

Zusammenfassung Mykologie - HS17

v0.3

Gleb Ebert

13. November 2017

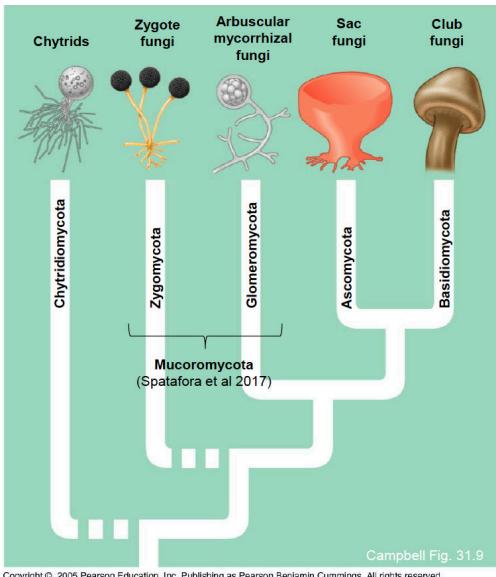
Vorwort

Diese Zusammenfassung soll den gesamten Stoff der Vorlesung Mykologie (Stand Herbstsemester 2017) in kompakter Form enthalten. Ich kann leider weder Vollständigkeit noch die Abwesenheit von Fehlern garantieren. Für Fragen, Anregungen oder Verbesserungsvorschlägen kann ich unter glebert@student.ethz.ch erreicht werden. Die neuste Version dieser Zusammenfassung kann stets unter <https://n.ethz.ch/~glebert/> gefunden werden.

1 Einführung

1.1 Phylogenie der Pilze

- Pilze bilden das **5. Reich** (5th Kingdom) des Lebens
- sie sind **näher mit Tieren** als mit Pflanzen verwandt
- Pilze umfassen **viele Phyla**
- die ältesten Pilze sind aquatisch und haben **motile Sporen**
- rund 3 Mio. Arten vermutet, aber nur **3-8% beschrieben**
- unterteilt in 5 Stämme (Phyla) (die ersten drei gehören zu den **basalen Pilzen**, welche keine Septen haben, während die letzten zwei zu den **höheren Pilzen** gehören)
 - Chytridiomycota
 - Zygomycota
 - Glomeromycota
 - Ascomycota
 - Basidiomycota



1.2 Ernährungsweise

- (chemoorgano-) **heterotroph** und **absorptiv** (osmotroph)
- **Abbau** der Nahrung **ausserhalb** des Organismus durch Exoenzyme

- **kleinere Moleküle** durch Zellwand und Zellmembran transportiert
- **Axenisch**: selbstständiger Abbau einer bestimmten Molekülart
- **in Kollaboration**: Abbau einer Molekülart und aufnahme von zweien; Gegenseite baut andere Art ab
- **in Kompetition**: Eine Seite nimmt Molekülart auf, die von der anderen abgebaut wird
- **Kohlenstoffquelle** beeinflusst Lebensstil:
 - Saprophyt
 - Parasit (antagonistischer Symbiont)
 - mutualistische Symbiont
- Einfluss der Ernährungsweise auf **Körperform**:
 - Hyphen dienen zur Oberflächenvergrößerung und zum Durchdringen des Substrates
 - **Myzel** zum Transport von Nährstoffen und Information

1.3 Lebensstil

- **Immotilität** des Organismus aber nicht unbedingt aller Zellen
- Zellen sind von **Zellwänden** umgeben
- **hyphenförmige Multizellularität** (polares multizelluläres Wachstum)
- Verbreitung durch **Sporen**

1.4 Körper- und Zellform

- grob unterteilbar in **Hyphen bildende** und einzellige Pilze
- **Hyphen mit Septen** (interzelluläre Trennwände) haben einen Zellkern pro Zelle
- **Coenocytische Hyphen** (ohne Septen) enthalten sich frei bewegende Zellkerne

1.5 Spore

- zur **Verbreitung und Vermehrung** genutzt
- gebildet durch Teilung, Sprossung, etc.
- **sexuell** oder **asexuell**
- sexuelle Sporenbildung **grundlegendes taxonomisches Merkmal** der Pilze

2 Systematik

2.1 Chytridiomycota

- dt. **Flagellaten-** oder **Töpfchenpilze**
- etwa **1250** bekannte Arten
- wahrscheinlich **phylogenetisch ältesten** Pilze
- Saprofyten, Parasiten und Symbionten
- **begeisselte Zoosporen** typisch

Beispiel: Chytridiomykose

Zoosporen befallen Amphibienhaut, welche als Reaktion verhornt und so die Atmung unmöglich macht. Möglicherweise über Afrikanischen Krallenfrosch (*Xenopus laevis*) weltweit verbreitet, da dieser immun ist und für Forschung verwendet wird. Wahrscheinliche spielen weitere Faktoren bei der Verbreitung eine Rolle.

2.2 Zygomycota

- dt. **Jochpilze**
- etwa **1350** bekannte Arten
- **schnell wachsende Schimmelpilze**, Parasiten, Symbionten
- Sporangien und **Zygosporen** typisch

2.3 Glomeromycota

- dt. **Arbuskuläre Mykorrhizapilze**
- etwa **275** bekannte Arten
- Symbionten
- bilden **vesikulär-arbuskuläre Mykorrhiza**

2.4 Ascomycota

- dt. **Schlauchpilze**
- grösster Stamm mit rund **87000** bekannten Arten
- leben im Wasser oder an Land
- im **Askus** gebildete **sexuelle Sporen** charakteristisch
- asexuelle Sporen (**Konidien**) ebenfalls möglich
- **Komplexität variiert** zwischen einzelligen Hefen, Schimmelpilzen und Fruchtkörper bildenden Arten

2.5 Basidiomycota

- dt. Hut- oder Ständerpilze
- rund 50000 bekannte Arten
- **komplexe Reproduktionszyklen** (z.B. mit Wirtswechsel)
- **Basidiosporen** im sexuellen Zyklus sind charakteristisch
- Hutpilze, pflanzenpathogene Rost- und Brandpilze, u.a. wichtige Holzabbauer

2.6 Deuteromycota

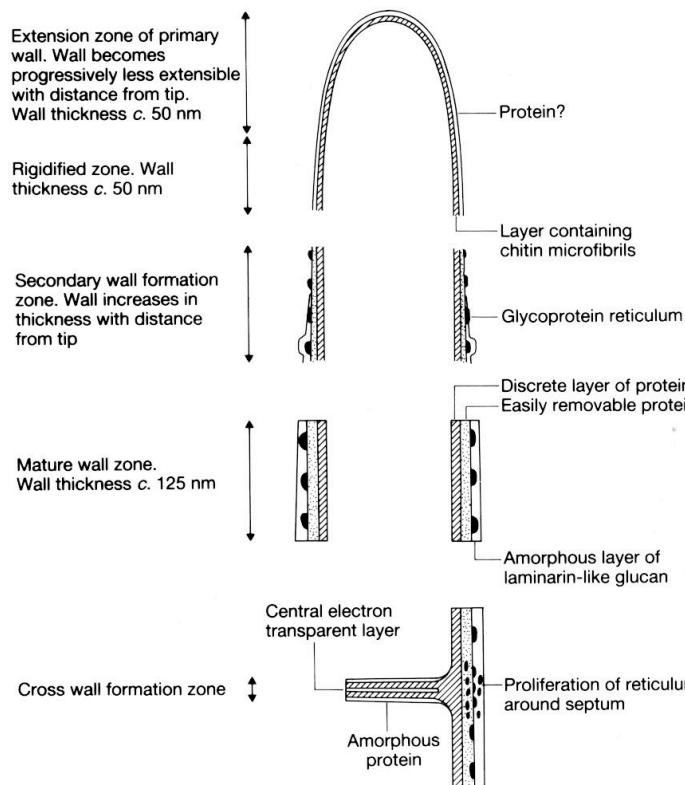
- Fungi imperfecti, Hyphomycota, dt. anamorphe Pilze
- Gruppe mit Pilzen **unbekannter Verwandtschaft**
- teilweise verschiedene Namen für unterschiedliche Stadien einer Art
- Relikt aus Zeiten vor DNA-Sequenzierung

3 Lebensstil der Pilze

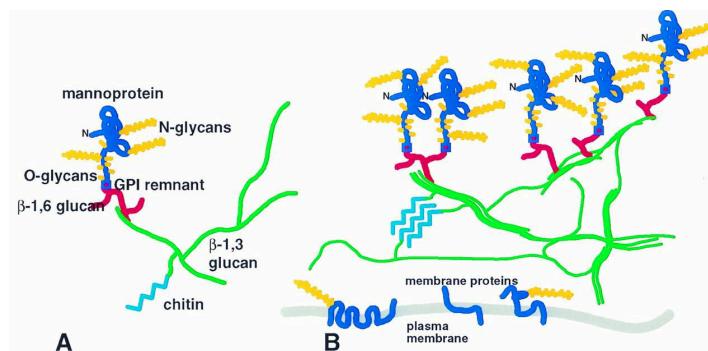
3.1 Zellwand

Die pilzliche Zellwand kann in zwei Schichten aufgeteilt werden. Die innere, **konserveierte und rigide Schicht** besteht meist aus **Chitin**, **β 1-3-** und **β 1-6-Glukan**. Chitin schützt die Zelle vor dem Platzen durch den Turgor. Die äussere Schicht ist **gelartig** und **zwischen Arten variabel**. Sie besteht meist aus **Mannoproteinen** und **Glukanen**. Die beiden Schichten werden auch **primäre** (innere) und **sekundäre** (äussere) Zellwand genannt.

