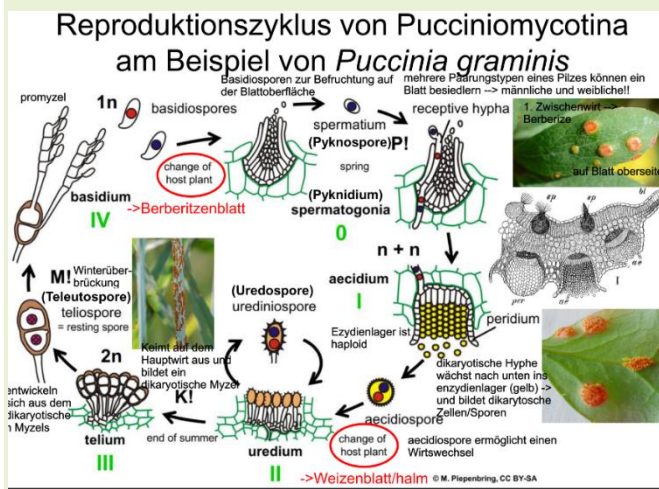
**Merke:** Parasitäre Pilze können die Form und das Wachstum ihres Wirts durch den Befall verändern (durch Hormonproduktion)

- Ausdehnung der Vegetationsbarriere
- Gewinnt Zeitraum zur Entwicklung, bevor der Hauptwirt vorhanden ist (dieser ist einjährig!)
- Insekten als Erhöhung der Befruchtungswahrscheinlichkeit (nur auf Berberitze)
- Überwinterung mittels Teliosporen

**GENAUER ABLAUF:**

1. **Infektion Berberitze:** Basidiosporen (1n) befallen Zwischenwirt und keimen an Blattoberfläche zu Pusteln aus. Diese bilden „männliche“ **Pyknosporen** und „weibliche“ Mycelien.
2. **Befruchtung:** Die männlichen Sporen werden durch **Insekten** von einer Pustel auf die nächste übertragen. Dort verschmelzen sie mit einer weiblichen **Empfängnis-hyphe** ⇒ dikaryotische Hyphe.
3. **Bildung von Aecidiosporen:** die befruchtete Hyphe dringt bis zur Blattunterseite vor und trifft dort auf ein **Peridium**, das dann **dikaryotische Aecidiosporen** freisetzt.
4. **Infektion Getreide:** Die Aecidiosporen ermöglichen den Wirtswechsel zum Hauptwirt, wo sie zu einem **dikaryotischen Mycel** und asexuellen (mitotischen) **Uredosporen** ausdifferenzieren. Diese können wiederum genutzt werden, um weitere Hauptwirtspflanzen zu befallen (⇒ räumliche Ausbreitung).
5. **Bildung von Teliosporen:** Kernfusion in dikaryotischem Mycel führt zur Ausbildung von **resistenten 2n Teliosporen** zur **Überwinterung**.
6. **Bildung von Basidiosporen:** **sexuelle (meiotische)** Sporen, die wiederum Wirtswechsel zu Zwischenwirt erlauben.

**Beispiel III: Pucciniomycotina**



➔ Obligat parasitischer Pilz

- 4 verschiedene Sporentypen
- Involviert einen Wirtswechsel → Hat obligat 2 Wirte (Berberitze und Getreidepflanze)
- **Vorteile des komplexen Zyklus:**

**ÜBERBLICK DER SPOREN:**

Zusätzlich neben der diploiden Spore werden noch zusätzliche Sporen gebildet:

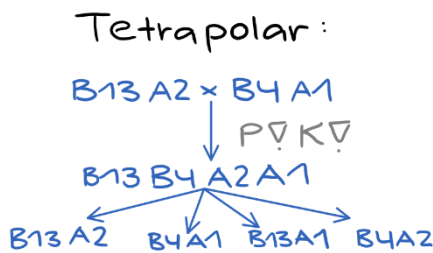
- **Basidiosporen** zur Befruchtung der Berberitze
- **Aecidiospore** ermöglicht einen Wirtswechsel
- **Uredospore** (dikaryotisch) wird auf dem Hauptwirt gebildet, ist eine asexuelle Art der Fortpflanzung → Dient nur für die Ausbreitung
- **Teliospore** zur Winterüberbrückung (vorhergehende Karyogamie und darauffolgende Meiose)

**TETRAPOLARE PAARUNGSTYPEN BEI BASIDIOMYCOTA**

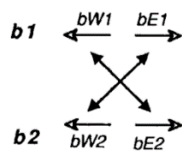
- Es gibt sowohl einen A- Paarungstyplokus als auch einen B-Paarungstyp Lokus! → abhängig von 2 Loci
- Homeotische Transkriptionsfaktoren und Pheromone Pheromon System
- Basidiomycota → Verschiedene Gene am gleichen Lokus
- Gene sind aber alle auf derselben Ebene → Sind alle am selben Ort (nicht hierarchisch versetzt)
- **Bedingung für eine Paarung:** Ich muss verschieden sein im A-Lokus als auch im B-Lokus!

**Abhängig von 2 Loci!**

- B2 A1 x B11 A2 geht
- B2 A1 x B2 A2 geht nicht
- B2 A1 x B11 A1 geht nicht --> Müssen verschieden sein!



- Man spricht von **multiallelen Paarungstypen**, d.h. die Individuen einer Art unterscheiden sich nicht in den Genen, sondern in den **Allelen eines Genlocus**.
- Es gibt also (Anzahl Loci A \* Anzahl Loci B) Paarungstypen (Die Anzahl verschiedenen Allele pro Lokus hat Einfluss auf das Ausmass des Outcrossing)
- Heterodimerbildung findet hier übers Kreuz statt

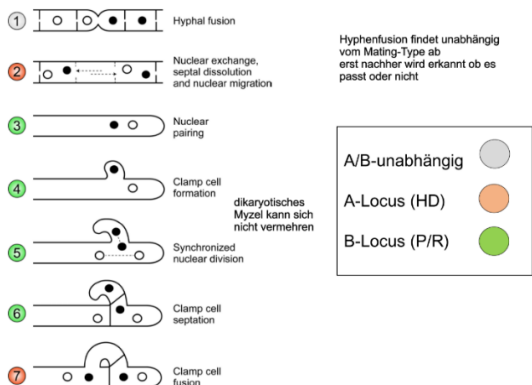


**Beispiel:**

- Ustilago maydis* → 33A \* 2B = 66 Paarungstypen
- Coprinopsis cinerea* → 160A \* 79B = 12640 Paarungstypen

	Bipolar	Tetrapolar
Inbreeding (=Inzucht)	50%	25%UM / 25%CC
Outbreeding (=Wk, sich mit einem genetisch unterschiedlichen Partner zu paaren)	50%	50%UM/ 99%CC

**Kompatibilität als Checkpoints der Verschmelzung:**

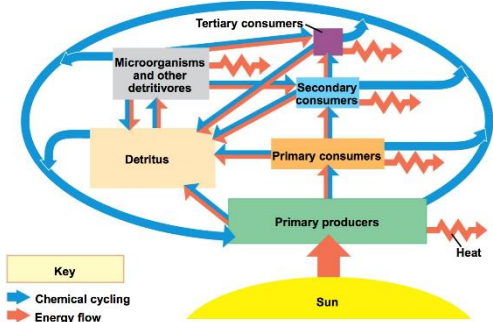


**Take home messages**

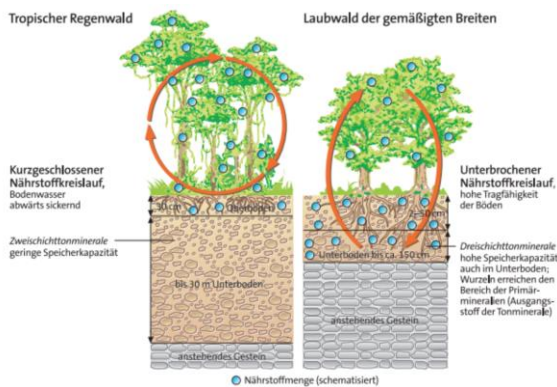
- Sexuelle Reproduktion erhöht die genetische Variabilität, ermöglicht eine Qualitätskontrolle des Genoms bezüglich Fremd-DNA und eröffnet eine Möglichkeit der Selektion
- Für Pilze ist die sexuelle Reproduktion oft nur fakultativ, da sie noch über die Möglichkeit der asexuellen Reproduktion verfügen
- Pilzliche Paarungstypen können bipolar (ein idiomorpher Sexlokus) oder tetrapolar (zwei unabhängige idiomorphe Sexloki) erzeugt sein
- Pilze sind in der Regel heterothallisch (Outcrossing), haben aber verschiedene Möglichkeiten der Homothallie (Selfing) entwickelt
- Die sexuelle Reproduktion bei Ascomycota und Basidiomycota beinhaltet in der Regel eine dikaryotische Phase
- Die sexuelle Reproduktion wird durch Umweltbedingungen beeinflusst, bei pflanzenpathogenen Pilzen ist sie in der Regel gekoppelt mit der Vegetationsperiode der Wirtspflanze

