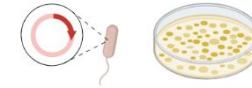
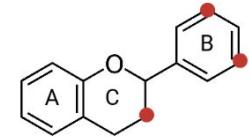
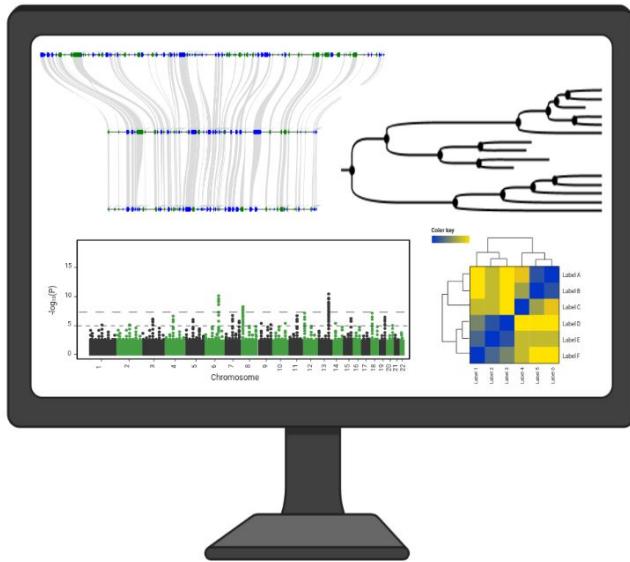


species
biosynthesis
plants
sites
genes
genomes
gene
splice
functional variants R2P-MYB
with data analysis
non-canonical
single reference
species evolution and identified
genes
plant
systems biology
genome
across
key species
conserved
RNA
RNA processing
sequencing
models
RNA transcription analysis
MYB intron retention RNA code



Grundlagen des pflanzlichen Stickstoffhaushalts

Prof. Dr. Boas Pucker

Organisation

PDF über GitHub frei verfügbar:

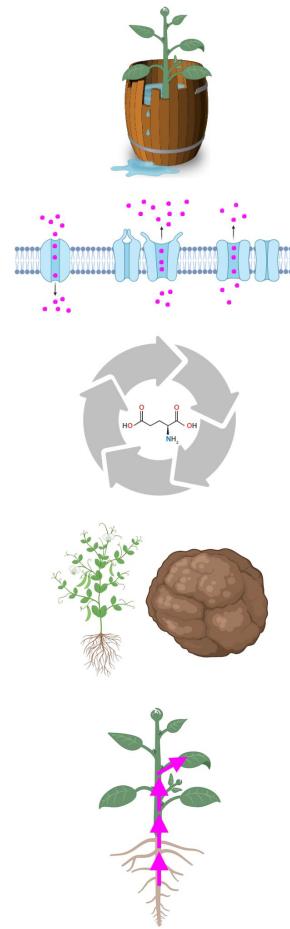
<http://bit.ly/3TT89aE>



Materialien unter CC BY 4.0 verfügbar (#OpenEducation)
Fragen, Feedback & mehr: b.pucker[a]tu-bs.de

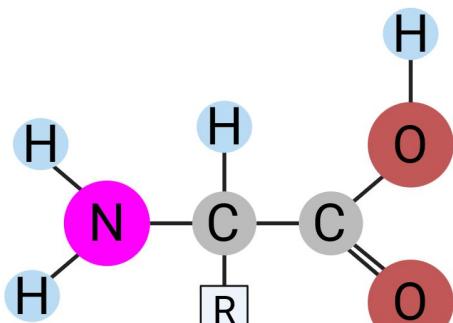
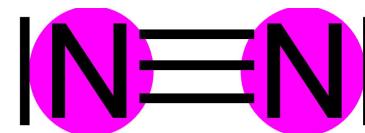
Übersicht

- Bedeutung von Stickstoff für Pflanzen
- Aufnahme aus der Umgebung
- Stickstoffassimilation
- Biologische Stickstofffixierung
- Stickstofftransport in Pflanzen

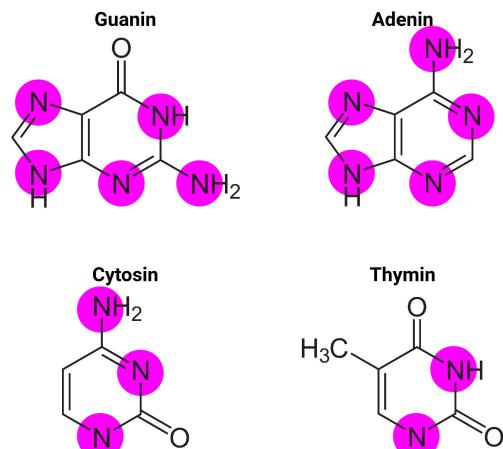


Stickstoff

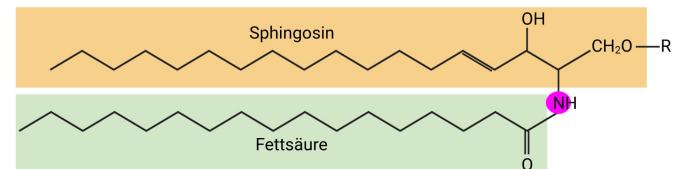
- Unsichtbar, geruchlos, geschmacklos und überall vorhanden (78% der Luft)
- Molekularer Stickstoff sehr stabil durch Dreifachbindung
- 1-5% der Pflanzentrockenmasse