3.1.1 Reifung der Zellwand



3.1.2 Struktur der Zellwand



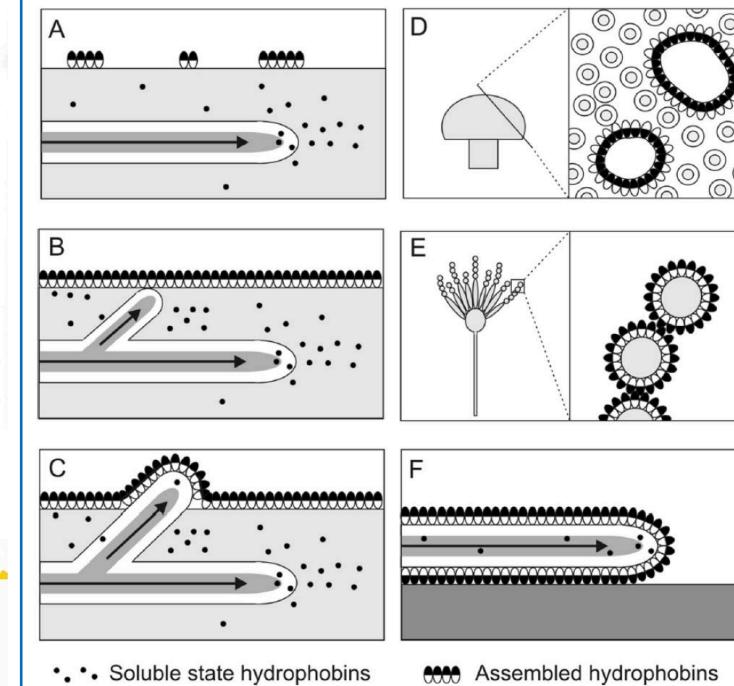
3.1.3 Glykogen, Stärke und Cellulose

In **Glykogen** sind die Monosaccharide mit α 1-4- und α 1-6-Bindungen verknüpft. Sie können Verzweigungen bilden. In **Cellulose** sind es β 1-4-Bindungen und in **Stärke** nur

α 1-4-Bindungen.

3.1.4 Hydrophobine

Hydrophobine sind Proteine, welche eine Schicht um manche pilzliche Strukturen bilden. Die Schicht hat eine **hydrophobe** (nach Innen zum Pilz gerichtet) und eine **hydrophile Seite** (nach Aussen). Sie schützen Hyphen vor Austrocknung an der Luft. **Class I** Hydrophobine sind variabler und kommen bei Asco- und Basidiomyceten vor, während **Class II** Hydrophobine nur bei Ascomyceten gefunden werden können.



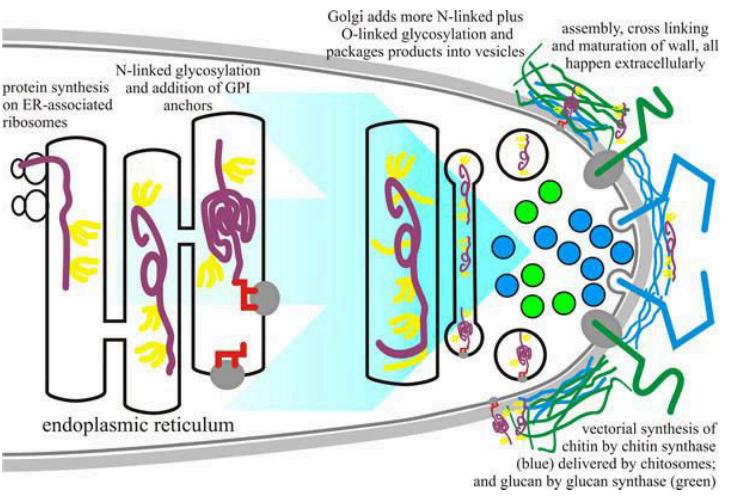
3.1.5 Adhäsine

Adhäsine sind Proteine, welche es Hefezellen ermöglichen zu verklumpen.

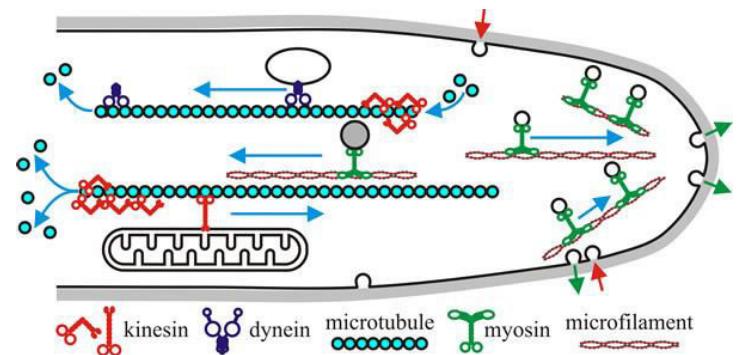
3.1.6 Polarität der Zellwandsynthese

Bei **polarem Hyphenwachstum** befindet sich an der Spitze ein **Spitzenkörper**, welcher unter anderem aus Vesikeln mit Proteinen besteht. Auch mRNA wird von Vesikeln transportiert, damit direkt vor Ort Proteinsynthese

stattfinden kann. Ebenfalls an der Wachstumsspitze von Hyphen sitzen Proteine, die aktivierte Zucker durch die Zellwand transportieren und aussen direkt verknüpfen.



Wichtig für den Langstreckentransport sind Microtubuli. An ihnen wandern Motorproteine mit ihren Ladungen zur Spitze. Dort wird auch ständig Endo- und Exozytose betrieben um Nahrung aufzunehmen und verschiedene Signale, Verdauungsproteine oder anderes nach Aussen abzugeben.



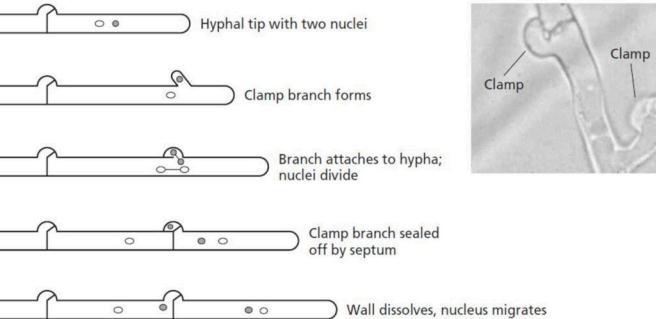
3.2 Hyphenquerwände

- 1) **septisches Band** besteht aus je einem Actin-, Septin- und SepA-Ring
- 2) der Septin-Ring teilt sich in zwei und wandert aus einander, während die beiden anderen Ringe dazwischen liegen

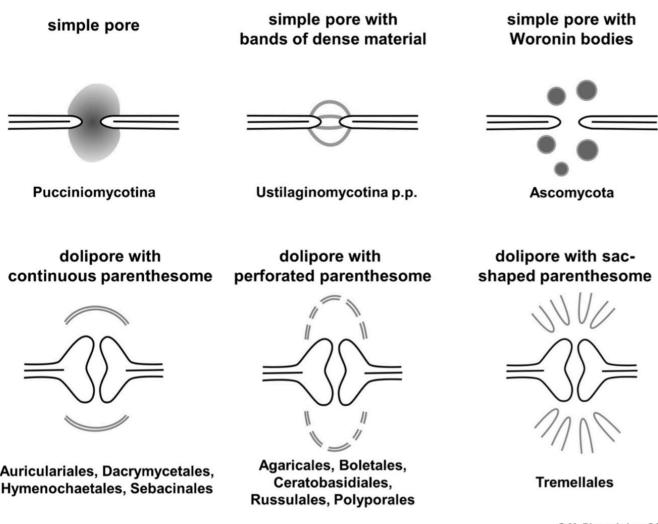
- 3) die Actin- und SepA-Ringe werden immer enger, während neues Zellwandmaterial gebildet wird
- 4) nach Vollendung der Septe verschwinden aller Ringe bis auf den apikalen Septin-Ring

3.3 Schnallenbildung

Wird bei Zellteilung von dikaryotischem Myzel von Basidiomycota durchgeführt



3.4 Septenporen



- in jungem Myzel sind mehr Sporen offen als in älterem Myzel
- sind **Woronin Körper** an einer einfachen Pore vorhanden, können sie diese verstopfen

3.5 Verzweigungen von Myzel

- Verzweigungen können entweder **lateral** oder **apikal** sein
- die Bildung von Verzweigungen wird von **Cyclosporinen** gesteuert; zu viele hindern die Ausbreitung während zu wenige nur ungenügend Oberflächenvergrößerung mit sich bringt
- **Verzweigungsmuster** hängen von der Umwelt, z.B. von Fressfeinde oder vom Nahrungsangebot, ab
- **positiver Autotropismus** führt zur Fusion von Hyphen; er ist vor allem am Zentrum des Myzels zu finden
- **negativer Autotropismus** (gegenseitiges Abstoßen) von Hyphen dient vor allem der möglichst breiten Raumabdeckung und ist somit weiter vom Zentrum entfernt zu finden

3.6 Pseudohyphen und Dimorphismus

- **Pseudohyphen** sind eine Zwischenform von Hefe und Hyphen
-

3.7 Polarität beim Hefewachstum

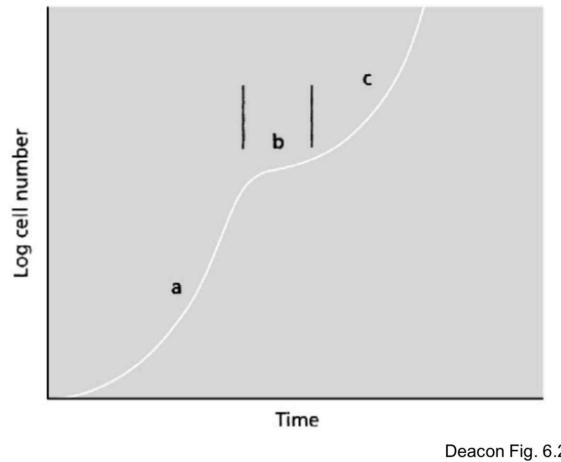
- nach asexuellem Wachstum entsteht der nächste Spross direkt neben der Narbe der vorherigen Teilung
- nach sexuellem Wachstum sprosst die Mutterzelle entweder direkt neben oder entgegen der Narbe (**bipolares Sprossmuster**), während die Tochterzelle nur an einem Ort sprossen kann