## ÖKOLOGIE DER PILZE

- Pilze sind neben anderen Mikroorganismen (Bakterien) die **wichtigsten Destruenten** → wandeln organischen **Detritus** (insb. reduzierten/organischen Kohlenstoff) in **anorganische Verbindungen** um → nun von Produzenten wiederverwertbar



## KURZGESCHLOSSENER KOHLENSTOFFKREISLAUF IM REGENWALD



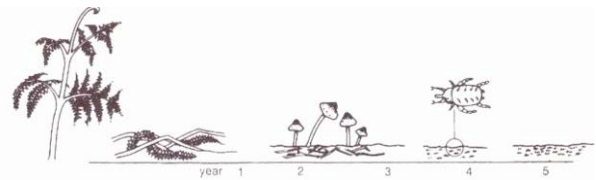
- ➔ Gesamtes Organisches Material ist in Form von Leben gespeichert (Nicht wirklich im Boden gespeichert, da dieses zu schnell vom Wasser herausgewaschen werden würde)
- ➔ Sehr schneller zersetzungsgrad führt zu direkter Wiederaufnahme

## SAPROPHYTEN:

### Spezialisierungen unter den saproben Pilzen:

Art	Spezialisiert auf...	Beispiel
Carbophile	Holzabbau bei Brandstellen	
Koprophile	tierische Exkremente	
Amentikole	Laubholzkätzchen	

## Zeitliche Rahmen der Destruktion:

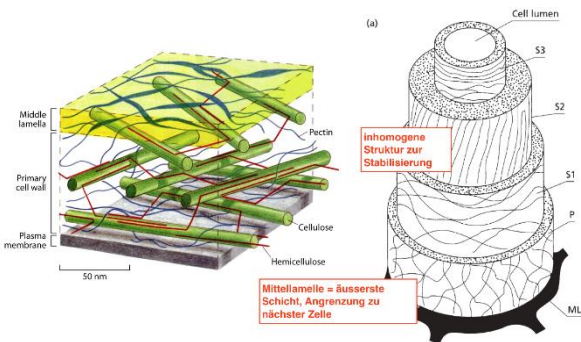


Die Destruktion eines Farns kann über 5 Jahre dauern...

- Nach 3 Jahren ist 50% der Cellulose abgebaut
- Nach 4 Jahren ist 50% des Lignins abgebaut
- Nach 5 Jahren erfolgt letzter Abbau durch andere Mikroorganismen, nicht mehr durch Pilz

## Holzabbau:

- Die Zellwand besteht aus einer primären und einer sekundären Zellwand
- Sie hat strukturell unterschiedliche Cellulose-Schichten
- **Mittellamelle** = äusserste Schicht die an die nächste Zelle grenzt



Die Hauptbestandteile von Holz sind:

<b>Cellulose</b>	40-50%	⇒ Polysaccharid aus Glucose ⇒ in Zellwand
<b>Hemicellulose</b>	25-40%	⇒ Heterogene Gruppe aus Polysacchariden, nicht nur Glucose ⇒ in Zellwand & verholzten Geweben ⇒ schwerer durch Pilze abzubauen, da mehrere spezialisierte Abbauenzyme nötig
<b>Lignin</b>	18-35%	⇒ komplexes 3D-Polymer aus Alkoholen ⇒ In Gefäss- & Sklerenchymzellen (Stützzellen) ⇒ komplexer, u.a. oxidativer, langer Abbau durch verschiedene Enzyme ⇒ kann nicht als alleinige C-Quelle genutzt werden

## Verschiedene Arten des Holzabbaus (Holzfäule)

### a) Moderfäule



→ Wenn das Holz permanent genässt ist

- Ochsenzunge, Riesenporling, versch. Schimmelpilze

### b) Braunfäule



- Schwefelporing oder Hausschwamm

### c) Weissfäule

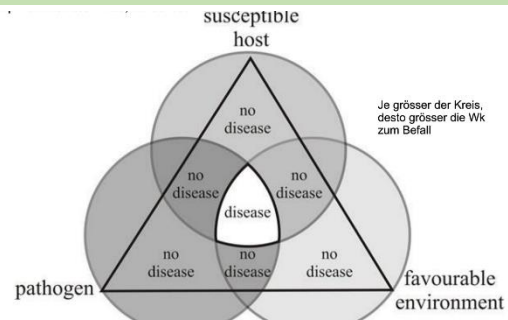


→ faserig: Zuerst wird das Lignin abgebaut. Der Cellulose Abbau ist noch nicht fortgeschritten, wodurch faserige Strukturen erkennbar werden

- Holzkeule, Austerseitling, Zunderschwamm, **Hallimasch** → Kann sehr aggressiv sein und auch Lebendige Bäume angreifen!

## ANTAGONISTISCHE SYMBIONTEN

### DAS DREIECK DES PARASITISMUS



→ hängt von 3 Faktoren ab:

- **Wirt Empfänglichkeit:** muss für den Pilz/ die Infektion empfänglich sein (Empfindlichkeit des Wirtes, wie schwach ist ehr?)
- **Pilz muss Faktoren mitbringen:** Interaktion mit dem Wirt ermöglichen
- **Umweltbedingungen:** Führt nicht immer zur Krankheit, → wie sind die Bedingungen

## 2 ARTEN VON PHYTOPATHOGENEN PILZEN

### Biotroph

- Wirt zeigt **wenig Symptome**
- So eingespielt, dass der Pilz zwar dem Wirt Kohlenstoff entziehen kann, der Wirt allerdings **nicht stirbt**
- Pilz ist auf den Wirten angewiesen → **obligat biotroph**
- Möchte den Wirt nicht töten! → Befällt nur spezifische Organe
- Haben keine Sarkrophobe Phase mehr!

### Nekrotroph

- Absterben der Wirtspflanze
- grosser Schaden
- Erhebliche Produktion von Toxinen
- Niedrigere Spezifität → **opportunistisch biotroph**

Beispiele: Getreideschwarzrost, Getreidemehltau

	Biotroph	Nekrotroph
<b>Abtötung Wirtszellen</b>	sehr langsam	schnell
<b>Produktion von Toxinen, cytolytischen Enzymen</b>	minimal	erheblich
<b>Bildung von parasitischen Strukturen (Haustorien)</b>	ja	nein
<b>Wirtsspezifität</b>	hoch	niedrig
<b>Organspezifität</b>	hoch	gering
<b>Befallene Gewebe/ Pflanzenteile</b>	gesunde Pflanzenteile in allen Entwicklungsphasen	junge, geschwächte, senescente Pflanzenteile
<b>Hyphenwachstum</b>	Inter- und intrazellulär, systemisch	interzellulär, beschränkt auf bestimmte Pflanzenteile
<b>Axenisches (saprobes) Wachstum</b>	in der Regel unmöglich (obligat biotroph)	möglich (fakultativ/opportunistisch biotroph)

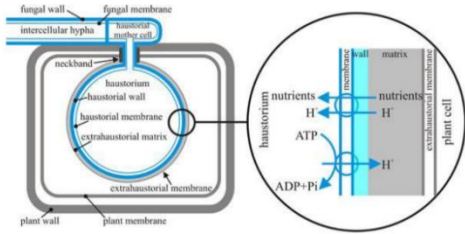
**HAUSTORIEN**

**Hyphenwachstum**

**Biotroph:** Inter- und intrazellulär, systemisch obligat biotroph

**Nekrotroph:** interzellulär, beschränkt auf bestimmte Pflanzenteile

- obligat biotrophe Pilze ernähren sich via Haustorien
- Apressorien sind aber nicht spezifisch für obligat biotrophe Pilze → Viele andere bilden diese auch aus