Aminosäuren



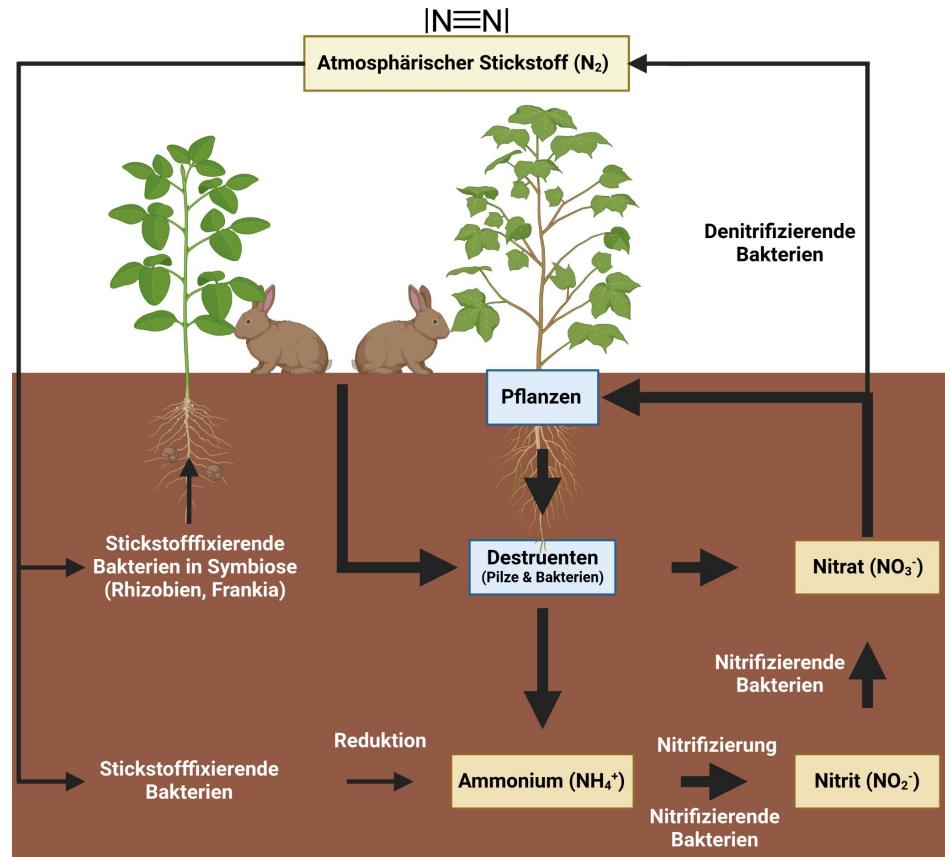
Basen



Sphingolipide

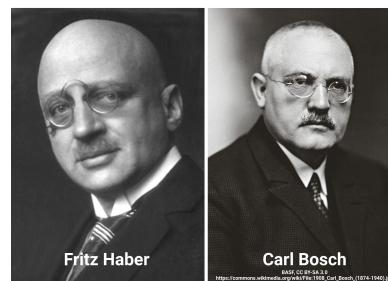
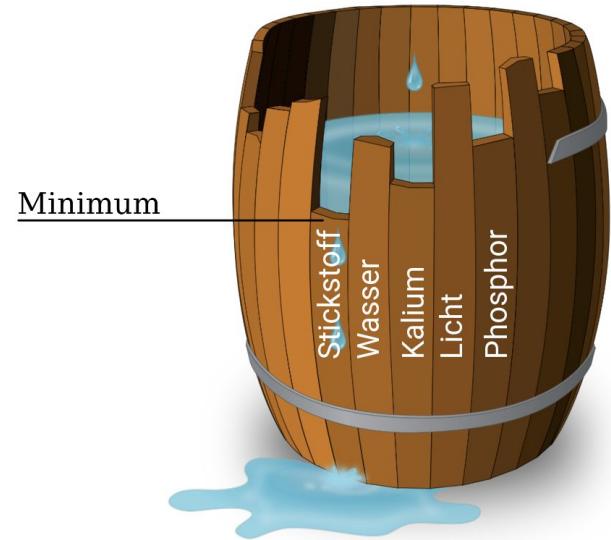
Atmosphärischer Stickstoffkreislauf