3.8 Enzymsekretion, Nahrungsaufnahme, Konkurrenzabwehr

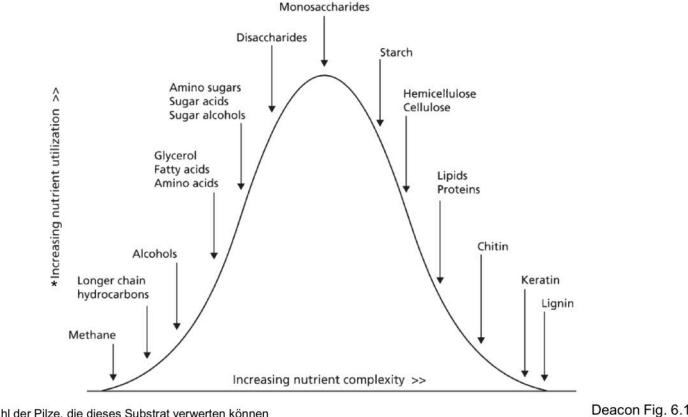
- beim Hyphenwachstum werden in Wachstumsrichtung **abbauende Enzyme** sekretiert, welche einen Weg durch das Substrat bahnen
- Nahrung wird an den Seiten der Hyphe aufgenommen
- **Antibiotika** werden ebenfalls seitwärts ausgeschieden

3.9 Induktion von Nahrungs-Abbauenzyme und -Transportern

muss von einer auf eine andere Nahrungsquelle umgeschaltet werden, wird das Wachstum für eine kurze Zeit verlangsamt



3.10 C-Quellen



- Pilze sind sehr vielfältig was C-Quellen angeht; am häufigsten werden **Monosaccharide** verwendet
- Zygomycota sind oft die ersten Pilze, die auf Dung zu sehen sind; danach kommen Ascomycota und später auch Basidiomycota; diese Abfolge ist vermutlich auf die **steigende Grösse / Komplexität** der Pilze zurückzuführen

3.10.1 Stärkeabbau

Exo-Amylasen spalten je ein Monosaccharid am Ende einer Stärkekette ab. **Endo-Amylasen** spalten Bindungen in der Mitte von Stärkeketten.

3.10.2 Abbau von pflanzlichen Zellwänden

- Pectine** sind Polysaccharide und werden von einer Reihe von pilzlichen Enzymen abgebaut
- Cellulose** wird auch auf verschiedene Arten abgebaut (durch **Cellulasen** und **Glukosidasen**); diese können allerdings nur **amorphe Regionen** angreifen; für die **kristallinen Regionen** werden oxidative Enzyme benötigt (**LMPOs: Lytische Polysaccharide MonoOxygenasen**)
- Cellulasen und Ligninasen haben sich erst nach dem Carbon-Zeitalter entwickelt. Nach dieser Entwicklung sind keine Steinkohle-Ablagerungen mehr entstanden

3.10.3 Lignin

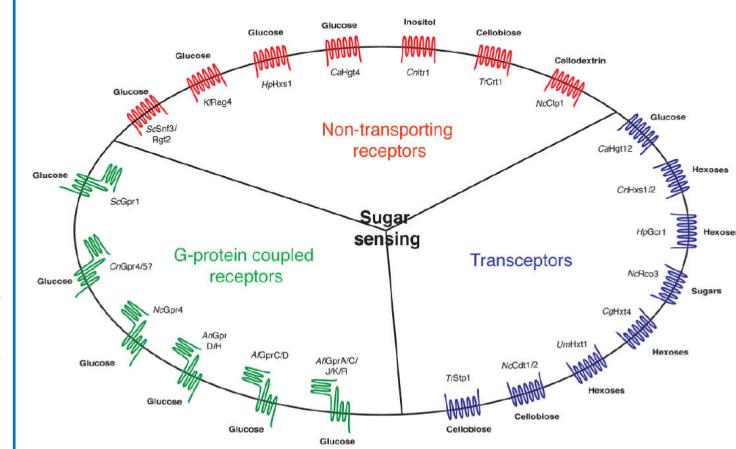
- Die Vorstufen von Lignin werden enzymatische gebildet, während sich die Polymere chemisch bilden. Dadurch sind die Bindungen zwischen den Monomeren zufällig und es ist sehr schwierig sie mit einem Enzym zu spalten.
- Weissfäulepilze** benutzen enzymatischen Abbau mit Radikalen, um diese Bindungen zu spalten
- Braunfäulepilze** betreiben chemischen Abbau. Sie sind allerdings weniger effektive als Weißfäulepilze

3.11 Spurenelemente

Siderophore sind Moleküle, die Eisen-Ionen (Fe^{3+}) binden. Sie wiederum werden von Rezeptoren an der Zellwand erkannt und mit dem Ion aufgenommen. Wie andere niedermolekulare Nahrung wird das Eisen dann durch **zytoplasmatischen Fluss** im Myzel verteilt.

3.12 Metabolismus

Pilze besitzen eine Vielzahl an Rezeptoren in der Plasmamembran, die auf verschiedene Zucker reagieren. Manche Proteine sind sogar Rezeptor und Transporter zugleich. So können Pilze ihren Metabolismus an das Nahrungsangebot abstimmen.

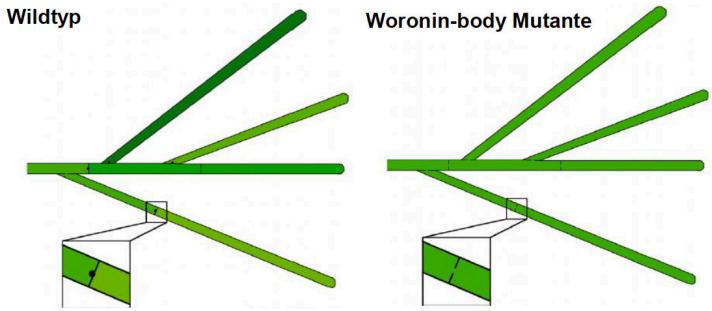


4 Differenzierung des Myzels

Differenzierung kann als **regulierte Veränderung** eines Organismus von einem Zustand zu einem anderen definiert werden. Die Veränderung kann physiologischer, morphologischer oder beider Arten sein.

4.1 Hyphenheterogenität

Aspergillus niger erhält Heterogenität (Verschiedenheit) von jungem Myzel indem zytoplasmatischer Fluss unterbunden wird. Dies wird erreicht indem **Woronin-Körper** Septen verschließen. Diese können bei Bedarf auch wieder freigegeben werden.

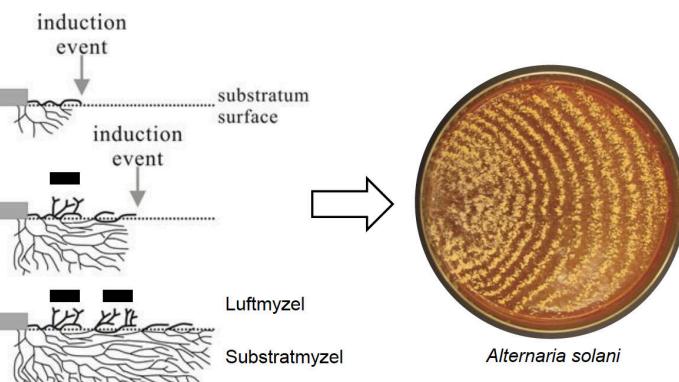


4.2 Kommunikations- und Transporthypen

Nur ein Teil des Myzels ist für **Kommunikation** und **Transport** zuständig. Er kann zum Beispiel sichtbar gemacht werden, indem man nach bestimmten Lektinen sucht, die als Abwehr gegen Nematoden dienen. Wenn eine Hyphe in Kontakt mit dem Fressfeind kommt, breitet sich das Signal im ganzen Kommunikationsnetzwerk aus.

4.3 Rhythmisches Wachstum

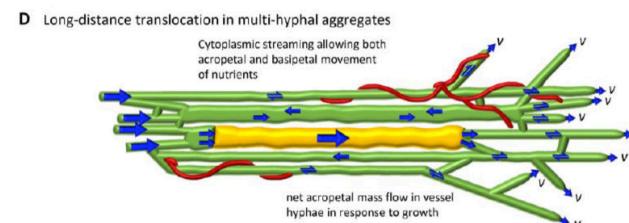
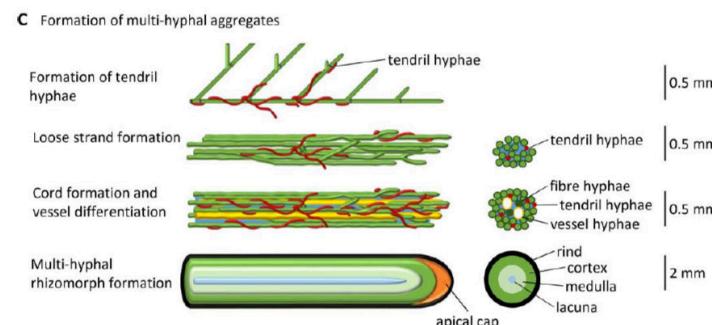
Verbreitet sich ein Pilz in seinem Substrat, so versucht er dies in alle Richtungen auch nach oben und unten. In periodischen Abständen bricht er an die Luft aus (**Luftmyzel**). Dies kann zu Ausbreitungsmustern führen.