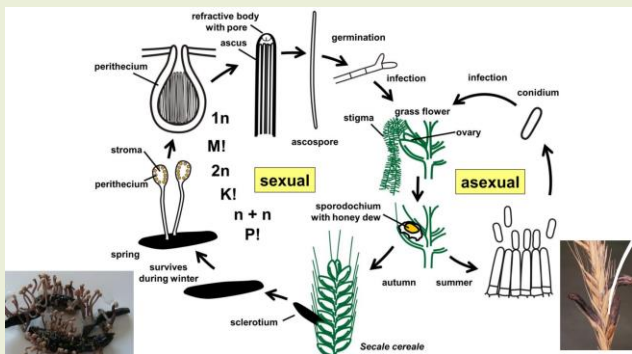
- Pilz ist darauf angewiesen, dass die Pflanze Nährstoffe in diesen Zwischenraum entlässt
- Austausch bzw. Aufnahme der Nährstoffe mittels aktiven ATPasen, welche einen Protonengradienten erzeugen

**PHYTOPATHOGENE PILZE IN DER LANDWIRTSCHAFT**

→ Pilzinfektionen hatten mehrfach grosse Auswirkungen auf den Menschen

**Beispiel I: Claviceps purpurea (Mutterkorn)**

→ Auslöser von Ergotismus (Heiliges Feuer, Antoniusfeuer)



- Ist ein **Ascomycet**
- **Sklerotien:** setzen viele Toxine frei (Schutz gegens gefressen werden)
- **Perithecium:** Pausenüberbrückung mittels dieser Strukturen → produzieren dann die Ascosporen
- **Symptome:**
  - Gefäßkonstruktion: Keine Durchblutung der Extremitäten mehr (können abfallen)
  - Können Wehen auslösen (Daher der Name Mutterkorn)
- **Kupfersulfat** als Fungizid

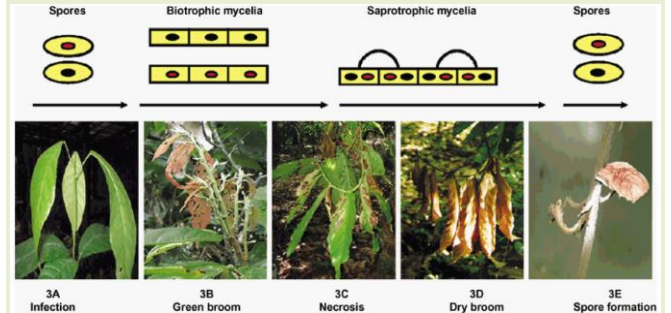
**Beispiel II: Moniliophthora perniciosa**

→ Erreger der "Witches Broom Disease (Hexenbesenkrankheit)" der Kakaopflanze

- Ist ein Basidiomycet
- **Pflanzenteile sterben ab**
- Fruchtkörperbildung auf den abgestorbenen Pflanzenteilen → Weiterverbreitung des Pilzes



**Krankheitsverlauf:**



**Beispiel III: Fusarium oxysporum**

→ Erreger der Panama-Krankheit der Banane

- Ascomycet, nekrotroph
- Bananen die wir anbauen sind **triploid und asexuell** → Sind alles **Klone!** Monokulturen als Klone sind sehr anfällig für Pilze, da keine Resistenz ausgebildet werden kann

**Beispiel IV: Hymenoscyphus fraxineus**

→ Auslöser des Eschensterbens

- Nord-, Ost- und Mitteleuropa
- Basidiomycota
- 80-90% aller Eschen sind befallen! Nur ca. 10 Prozent sind resistent → Folgen werden einen **massiven Einfluss auf das Ökosystem** haben!



**PILZLICHE PATHOGENITÄTS/VIRULENZFAKTOREN**

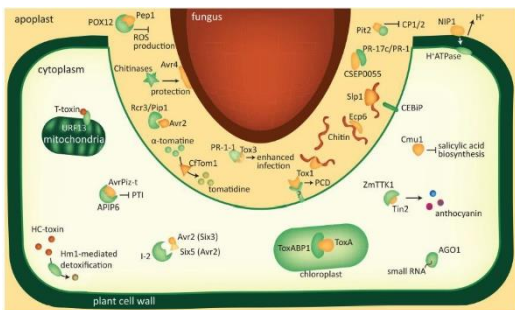
- **Penetration/ Überwindung mechanische Barrieren:**
  - Cutinasen (= Enzym, welches die Esterbindung des Cutins in der Cuticula der Pflanzen abbaut → Pilz kann so in die Pflanzen eindringen)
  - Infektionsstrukturen (Apressorien, Infektionskissen)
  - CWDE (Cellulasen, Xylanasen, Pektinasen, β-1,3-Glucanasen)
  - Proteasen
- **Toxine:**
  - Abtötung/Schwächung der Wirtszellen
- **Effektoren/Suppressoren:**
  - Modifikation/Suppression der Wirtsabwehr:
- **Überwindung der chemischen Abwehr des Wirtes:**
  - Abbau, Transport
- **Bildung/Abbau reaktiver Sauerstoffspezies (ROS)**

**PFLANZLICHE ABWEHR GEGEN PHYTOPATHOGENE PILZE**

Konstitutiv		Induziert	
Physikalisch	Chemisch	Physikalisch	Chemisch
Wachs, Kutikula, Borke	Oberflächen pH	Lignifizierung	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ROS)
Zellwand	Enzyminhibitoren	Abszission	Toxine
Kasparischer Streifen (Endodermis)	Toxine	Korkbildung	Enzyminhibitoren
		Harzbildung	Hypersensitivität: Induktion von programmiertem Zelltod

- Einige Pflanzen lassen ganze Pflanzenteile oder befallene Zellen absterben → Versuch, die Ausbreitung des Pilzes zu verhindern

**EFFEKTOREN VON PFLANZENPARASITEN**



- Molekulare Interaktion kann im Zwischenraum (zwischen dem Pilz und der Pflanze) stattfinden, oder aber der Pilz schafft es, Proteine ins Pflanzeninnere zu schaffen und dort z.B. die Abwehr der Pflanze zu schwächen.

**→ Pilze können Proteine und RNAs bilden, die die Pflanze beeinflussen**

- Beispiel - Maisbrand: Der Pilz setzt kleine sekretierte Proteine (SSPs) als Effektoren frei
- Beispiel – Grauschimmel: Der Pilz setzt kleine RNAs (sRNAs) als Effektoren frei → Veränderung der Physiologie von Pflanzenorganen

**TIER- UND HUMANPATHOGENE PILZE:**

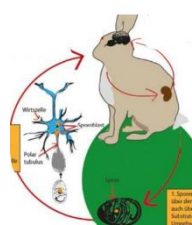
**→ Mikrosporidien = Obligat intrazellulärer Parasiten**

**Beispiel I: Obligat intrazellulärer Parasit** → kann nur im Wirt überleben → existiert ausserhalb des Wirtes nur als Spore

- Einziger Pilz, der im Tier obligat ist
- Sehr primitiver Pilz: Unizellulär
- Spore enthält ein "Harpune", welche ausgeschleudert wird und so den Zellkern und andere Organellen in den Wirten injiziert

**Symptome:**

- Verlust an GGW (Kopf wird schräggehalten)
- Kann ins Hirn gehen



**→ Ophiocordyceps sp. = Insektenpathogene Pilze**

**Beispiel III: Ophiocordyceps unilateralis (links)**

→ Erreger von den 'Zombie Ameisen'



**Beispiel IV: Ophiocordyceps sinensis (rechts)**

→ das Gold des Himalayas

- Apressorien verbreiten sich über das Gefässsystem der Tiere
- Pilz bildet sekundären Metaboliten, welcher Verwendung in der Medizin findet → 700000.-/kg

**BEFALL BEIM MENSCHEN:**

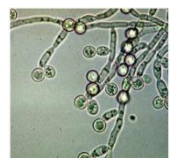
**Mykose = Pilzinfektion**

- Die meisten sind Ascomyceten, es gibt aber auch Basidiomyceten und Zygomyceten

**Beispiel IV: Candida albicans**

→ dimorphe Hefe mit Tier- und Humanpathogenem Potential

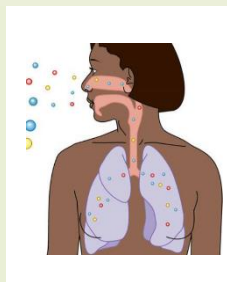
- Diesen Pilz haben wir natürlich in uns → Wenn der Pilz es aber schafft, die natürliche Abwehr zu überbrücken, breitet er sich aus (typisch bei Schwächung des Wirtes)
- Im Wirt drin wächst er filamentös → So kann er sich ausdehnen (Einzelne Zellen eignen sich zum Verbreiten, Filamente zur Ausbreitung/Durchdringen des Wirtes)
- Der Pilz kann aber auch wieder zu Hefen auskeimen → nur ein Teil verbreitet sich weiterhin filamentös.