4.4 Myzelstränge

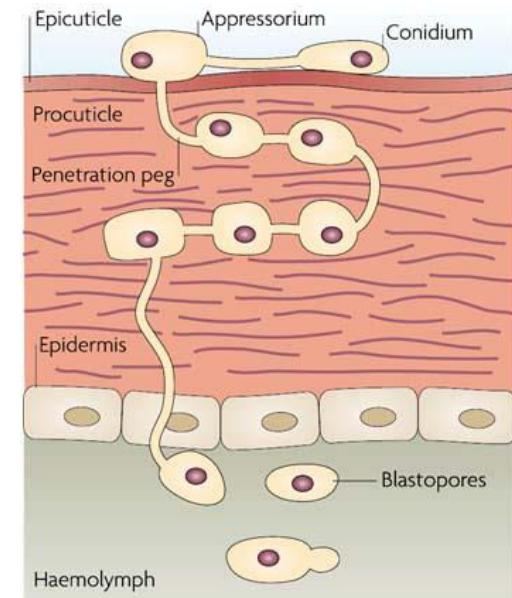
Myzelstränge, auch **Rhizomorphe** genannt, sind vergleichsweise dicke Bündel aus verschieden differenziertem

Myzel. Sie sind eine Art Pionier-Myzel und dienen zur Eröffnung neuer Nahrungsquellen oder zur Versorgung weit entfernter Teile des Pilzes.



4.5 Appressorium

Appressorien, auch **Penetrationshyphen** genannt, sind spezialisierte Zellen, die zur Infektion von Wirtsorganismen dienen. Sie bilden einen kleinen Fortsatz (engl. **penetration peg**) der mithilfe des Turgors hohen Druck auf die zu penetrerende Fläche aufbauen kann.



Nature Reviews | Microbiology

4.6 Arbuskeln

V4S16

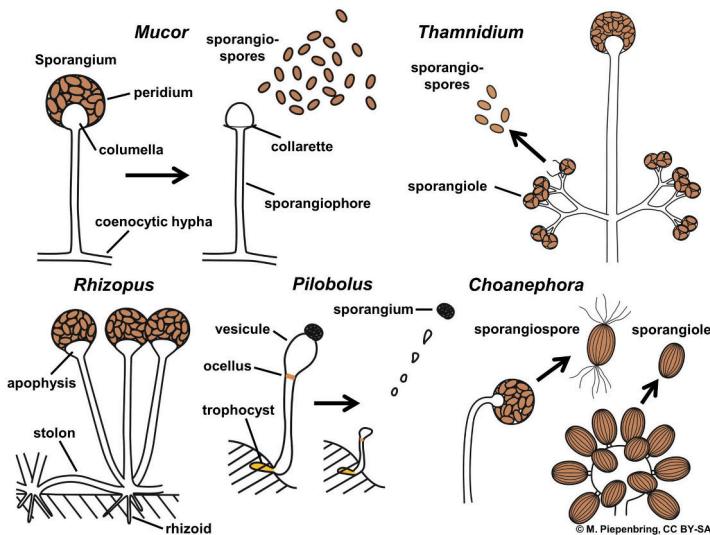
4.7 Weitere Differenzierungen

- Biolumineszenz
- Myzelfächer
- Wurzelfäule
- Haustorien

5 Sporenbildung

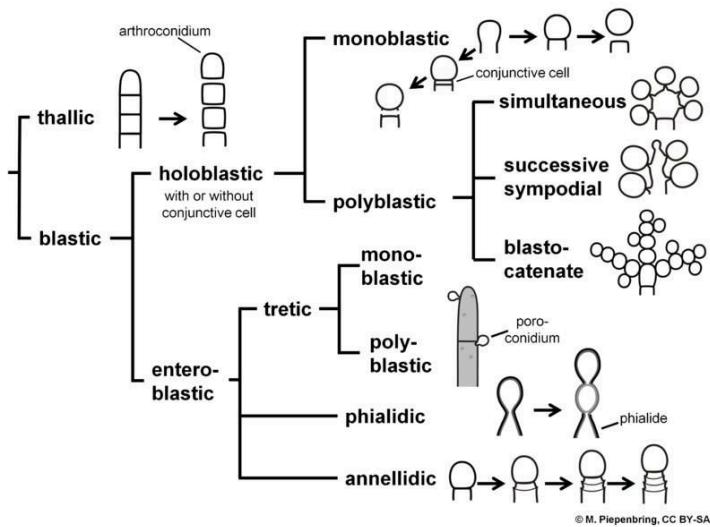
5.1 Sporangien

Verschiedene Arten von **Sporangien** bei Zygomycota:



5.2 Konidien

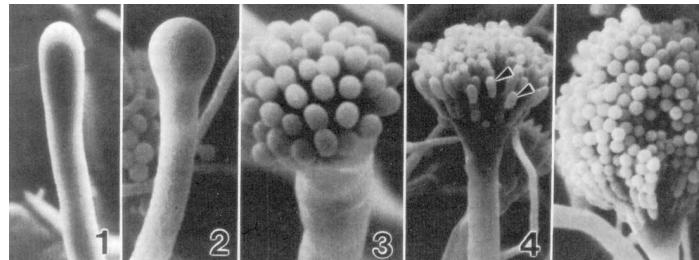
Verschiedene Arten von **Konidienbildung** bei Ascomycota. Bei der **thallischen** Bildung wachsen die Konidien wie Hyphen (an der Spitze) während bei der **blastischen** neue Sporen an der Basis der Konidien gebildet werden.



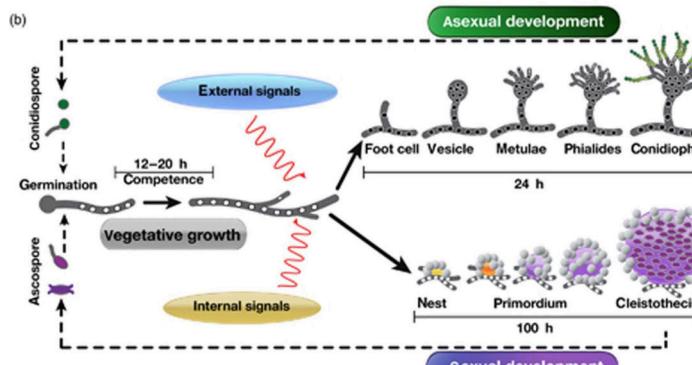
Stadien der Konidienbildung bei *Aspergillus nidulans*:

- 1) junger Konidienträger
- 2) Entwicklung des Vesikels
- 3) Entwicklung der Metulae
- 4) Philidenentwicklung

5) Spitze eines reifen Konidiophors mit vielen Konidienketten



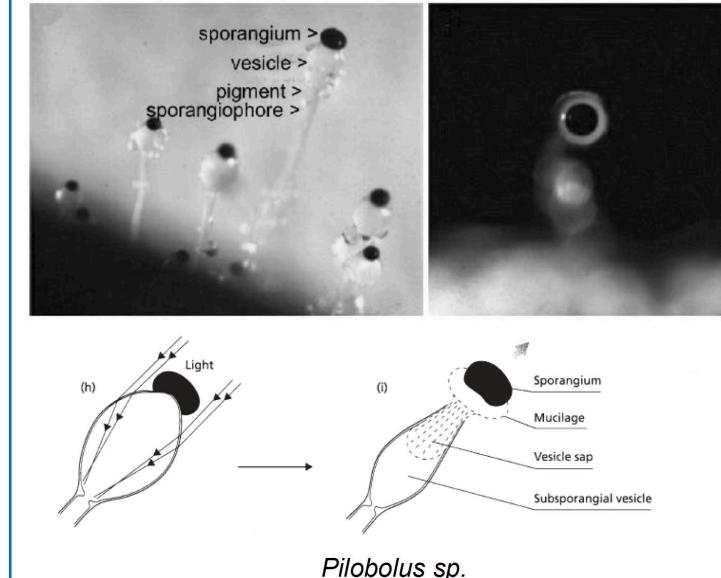
Regulation der Konidienbildung bei *Aspergillus nidulans*:



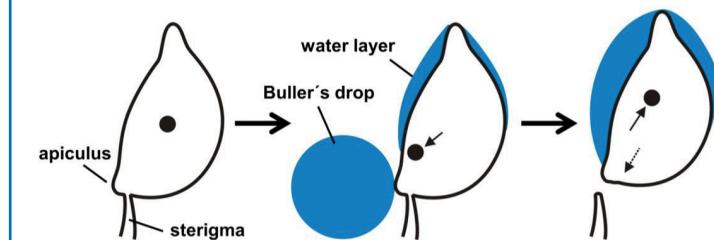
5.3 Photo- und Gravitropismus

Manche Sporeenträger weisen entweder Photo- oder Gravitropismus auf. Das heißt, dass sie ihre Wachstumsrichtung ans Licht bzw. die Schwerkraft anpassen. Dies dient der Ausbreitung der Sporen.

5.4 Aktive Sporenverbreitung



Verbreitung von Basidiosporen von Sporeenträger:



IM WASSER, CONIDIOMATA, SKLEROTIEN, STROMATA

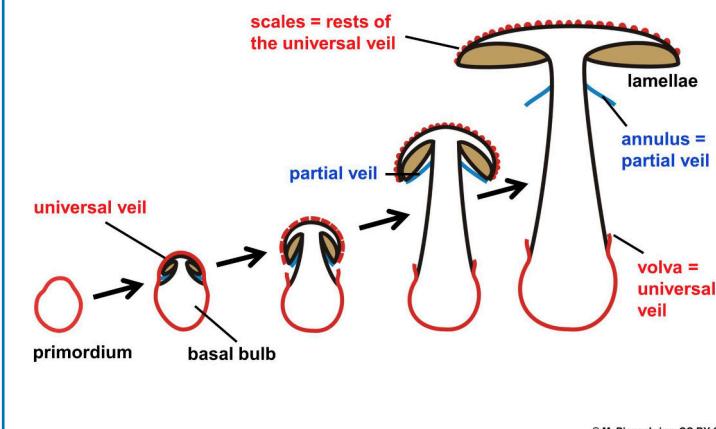
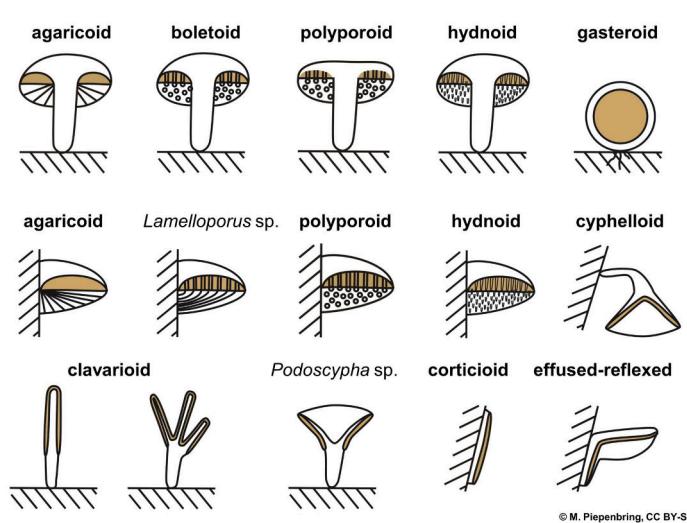
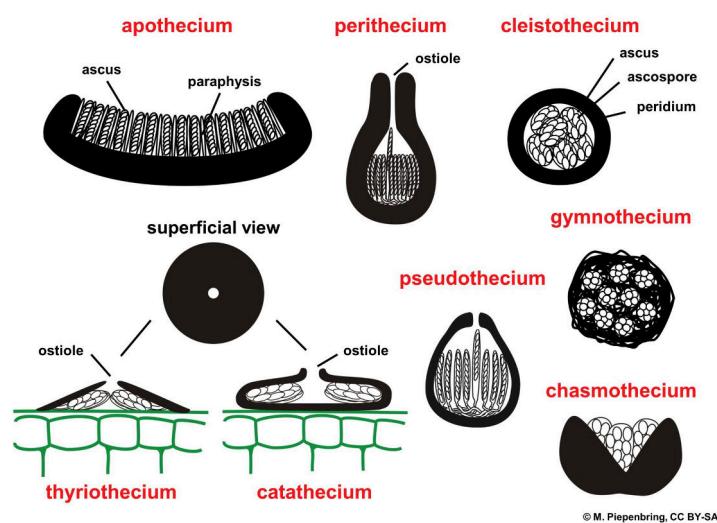
5.5 Passive Sporenverbreitung

- Ausspülung durch Wasser
- Verbreitung durch Wind
- Transport durch Tiere

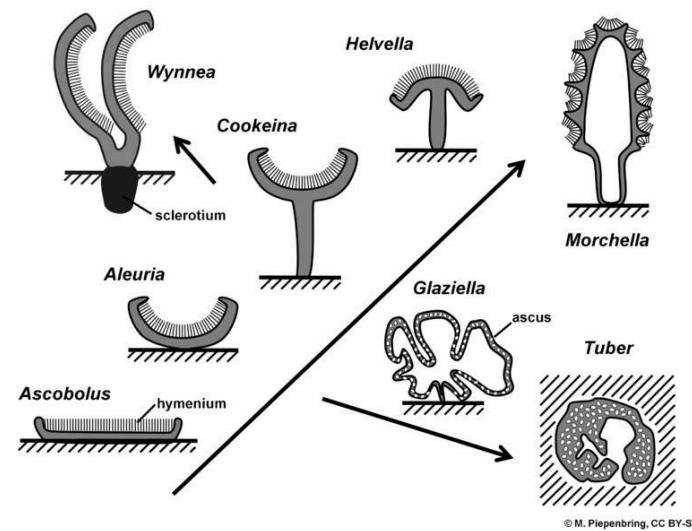
5.6 Fruchtkörper

Fruchtkörper sind **multizelluläre pseudoparenchymale Strukturen**.

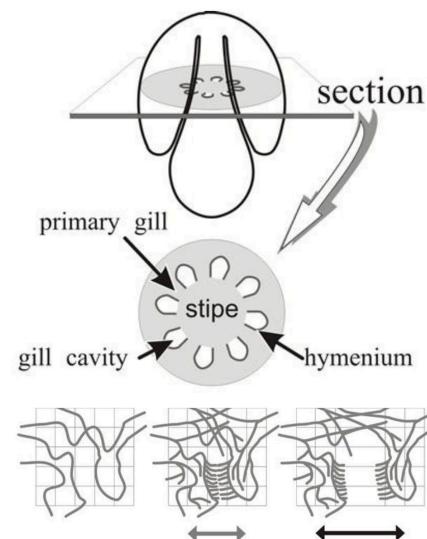
Ascomata:



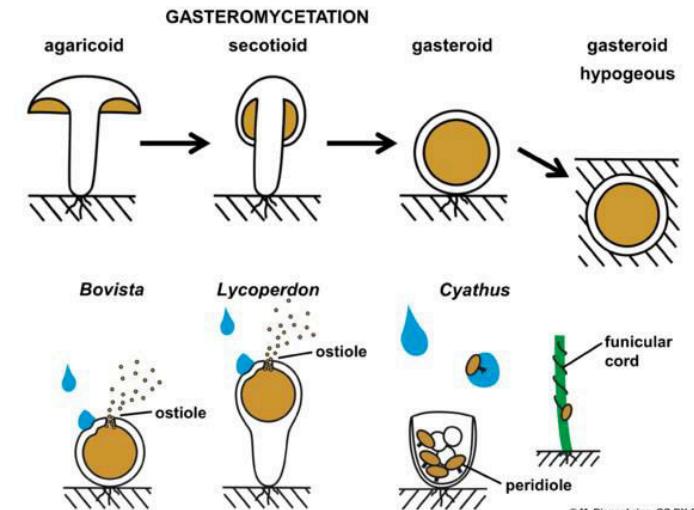
Pezizales Ascomata:



Bau und Expansion von Basidiomata:

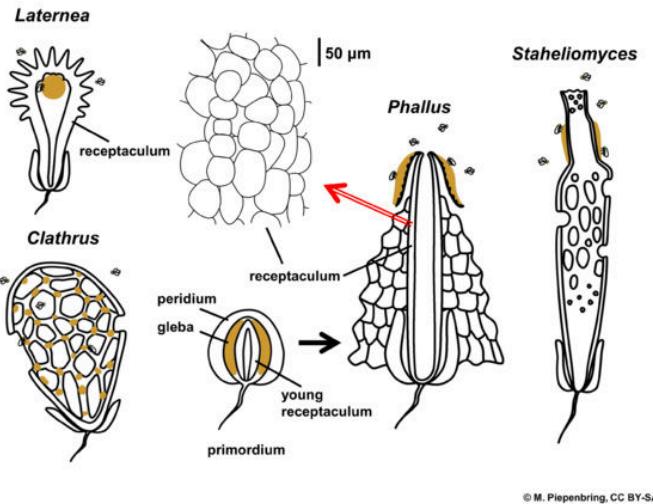
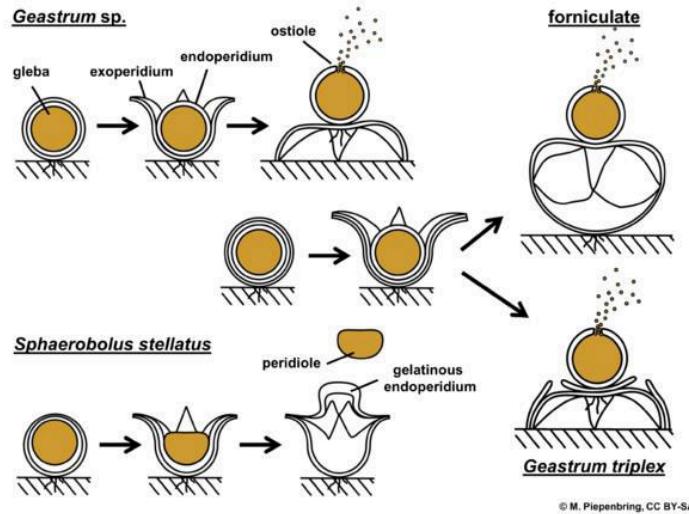


Basidiomata von Gasteromyzeten:

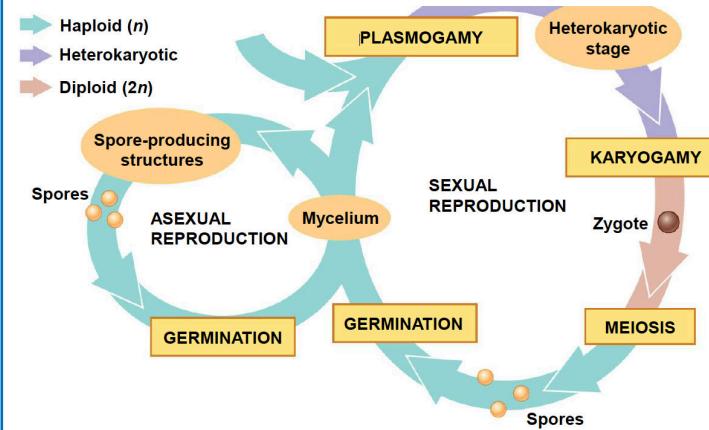


Basidiomata:

Schutz der Basidiomata mit Schleier (engl. veil):



6 Sexuelle Reproduktionszyklen



© 2011 Pearson Education, Inc.

Der Lebenszyklus kann in die **Haplophase**, **Dikaryophase** und die **Diplophase** eingeteilt werden.