**Beispiel V: Aspergillus fumigatus**

→ Schimmelpilz mit tier- und humanpathogenem Potential

- hat keine Hefephase
- Ausbreitung mittels Chrymopodien → Typisch für Ascomycoten
- Sporen sind sehr klein und können durch mehrfaches Einatmen in die Lungen gelangen und sich dort ausbreiten
- Kann auch das Gehirn befallen



## ANGRIFFSPUNKTE DES PILZES

### Problem an Pilzinfektionen:

- Wir können kein Antibiotikum einsetzen
- Pilzzellen sind sehr ähnlich mit unseren Zellen → Wie können wir den Pilz angreifen, ohne dass der Wirt angegriffen und geschädigt wird?

### Unterschiede des Pilzes werden zu Angriffspunkten:

- Zellwand und Pilzmembran als Angriffspunkt
- Azole, Polyene und Echinocandine und Pyrimidine
- haben andere Steroide → Ergosterol → Eingriff in die Biosynthese des Ergosterol als effizienter Eingriff

### Des Weiteren:

- **Mykoparasiten** (z.B. *Trichoderma* sp.) als biologische Fungizide gegen pflanzenpathogene Pilze und Bakterien

## MUTUALISTISCHE SYMBIONTEN

- Flechten → Algen und photosynthetische Bakterien
- Mykorrhiza und Endophyten → mit Pflanzen
- Mutualistische Symbiosen → mit Tieren
- Mutualistische Symbiosen mit Bakterien

## FLECHTEN

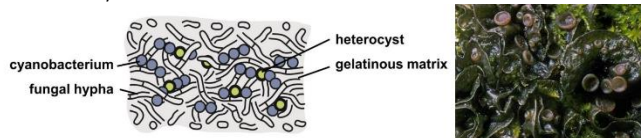


- **Mycobiont**
  - Ca. 99% sind Ascomycoten
  - sind auch wenige Basidiomycota Arten bekannt
  - Können obligat oder fakultativ sein (viele haben sich aber spezialisiert und sind somit obligat)
- **Photobiont**
  - Photosynthetisch aktiver Partner
  - 85% Grünalgen
  - 10% Cyanobakterien
  - 5% enthalten sowohl Grünalgen als auch Cyanobakterien (dreiteilige Flechten)
  - Sind fakultativ symbiontisch

### 3 Typen von Flechten:

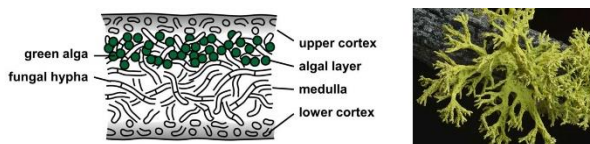
#### Cyanobakterienflechten (cyanolich):

→ Pilz & Cyanobakterien



- Heterozysten: Cyanobakterien bilden zusätzlich spezialisierte Zellen aus, welche in der Lage sind, Stickstoff zu fixieren
- Endknöpfchen der Hyphen interagieren mit Cyanobakterien → Endstellen als Austauschkontaktstellen

#### Algenflechten (chlorolich) → Pilz und Alge



- Algen sind oft schichtartig aufgebaut und befinden sich meist auf der obersten Schicht → Lichtzugang
- Nährstoffübertragung mittels Kontaktstellen

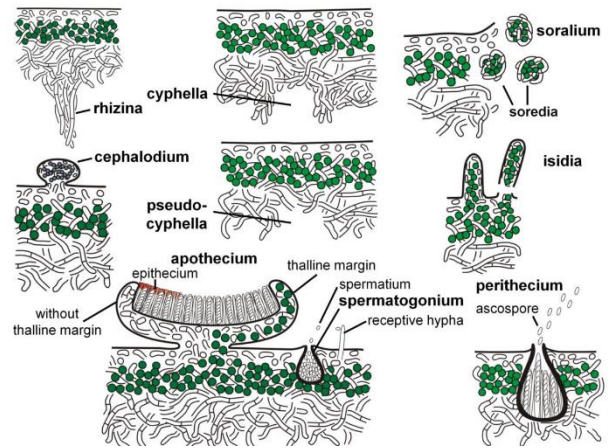
#### Dreiteilige Flechten:

- Pilz, Alge und Cyanobakterium
- Cephalodia besteht aus dem Pilz, den Chlorolichen (Algenteil) und Cyanolichen (Bakteriumteil)

#### Invasion durch andere Mycobionten:

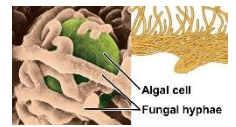
- Es gibt Pilze, die Flechten invasieren
- Bsp: *Cladonia* durch *Diploschistes*

### Spezielle Strukturen:



**Apothecium & Perithecium:** sexuelles Fortpflanzungsorgan (wie bei Ascomycoten) → Problem: Bei der sexuellen Fortpflanzung werden die Photobionten nicht mit verbreitet! → werden nicht in die Ascis-Sporen integriert!

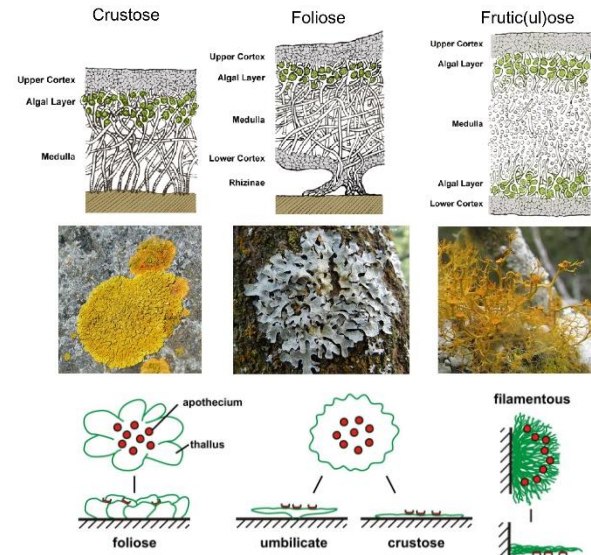
**Soralium und Isidia:** Spezielle Strukturen die der asexuellen Verbreitung dienen → Bestehen sowohl aus Myco- & Photobiont



**Rhizina und Cyphella:** Ermöglichen eine gute Belüftung → oft auf der Unterseite

**Cephalodium:** Bei einer 3er Gemeinschaft werden Blasenartige Strukturen ausgebildet, worin die Cyanobakterien eingebettet sind

### Thallusformen



### Nährstoffaustausch:

Pilz ist interessiert am reduzierten Kohlenstoff, liefert der Pflanze dafür aber Mineralien und Wasser

### EXKURS:

Flechten kommen in der Stadt nur selten vor, in den Bergen dafür häufiger, WARUM?