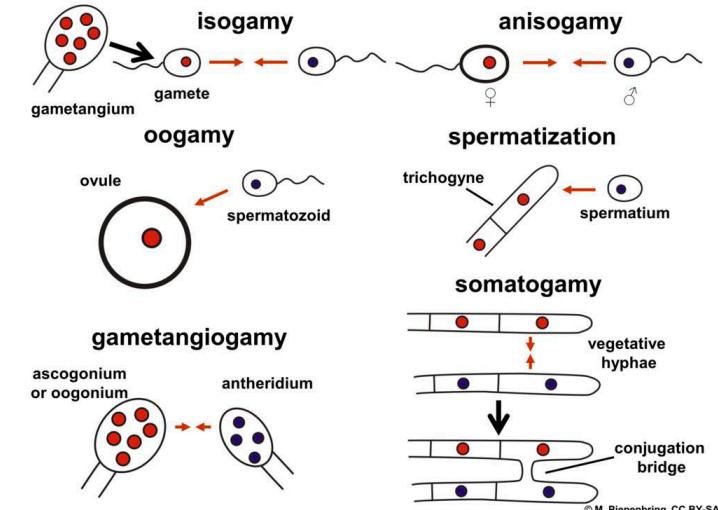
Sind die Umweltbedingungen ungünstig, wird die Sexuelle Reproduktion bevorzugt, da durch Rekombination besser angepasste Organismen entstehen können.

6.1 sexuelle Reproduktionssysteme

- Homothallisch:** Fortpflanzung von genetisch verschiedenen Organismen verschiedener Geschlechter
- Heterothallisch:** Sexuelle Fortpflanzung eines Organismus mit sich selbst

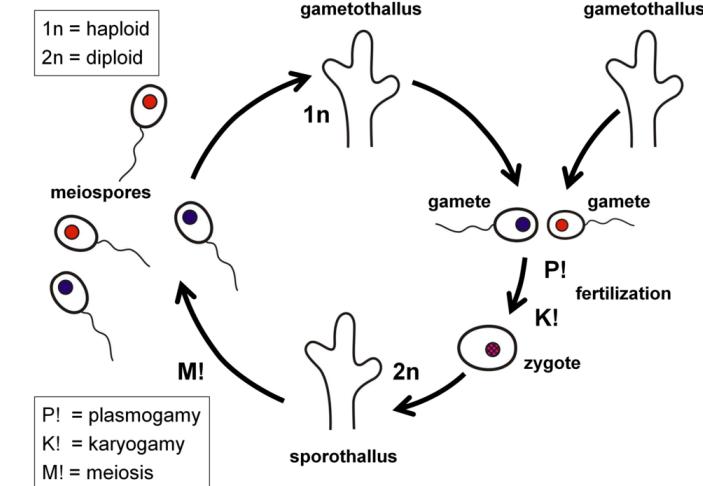
Manche Basidiomycota bilden Hexen-/Feenringe (engl. fairy rings) mit ihren Fruchtkörpern.

6.2 Befruchtungsmodi



© M. Piepenbring, CC BY-SA

6.3 Beispiel: Isogam und heterothallisch



© M. Piepenbring, CC BY-SA

6.4 Parasexualität

6.4.1 Zwei Arten der Hyphenfusion

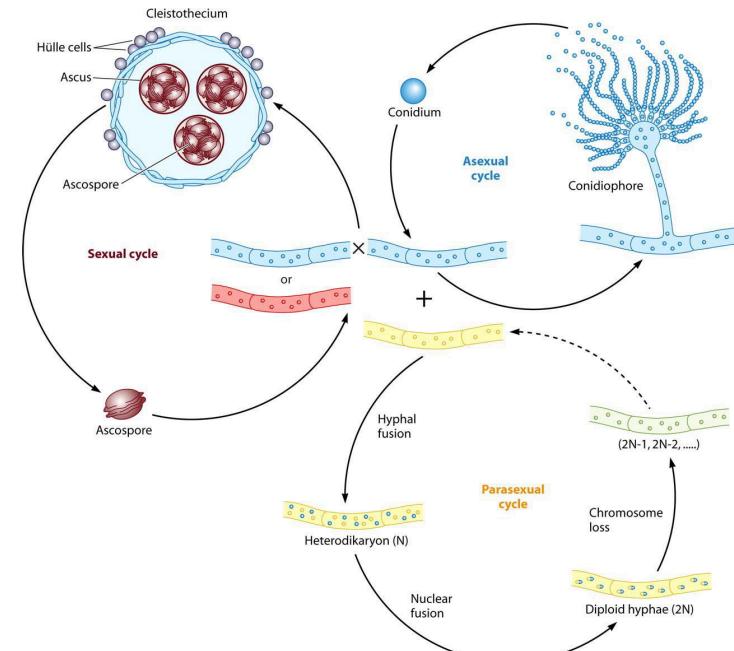
- 1) Singanilisierende und Signal empfangende Hyphen finden sich und fusionieren
- 2) Sind zwei Linien von unterschiedlichen Nahrungsstoffen abhängig, können sie Hyphenfusi-

on durchführen, um sich gegenseitig mit der benötigten Nahrung zu versorgen. Dies passiert unabhängig vom Paarungstyp.

6.4.2 Heterokaryose

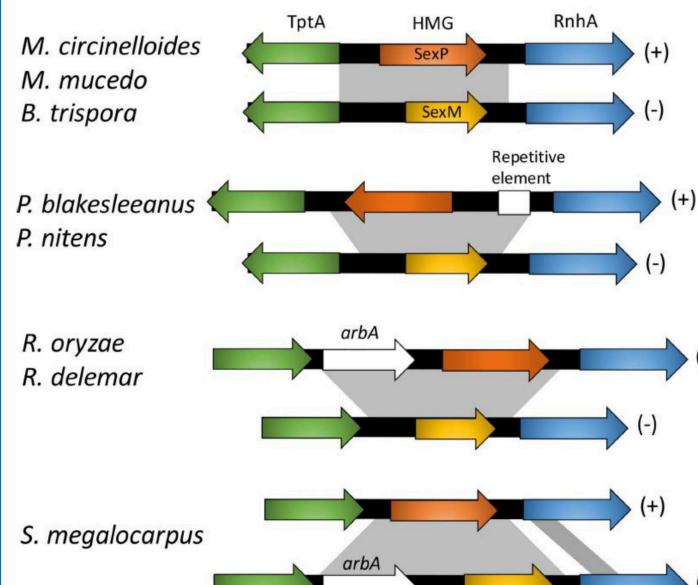
- Vegetative Inkompatibilität kann als Kontrollmechanismus der Parasexualität verwendet werden. Bei *Podospora anserina* zum Beispiel wird der Zelltod eingeleitet, wenn ein fusioniertes Kompartiment verschiedene Zellkerne enthält.
- Klare Grenzen können zwischen inkompatiblen Linien beobachtet werden
- Homokaryotische Sektoren können entstehen, wenn eine homokaryotische Hyphe entsteht
- Bei der Sporengeneration bilden die verschiedenen Zellkerne jeweils ihre eigenen Sporen
- fusionieren zwei Pilze, wandern Zellkerne im gesamten Myzel umher, bis alles als Dikaryon stabilisiert ist.

6.5 Beispiel: *Aspergillus nidulans*



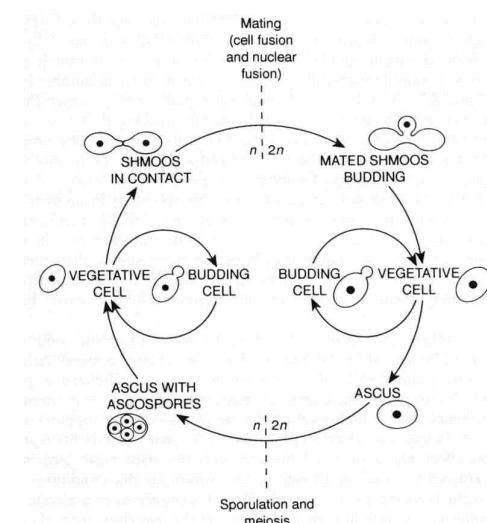
6.6 Paarungstypen von Zygomycota

Die Paarungstypen werden von **Paarungstyp-Loci** bestimmt. Sie kodieren für möglicherweise komplementäre **HMG-Domänen-Transkriptionsfaktoren**.

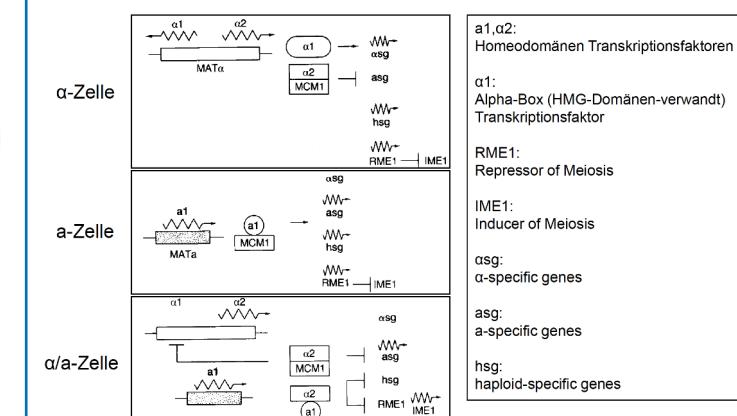


Trispirosäure wird durch **kooperative Biosynthese** von den Paarungstypen (+) und (-) hergestellt. Dazu müssen die ausgetauschten Zwischenprodukte durch die Membran wandern können.

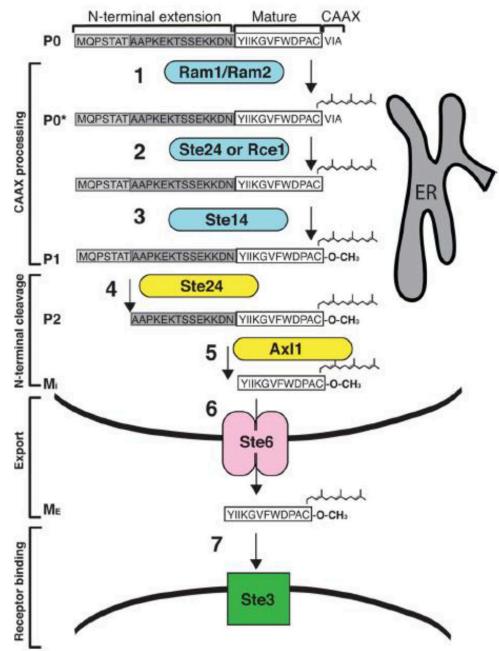
6.7 Reproduktionszyklus von *Saccharomyces cerevisiae*



Die Hefe hat die Paarungstypen α und α' . Kodiert der *MAT*-Locus für das $\alpha 1$ -Protein, hat die Zelle den α -Paarungstyp während bei $\alpha 1$ und $\alpha 2$ der α -Paarungstyp entsteht. Diploide α/α' -Zellen exprimieren alle drei Proteine. *HML*- und *HMR*-Loci sind nicht kodierend, enthalten aber die Information zu den geschlechtsbestimmenden Proteinen. So kann eine Zelle ihren Paarungstyp wechseln.