- Flechten beziehen alle Nährstoffe aus der Luft → Sie sind also sehr empfindlich auf die Luftqualität → Flechten als Bioindikatoren der Luftqualität



**Holobiontische Flechten:**

Algenflechten schliessen ausfolgenden Gründen oft noch zusätzliche Symbionten (Bakterien oder Algen) mit ein:

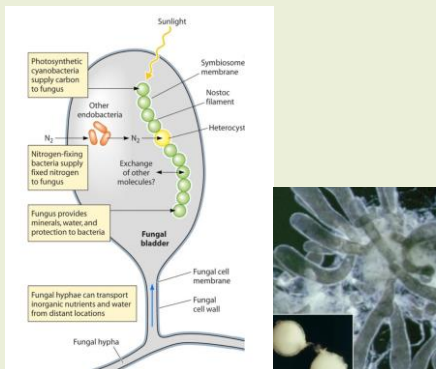
- N<sub>2</sub>-Fixierung (nur Alge + Pilz → Stickstoffquelle fehlt → Gemeinschaft noch mit Stickstofffixierenden Bakterien erweitern!)
- Produktion von Abwehrstoffen
  - Toxinproduktion (Bei Cyanobakterienflechten dabei → diese sind starke Toxinbildner)
  - Volatile= Geruchsstoffe
  - Antibiotika
- Mineralien (Schafft aber oft der Pilz her)
  - Phosphate, Nitrate
- Pflanzenhormon und Vitamin Produktion

**Spezielle Flechte:**

**Glomeromycota** mit intrazellulären **Cyanobakterien**

*Geosiphon pyriformis* (Glomeromycota) + *Nostoc punctiforme*

- Hier sind der Mycobiont und Photobiont **ineinander**
- Pilz genügt sich nicht dabei, das Cyanobakterium in einen Körper einzubinden, sondern er nimmt es in die Zellen auf!
- Glomeromycota: Einverleibung als Eigenschaft dieser Pilze, die man bei Basidiomycota und Ascomycota nicht gefunden hat



→ Cyanobakterien sind in kleine Blasen eingebettet. Sie liegen also nicht direkt im Cytoplasma, sondern werden durch Pilzmembrane umhüllt

**Pilzsymbiose mit Pflanzen**

**MYKORRHIZA**

Mykorrhiza= Symbiose zwischen Pilz und Pflanze

*Mycor-* =Pilz-  
*Rhiza* = Wurzel

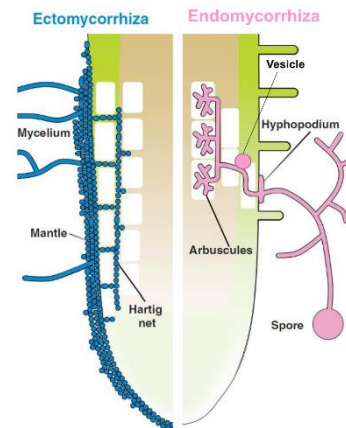
→ **Pflanzenexterner Teil des Pilzes ist sichtbar**

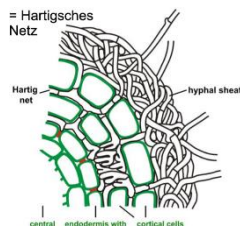
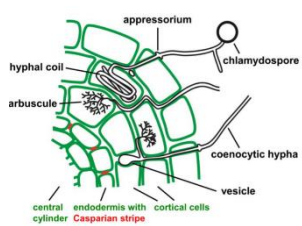
**Evolutive Grundlage:**

- Pflanzen evolvierten sich (aus einzelligen Algen) aus dem Wasser und wurden multizellulär an Land  
→ Die Pflanzen **brauchten einen Symbionten zur Besiedlung des Landes**
- Hypothese: Ohne das Eingehen mit einer Symbiose mit einem Pilz hätten die Pflanzen das Land nicht besiedeln können (oder nicht multizellulär werden können)

- Hypothese II: Die Symbiose hat auch den Pilz an Land gebracht
- Fast alle Pflanzen gehen heutzutage Symbiosen ein
- Pilze: Oft saprotrophisch lebend=
- **Im Carbon:** Saprotrophe Pilze hatten noch keine Holzabbauenden Enzyme → Kohlenablagerung im Carbon
- Pilze die obligat symbiontisch leben, entwickelten keine Enzyme, um Pflanzenmaterial abzubauen → diese sind nicht notwendig oder sogar schädigend! (Holzabbauende Enzyme haben also nur die Saprotrophisch lebenden Pilze)

**2 Haupt-Arten der Mykorrhiza:**



<b>Ektomykorrhiza (ECM):</b>	<b>Endomykorrhiza (VAM, AM):</b>
Mycel ist sehr gut erkennbar → Hyphen bilden ein Netzwerk um die Pflanzenwurzel herum → <b>Mantelbildung</b>	<i>vesikuläre arbuskuläre Mykorrhiza</i> Es wird <b>keinen Mantel</b> ausgebildet
Pflanze bildet keine Wurzelhaare mehr aus → Ausbildung eines <b>Hartigischen Netzes</b> 	Pflanze bildet weiterhin Wurzelhaare aus 
Pilz geht nur bis in die <b>Zellzwischenräume</b>	Ausbildung von <b>Arbuskeln</b> → Eindringen des Pilzes in die Pflanzenzelle hinein
sehr spezifisch für <b>verholzte Bäume</b> (Heute die meisten Bäume)	Grundform der Mykorrhiza → Evolutiv zuerst entstanden
Asco- und Basidiomycota	Glomeromycota
Pilz ist <b>nicht obligat</b> angewiesen	Pilz ist <b>obligat</b> angewiesen Die Pflanze aber nicht
Typische Vertreter: Fliegenpilz, Steinpilz, Trüffel	

Sieben verschiedene Arten von Mykorrhiza:

Mycorrhizal type	Typical host plants	Fungi involved	Major significance
Arbucular mycorrhizas	Many <b>typische Endomykorrhiza</b>	Glomeromycota	Phosphor <b>aufnahme</b> Phosphorus uptake from soil
Ectomycorrhizas	Forest trees, mainly in temperate and boreal regions	Basidiomycota, Ascomycota	Nitrogen uptake from soil <b>Stickstoff und Wasser</b>
Ectendomycorrhizas	Mainly pines, spruce, and larch	Ascomycota of the genus <i>Wilcoxina</i>	Mineral nutrient uptake from soil
Arbutoid mycorrhizas	<i>Arctostaphylos</i> , <i>Arbutus</i> , <i>Pyrola</i>	Basidiomycota, similar to ectomycorrhizal fungi	Mineral nutrient uptake from soil
Monotropoid mycorrhizas	Nonphotosynthetic plants, e.g. <i>Monotropa</i>	Basidiomycota such as <i>Boletus edulis</i>	Plants obtain sugars from ectomycorrhizal fungi attached to trees
Ericoid mycorrhizas	Heathland plants. <i>Erica</i> , <i>Calluna</i> , etc.	Ascomycota and mitosporic fungi; <i>Hymenoscyphus ericae</i>	Nitrogen uptake from soil
Orchid mycorrhizas	Orchids	<i>Rhizoctonia</i> -like fungi (basidiomycota)	Fungi supply the plant with sugars

- Orchid Mykorrhiza sind sehr Wirtsspezifisch
- EM und AM Mykorrhiza sind nicht stark spezialisiert

Erikoide Mykorrhiza:

- Spezieller Typ einer Endomykorrhiza
- Keine Arbuskeln, sondern **knollenartige Gebilde**, die in den Pflanzenzellen drin sind

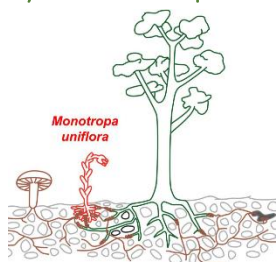


Orchideen Mykorrhiza:

- Spezielle Art der Mykorrhiza
- Pflanze unterwirft sich dem Pilz**  
→ Orchideen bilden Samen, welche keine Nährstoffe tragen → Müssen sich dem Pilz unterwerfen, um auskeimen zu können! (Ohne den Pilzpartner, würden die Samen also nicht auskeimen)
- Hier holt die Pflanze den reduzierten Kohlenstoff des Pilzes und nicht umgekehrt!! (Zumindest zu Beginn)
- Später ist der Pilz in den Luftwurzeln gespeichert



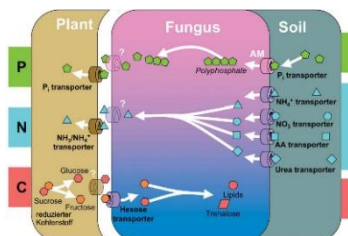
Auf Mykorrhiza Pilzen parasitierende Pflanzen:



- Noch extremere Angewiesenheit von Pflanzen
- Diese Pflanzen zapfen die unterirdischen Netze der Mykorrhiza an → Betreiben selber keine Photosynthese mehr (haben kein Chlorophyll)
- Parasitieren also eigentlich die andere Pflanze

Funktionen von Mykorrhiza:

- Nährstoffaustausch:** (Mittels Transporter) Pilz liefert **Phosphat** und **Stickstoff**, die Pflanze **Kohlenstoff** (in Form von Kohlenhydraten oder **Fettsäuren**)