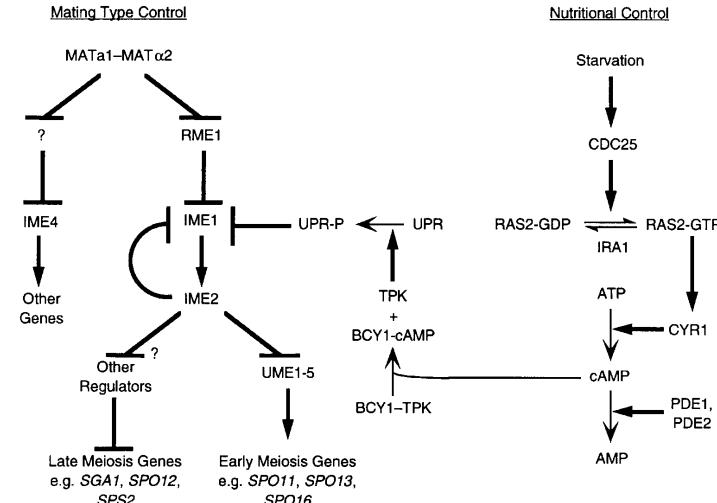


Der α -Faktor ist ein Musterbeispiel für pilzliche Pheromone.

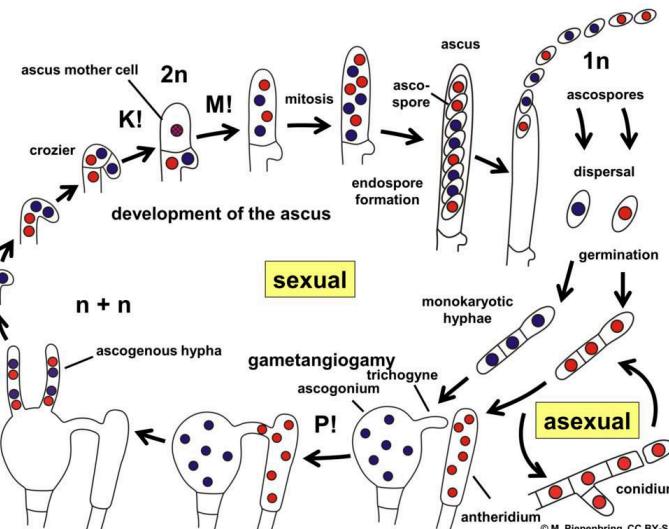


Der Pheromone-Respose Pathway ist ein Musterbeispiel für MAPK-Kaskaden (MAP-Kinasen).

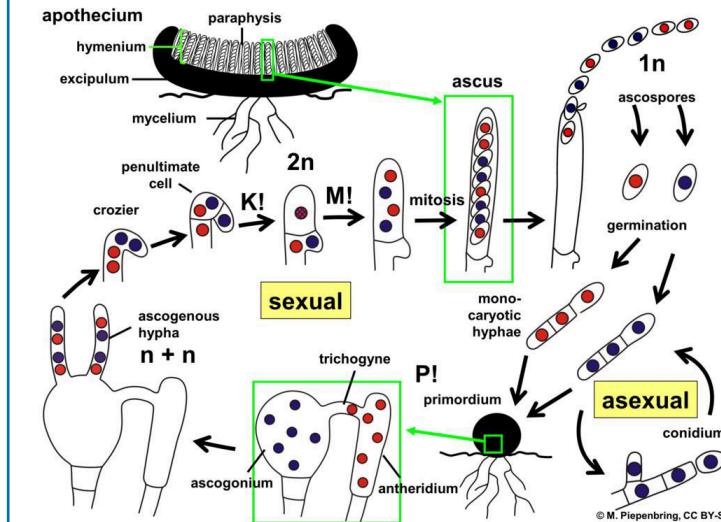
Abhängig von der Verfügbarkeit von Nahrung kann das Paarungsverhalten zwischen geschlechtlich und ungeschlechtlich hin und her gewechselt werden.



6.8 Reproduktionszyklus von Ascomycota

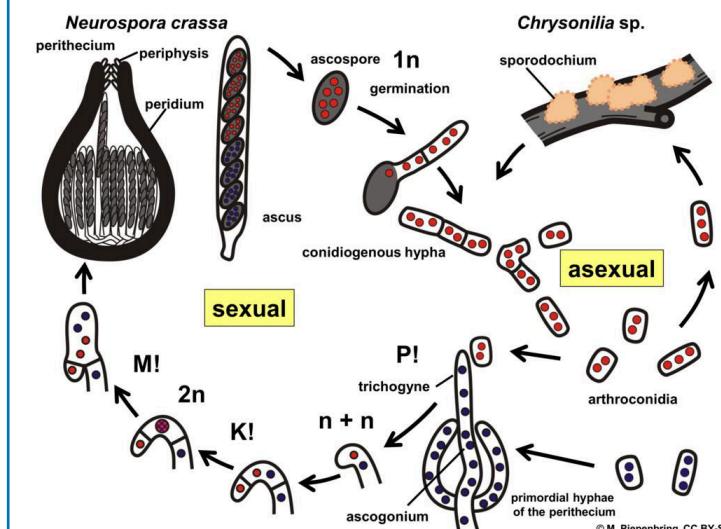


6.8.1 Beispiel Pyronema omphalodes

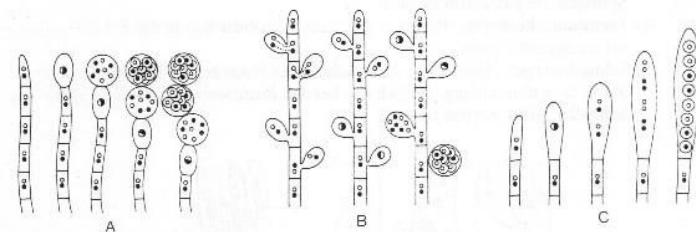


6.8.2 Beispiel Neurospora crassa

Die Selbstbefruchtung durch eigene Conidien ist ausgeschlossen.

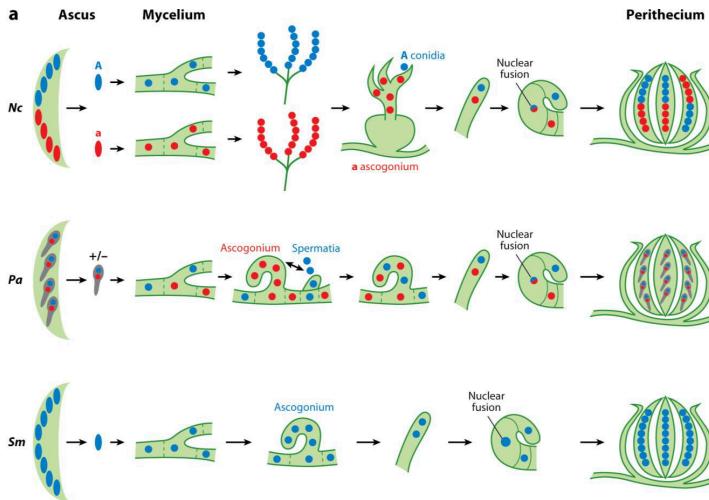


6.8.3 Weitere Arten der Ascusbildung



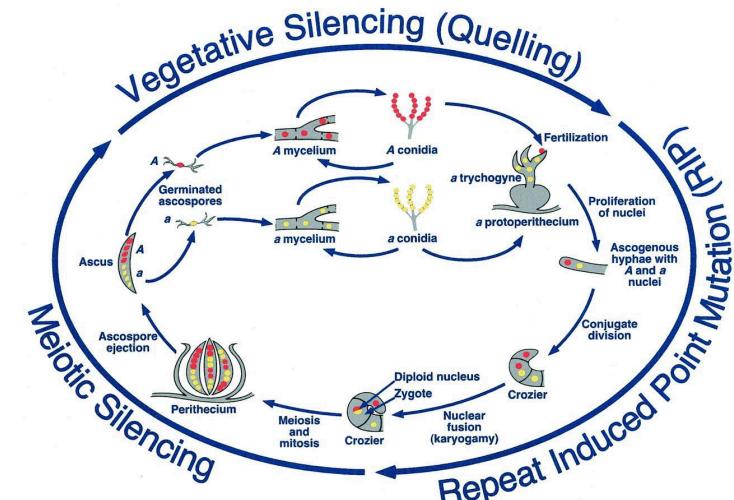
- a Kettentyp
- b Knospentyp
- c Terminalzellentyp