→ Pilzhypen sind ideal geeignet, um Wasser und Mineralien aus dem Untergrund zu sichern

- Abwehr von Pflanzenparasiten:** können auch Toxine bilden → Schutzfunktion  
(Pilz ist auch in einem geschützten Umfeld)

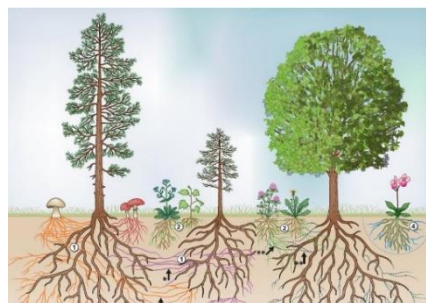
- Bilden ein **Kommunikationsnetz:**

The «wood wide web»

- Waldboden ist durchsetzt von Mykorrhizen Netzen → Bilden ein gewaltiges Kommunikationsnetzwerk
- (Pilz muss auch Kohlenstoff (Glucose) abgeben, sonst wäre es kein Netz) → Also auch umgekehrte Glucosefluss

→ Pilzmykorrhizen ermöglichen also:

- Allgemein: Signaling und Pflanzenkommunikation
- Unterirdischer Kohlenstoffhandel und Nährstoffaustausch zwischen Bäumen
- Koordination der Pflanzenabwehr



Etablierung der Mykorrhiza Symbiose:

Beim Aufbau einer Mykorrhiza findet eine chemische Kommunikation statt, sodass ein Pilz eine Pflanze besiedelt

**Signalfaktoren:**

**Pflanze:** schüttet Strigolactone aus → Pilz wächst in Richtung der Pflanze

**Pilz:** Schüttet Myc-Faktoren aus (Lipochitooligosaccharid) → Verändert die Struktur der Pflanze → Pilzproteine manipulieren Pflanzenproteine auf molekularer Ebene

**(Bakterien (Rhizobien):** schütten Nod-Faktoren aus und reagieren auch auf die Strigolactone der Pflanzen)

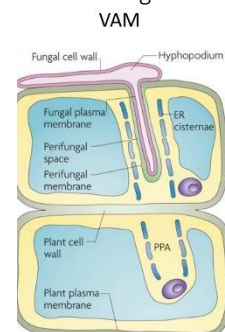
- Pathway ist nötig, um **Abwehrreaktionen zu verhindern** und **für die Symbiose vorzubereiten**

**Wurzelkolonisierung: bei der VA-Mykorrhiza**

- Pilze dringt mittels Hyphe in die Pflanze hinein
- die Pflanze legt eine «Strasse» frei, um das Eindringen der Hyphe zu erleichtern

**PPA: prepenetration apparatus**

(EC-Mykorrhiza noch nicht erforscht)



**PILZLICHE ENDOPHYTEN**

Endo= in der  
Phyt= Pflanze

➔ **KEIN pflanzen-externer Teil des Pilzes sichtbar**

- Kein Phänotyp erkennbar
- Sind ganz in der Pflanze drin!

**Pilzliche Endphyten im oberirdischen Pflanzenteil:**

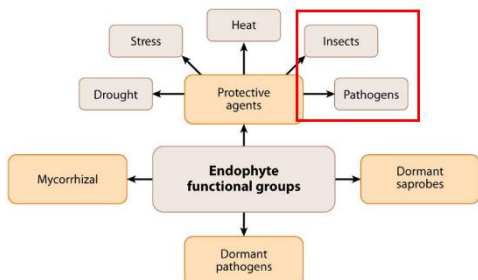
- Viele Gräser machen solche Symbiosen
- Scheint vorteilhaft zu sein, werden sogar in die Samen miteingebaut
- Hyphen sind in der Pflanzenzelle drin, ohne hinweise auf Oberflächenvergrößerung
- Dieselbe Pflanze kann von verschiedenen Pilzen besiedelt werden ➔ Keine hohe Spezifität

**Endophyten im Wurzelbereich**

- Keinen Mantel um die Wurzel herum
- Keine Arbuskeln
- Hyphen sind erkennbar

**Funktionen**

- Starke Toxinfreisetzung ➔ Abwehrleistung
- Nährstoffkomponente
- Schütten antifungale Stoffe aus



The most likely sequence of events in the evolution of **balanced mycorrhizas** from an endophytic fungal association is:

- 1 Hyphal adaptations for efficient absorption of substrates from the plant result in increased leakage of mineral nutrients to the host.
- 2 Plants containing fungi acquire limiting mineral nutrients more efficiently from hyphae within them than by other means.
- 3 Plants evolve recognition mechanisms to distinguish mycorrhizal fungi from pathogens.
- 4 Specialised plant and fungi cells develop an interface zone where exchange occurs.
- 5 Plants begin to digest older fungal structures within cells.
- 6 Fungal hyphae increase their capacity to acquire the soil nutrients that limit plant growth.
- 7 The plant becomes obligately mycorrhizal, requiring the fungus for growth at normal soil fertility levels.
- 8 The fungus becomes fully dependent on the plant as a food source.
- 9 Plants evolve to become more efficient at mycorrhizal formation.

**Entwicklung der Mykorrhiza**

- *Endophyten vielleicht als Zwischending/ evolutionäre Vorstufe?*

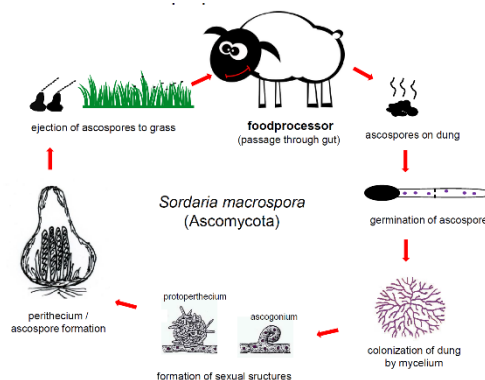
Events in the first stage of mycorrhizal evolution (**development of endophytes**) are summarised below.

- 1 Fungi attracted by exudates proliferate on the surface of plants.
- 2 Fungi develop mechanisms for penetrating living plants without causing harm to their hosts.
- 3 The space within living plant cells becomes an important habitat for these **endophytes**, providing them with shelter from adverse soil conditions, parasitism and predation.
- 4 Fungi become dependent on the host for energy.
- 5 Absorptive hyphae within plants increase their surface area and permeability.

**Mutualistische Symbiosen mit Tieren**

**KOPROPHILE PILZE = DUNGPIILZE**

- Wachsen bevorzugt auf Kot (von Pflanzenfressern)
- Treten in bestimmter Reihenfolge auf:
  1. schnell wachsende, zuckerwertende Pilze ➔ Zygomycota
  2. cellulosewertende- und andere Schlauch Pilze ➔ Ascomycota
  3. ligninwertende Ständerpilze
  4. ➔ Basidiomycota



**Pilobulus Pilze:** können Larven von Nematoden enthalten, die dann dem Wirten schaden

**PILZSPORENVERBREITUNG MITTELS TIEREN**

- Oft Ascomycoten

**Bäckerhefen** können im Darm von Fruchtfliegen überleben ➔ Zellwände sind sehr robust

**NAHRUNGSAUFBEREITUNG**

**Lignocellulose als Nahrung:**

- ➔ Tiere (vor allem Chordata) sind auf Symbiosen angewiesen, um Lignocellulose als Nahrung nutzen zu können
- ➔ *Pflanzen entwickeln oft Toxine, um sich vor dem gefressen werden zu schützen ➔ Tiere müssen sich sehr spezifisch anpassen (Oft macht dies der Pilz für sie)*

**Beispiel 1: Borkenkäfer (auch Ambrosienkäfer genannt)**

Weibchen legen ihre Eier ins Holz ab und daneben noch Sporen eines Pilzes (*Ascomycota*) ➔ Larven sind darauf angewiesen, Holz als Nahrung zu nutzen und gehen somit eine Symbiose mit diesem Pilz ein

- Pilz profitiert dadurch, dass er einfach in Holz gelangt und eine gute Umgebung zum leben findet.

Larve profitiert dadurch, dass sie sich vom Pilz ernähren kann (und nicht vom Holz!)