6.8.5 Heterothallie, Pseudohomothallie und Homothallie bei Pezizomycota

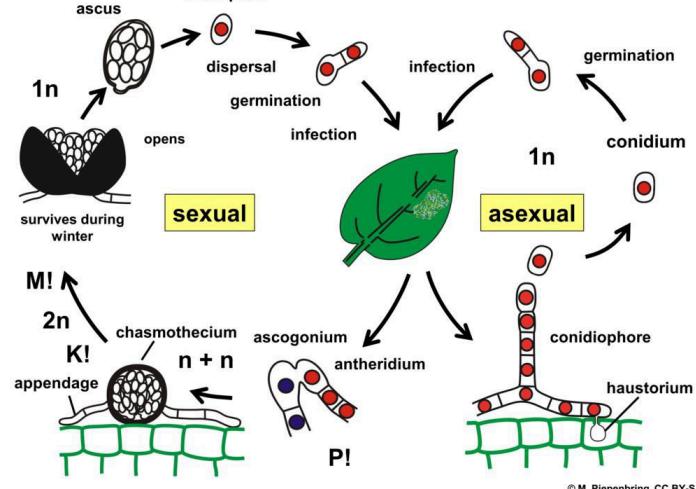


6.8.4 Eindämmung / Elimination von DNA

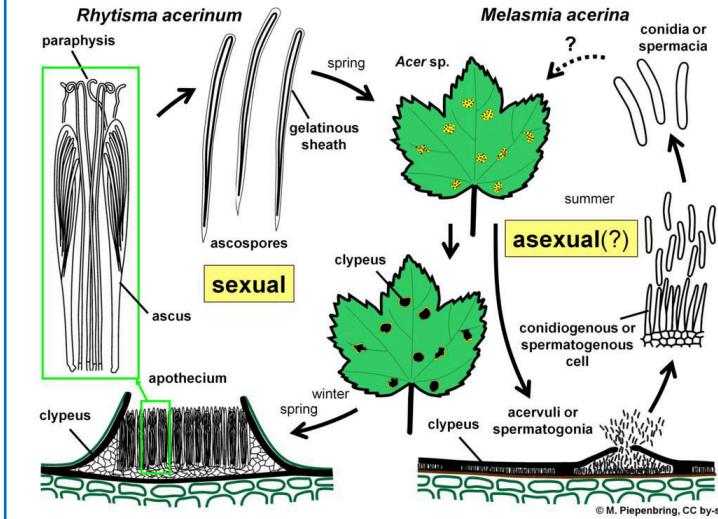
Die in der Grafik gezeigten Mechanismen zur Unterdrückung oder Elimination von Genen können zum Beispiel als Abwehr gegen Viren benutzt werden.



6.8.6 Beispiel echter Mehltau

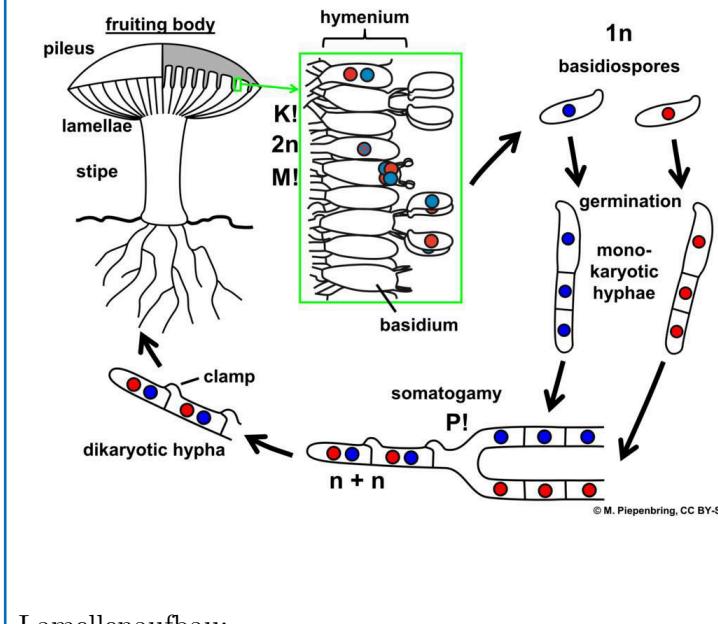


6.8.7 Beispiel Rhytisma acerinum

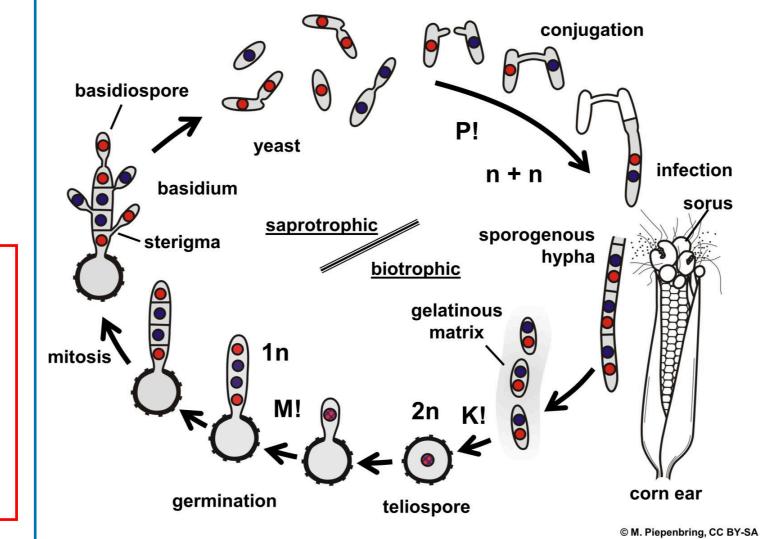
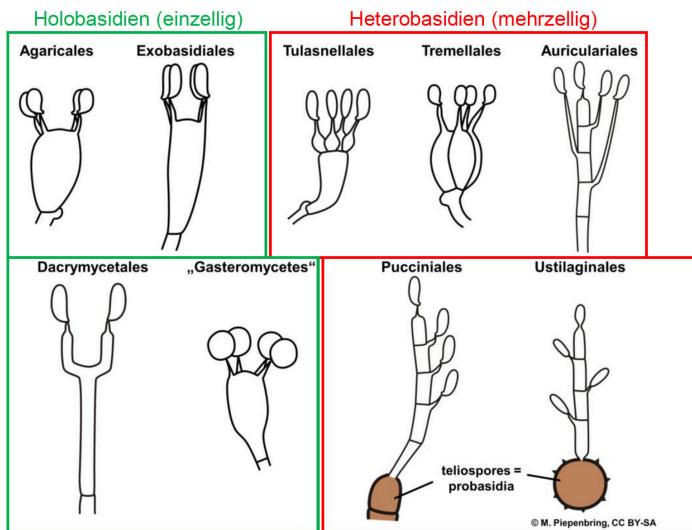
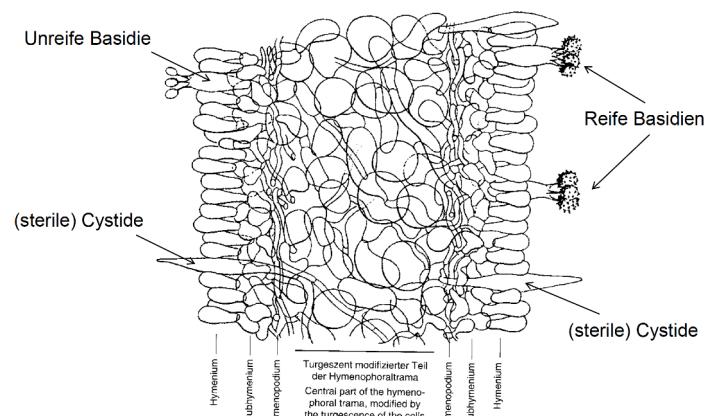


6.9 Basidiomycota

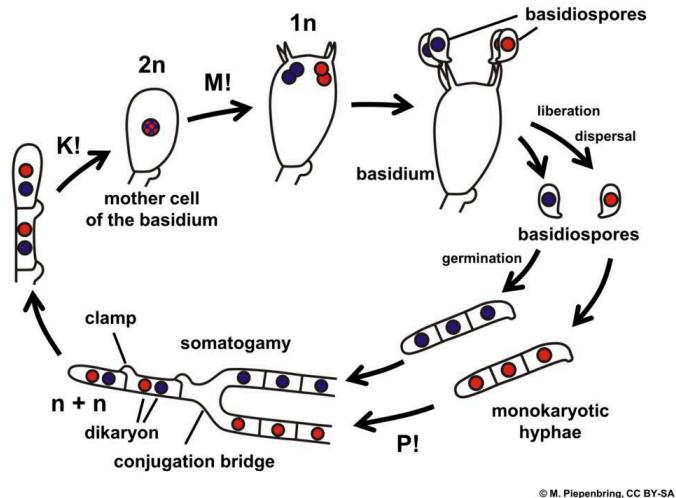
6.9.1 Reproduktionszyklus von Agaricomycotina (Agaricales)



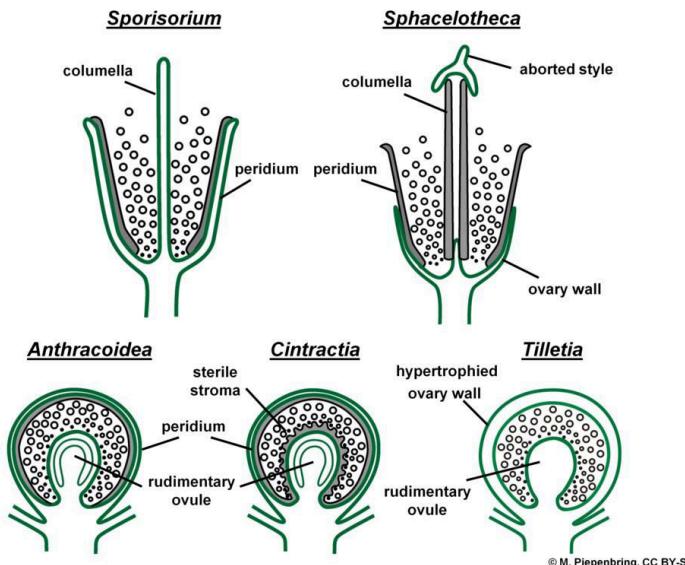
Lamellenaufbau:



Basidienbildung:



6.9.2 Reproduktionszyklus von Ustilaginomycotina



Einzelige Holo- und mehrzellige Heterobasidien:

Beispiel *Ustilago maydis* (Maisbrand)

6.10

bipolar
inbreeding 50% (MS >50%)
outcrossing 50% (MS <50%)
(MS = Mating Type Switching)

tetrapolar