**Beispiel 2: Wiederkäuer**

Anaerobe Pilze (*Chytridiomycota*) im Kaumagen (Rumen) von Wiederkäuern

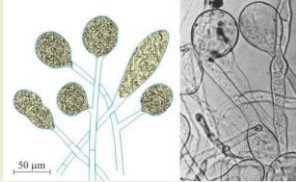
→ Helfen bei der Verdauung von Cellulose  
(mittels Fermentation)

**Beispiel 3: Blattschneiderameisen**

Bauen eine Vorratskammer, wo sie den Pilz züchten

→ **Pilzgarten**

Bringen diesem Pilz Nahrung (Blätter) und ernähren sich dafür von den **Gongyliiden (Bromatien)** des Pilzes



Gongyliiden als Differenzierung des Pilzes

→ sind reich an Zucker

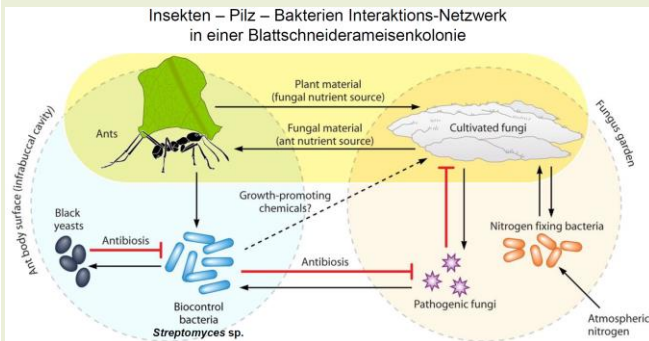
**Vorteil Pilz:** Bekommt Nahrung und hat ein angenehmes Klima/Umgebung

**Symbiose wird durch Bakterien ergänzt:**

Antibiotikaproduzierende Streptomyces leben auf der Oberfläche der Ameise → bilden Schutzmantel → schützen vor entomopathogenen Pilze

WICHTIG: sollen den Pilzgarten nicht angreifen, pathogene Pilze aber abwehren → müssen sehr spezifisch sein

Im Pilzgarten hat man neben **Streptomyceten**, die den Pilzgarten sauber halten, aber noch **stickstofffixierende Bakterien**, die das Wachstum des Pilzes ermöglichen



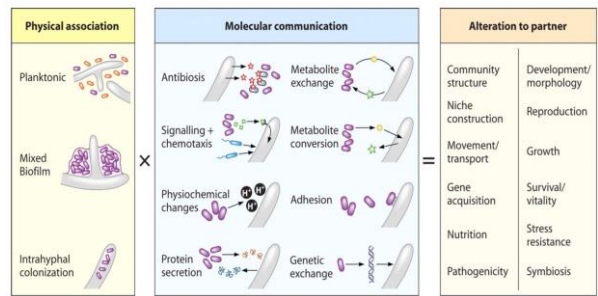
**FAZIT:** Ameisen kultivieren neben dem Pilz und noch Bakterien, welche den Pilzgarten sauber halten & stickstofffixieren

**Beispiel 4: Termiten**

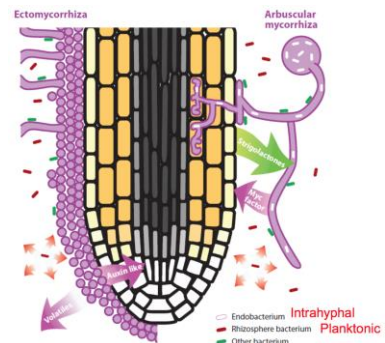
- Bakterien in ihrem Darm, die ihnen helfen, hartnäckiges Pflanzenmaterial abzubauen

**Mutualistische Symbiosen mit Bakterien:**

- Kommunikation über **physischen Kontakt** und **molekularen Austausch**, was zu einer charakteristischen Symbiose Beziehung führt (feindlich oder mutualistisch)



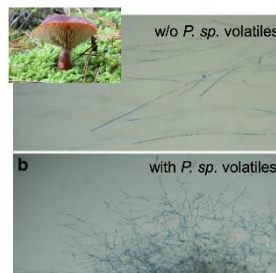
**INTERAKTION ZW. MYKORRHIZA & BAKTERIEN**



- Symbiose ermöglicht **Dreiecksbeziehung** zw. Pilz (hier: **Basidio- und Ascomyceten**), Bakterium und Pflanze
- Bakterien fördern Zustandekommen der Mykorrhiza, darum werden sie auch **mycorrhizal helper bacteria** (MHB) genannt

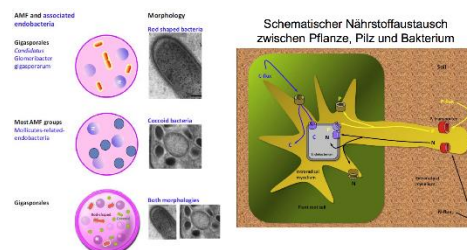
**EM-HELPER BACTERIA:**

- Bakterien leben ausserhalb der Pilzzellen
- Häufigster Bakteriensymbiont ist *Bradyrhizobium* = **Knöllchenbakterien**
- Bakterien produzieren **volatile** (flüchtige) **Substanzen**, die **Hyphenverzweigung** stimulieren → erleichtert Besiedlung der Pflanze



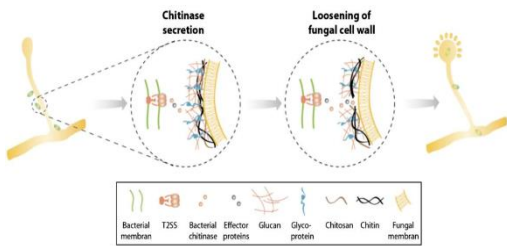
→ Erhöhung der Verzweigung durch volatile Substanzen → Erhöhung der Besiedlungsrate durch Anwesenheit von Bakterien

**AM-HELPER BACTERIA:**



- Bakterien **besiedeln Hyphen** und auch **Pilzsporen**

- leben **intrazellulär/endosymbiotisch** → Endobakterien!
- Endobakterien leben vermehrt in Pilzen ohne Septen → basale Pilze → Zugang zum gesamten Pilz als Tunnelsystem
- Bakterien sind **obligat-symbiotisch mit Pilz** → extrem **reduziertes Genom** und **Verzicht auf verschiedene Stoffwechselwege**
- Pilz ist **nicht obligat symbiotisch** mit Bakterium, aber zieht zwei Vorteile aus der Symbiose:
  - **Erleichterte Besiedlung** der Pflanzenwurzel
  - Bakterielle Toxine als **Schutz**
- Spezielles Sekretionssystem von Bakterien schüttet Stoffe (insb. **Chitinasen**) aus, die das Eindringen in den Pilz ermöglichen



**Profit der Bakterien:**

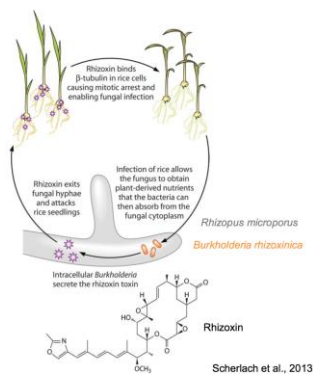
- Können auf Hyphen **Biofilme** bilden → profitieren von der **absorptiven** Nahrungsaufnahme der Pilze → nutzen die durch den Pilz extrazellulär abgebaute Stoffe
- Bakterien können sich nur **mittels Flagellen** (also nur im **Wasser**) bewegen, Hyphen hingegen können **Lufräume überbrücken** → Bakterien nutzen diese Eigenschaft, indem sie die Pilzhyphe als „Autobahnen“ nutzen
- Einige Pilze (z.B. *Aspergillus fumigatus*) haben gegen den Befall der Bakterien Abwehrmechanismen entwickelt

**PFLANZENPATHOGENE AM:**

**Beispiel I: Rhizopus microporus (Zygomycet)**



*Rhizopus microporus* (Zygomycota) causative agent of rice seedling blight



- Pilz ist ein **Pflanzenpathogen**
- Pilztoxin greift Mikrotubulibildung an und führt zu Pflanzensterben
- Gift wird vom Endobakterium, nicht vom Pilz gebildet
- Bakterien werden in Sporen einverleibt und so mit dem Pilz weitergegeben

**Take home messages**

- Pilze können obligate und fakultative Symbiosen mit anderen Organismen eingehen
- Diese Symbiosen können für den anderen Organismus negative oder positive Auswirkungen haben
- Symbiosen mit Pilzen beinhalten oft mehr als zwei Partner - häufig sind stickstoff-fixierende Bakterien involviert
- Faktoren für das Eingehen von Symbiosen sind neben dem Nährstoffaustausch (C, N) auch das Profitieren von Sekundärmetaboliten (z.B. Toxine) des Symbiosepartners
- Die Etablierung von obligaten, aber auch fakultativen Symbiosen bedingt eine ausgefeilte chemische Kommunikation zwischen den Symbiosepartnern bei der kleine sekretierte Proteine eine grosse Rolle spielen

**Take home messages**

- Aufgrund der Aehnlichkeit des Aufbaus von pilzlichen, pflanzlichen und tierischen Zellen ist die Bekämpfung von pilzlichen Krankheitserregern schwierig
- Die Mehrheit der terrestrischen Pflanzen ist für die Aufnahme Stickstoff und Phosphor aus dem Boden auf die Symbiose mit Pilzen angewiesen (Mykorrhiza)
- Auch die oberirdischen Teile von terrestrischen Pflanzen sind oft durch Pilze besiedelt, deren Rolle noch nicht ganz geklärt ist (Endophyten)
- Eine Reihe von pflanzenfressenden Tieren macht sich – direkt (Darmsymbionten) oder indirect (Pilzgärten) - die Fähigkeit von Pilzen zunutze, pflanzliche Zellwände abzubauen zu können
- Coenozytische Pilze beinhalten of endosymbiotische Bakterien

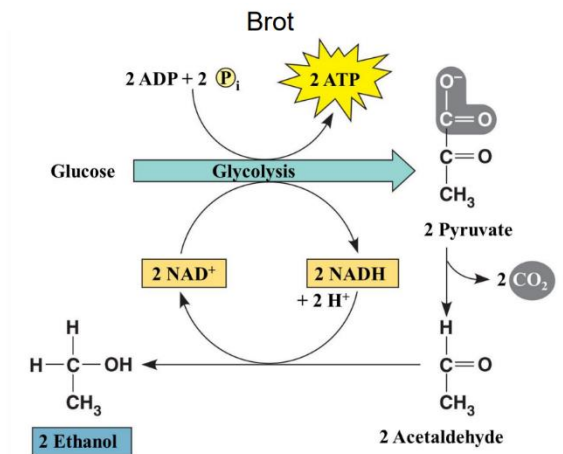
**NUTZUNG DER PILZE:**

**LEBENSMITTELHERSTELLUNG**

**HEFE:**

*Saccharomyces cerevisiae* = Bäcker-/Bier-/Weinhefe

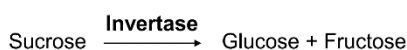
- Hefen sind dort, wo viel Zucker vorhanden ist
- Energiegewinn aus dem Zucker mittels Gärung → 2 Produkte der Gärung werden ausgenutzt: **Alkohol** (*Haltbarkeit*) und **CO<sub>2</sub>** (*Treibmittel in der Backindustrie*)
- Schwierigkeit bei der Züchtung der Bäckerhefe: Sterilität und Qualität der Hefestämme (keine Verzüchtung)



(a) Alcohol fermentation

**Lebensmittel:**

- o **Brot:** Hefe nutzt **Glucose** aus dem Mehl
- o **Wein:** **Sucrose** als Zuckerquelle → Hefe braucht spezielle Enzyme zum Umbau dieser Zuckerquelle



→ viele Geschmackskomponenten des Weins kommen über die Hefen → Sehr starker Einfluss auf **Wein Geschmack/ Qualität**

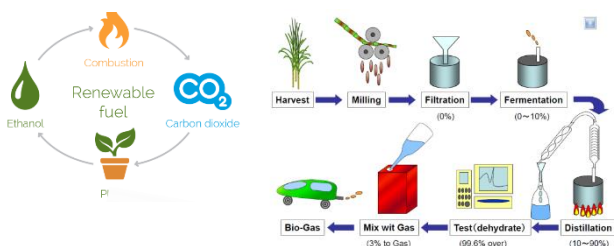
- o **Bier:** Glucose ist nicht direkt zugänglich, sondern muss aus **Stärke** (Glucosepolymer in der Gerste) aufgebrochen werden (*Hefe als nicht filamentöser Pilz kann Stärke aber nicht aufbrechen*) → **Amylasen der Gerstenkörner (Malz)** werden verwendet, um gespeicherte Stärken aufzubrechen und der Hefen verfügbar zu machen

**FILAMENTÖSE PILZE: (oft Penicillium)**

- o **Käse:** Eiweissfette werden durch den Pilz **geschützt** (verhindert Befall von anderen Mikroorganismen, bessere Haltbarkeit) welcher zudem die **Geschmackskomponenten** verleiht  
→ Pilz ernährt sich von den Milchkomponenten  
*Beispiel: Blauschimmelkäse, Weisschimmelkäse (Penicillium → Proteasen des Pilzes verflüssigen den Käse)*
- o **Salami:** Pilzmycel entsteht auf der Fleischoberfläche → für den Geschmack, Schutz vor Befall anderer Mikroorganismen und zur Austrocknung
- o **Sake (Reiswein):** 2 Stufige Fermentation: Stärke wird durch Aspergillus Spezies aufgeschlossen, Hefe wird nachgegeben, um Reisflüssigkeit der 1. Fermentation haltbar zu machen und Geschmacklich zu unterstützen
- o **Sojasauce:** zweifache Fermentation der Sojabohnen (wie bei Sake)

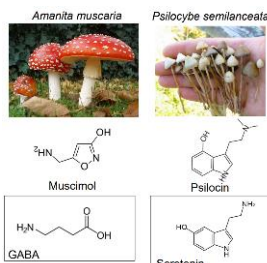
**TREIBSTOFFHERSTELLUNG**

- **Hefe** könnte auch zur Produktion von **Biofuel (Bioethanol)** genutzt werden (CO<sub>2</sub>-neutral!)
- Cellulose eines komplexen Kohlenhydrates (hier oft Meis) wird mittels eines filamentösen Pilzes aufgebrochen und darauffolgende Gärung mittels Hefen produziert **Ethanol**
- **Problem:** Ethanol reicht als Kraftstoff nicht aus (wird darum fossilen Brennstoffen zugemischt)



**METABOLITE UND ENZYME**

- **Mykotoxine:** von Schimmelpilzen gebildete Toxine (z.B. *Aflatoxin*)
- **Pilzgifte:** von **Hutpilzen** gebildete Toxine (z.B. *α-Amanitin*)
- **Antibiotika:** *Penicillin G* und *Cephalosporin C* (die meisten Antibiotika stammen aber von Bakterien)
- **Immunsuppresiva:** *Cyclosporin A* (*Bild rechts:*)
- **Pseudopsychogene:** Zauberpilze



- **Vitalpilze und Heilpilze:** *Lackporling (Reishi)* (Hauptsächlich in der chinesischen Medizin)
- **Organische Säuren:** z.B. *Zitronensäureproduktion*
- **Vitaminproduktion**
- **Enzyme**

**SPEISEPILZE**

- Pilzsammeln
- Züchtung von **Mykorrhiza Pilzen:** z.B. Trüffel (*AM → obligat symbiotisch → Züchtung sehr aufwändig: werden direkt mit Pflanzen angebaut*)
- Züchtung von **saproben Pilzen:** diese sind einfacher zu züchten, Champignon wird am meisten gezüchtet:



- **Quorn-Fermentation:** Alternative Proteinquelle, Fleischersatz → Pilze sind nicht nur als Fruchtkörper essbar, sondern auch wie hier als **Mycel**

**Take home messages**

- Pilze werden vom Menschen schon lange zur Konservierung und Verfeinerung von Nahrungsmitteln eingesetzt
- Pilze produzieren eine grosse Zahl von biologisch aktiven Sekundärmetaboliten, die medizinisch genutzt werden können
- Mit Hilfe von pilzlichen Fermentationen können nützliche Primärmetaboliten in grossen Mengen biotechnologisch produziert werden
- Biotechnologisch produzierte pilzliche Enzyme leisten in vielen industriellen Prozessen wertvolle Dienste
- Pilze sind eine gesunde, nährstoffreiche und ressourcenschonende Nahrungsquelle für Tier und Mensch