- Atmosphärischer Stickstoff (N_2) nicht direkt verwertbar
- Bakterielle Stickstofffixierung zu Ammonium (NH_4^+) ist energieintensiver Prozess
- Nitrifizierung wandelt Ammonium in Nitrit (NO_2^-) und weiter in Nitrat (NO_3^-)
- Denitrifizierende Bakterien wandeln NO_3^- in N_2



Stickstoff als limitierender Faktor der Biomassebildung

- Liebigsches Fass zeigt limitierenden Faktor des Pflanzenwachstums
- Haber-Bosch-Verfahren ermöglicht physikochemische Stickstofffixierung (Agrarrevolution Anfang des 20. Jhd.)
- Ammoniaksynthese aus Stickstoff und Wasserstoff unter hohem Druck und hoher Temperatur
- NPK-Dünger: Stickstoff, Phosphor und Kalium in allen Düngerkügelchen



Stickstoffverfügbarkeit im Boden

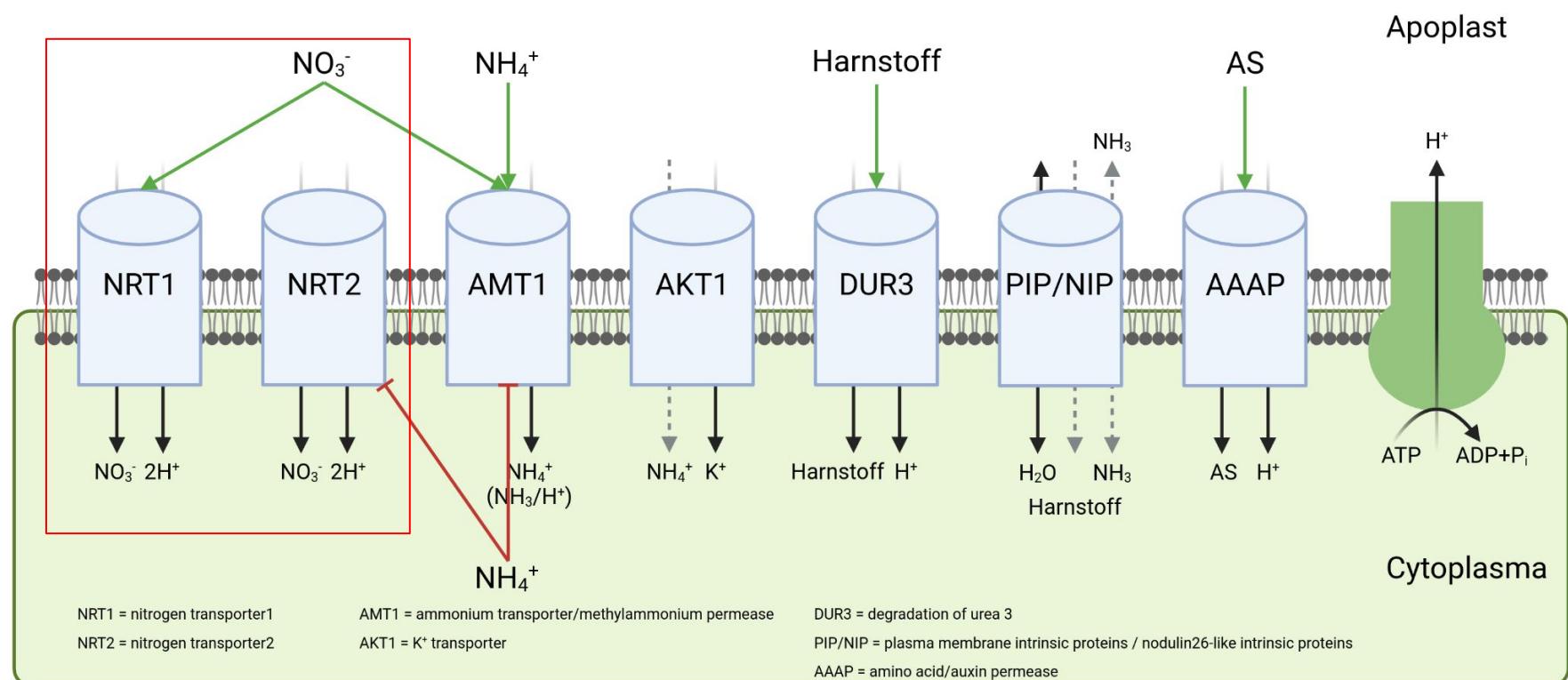
- Nitrat (NO_3^-): 1-5 mM
- Ammonium (NH_4^+): 20-200 μM
- Harnstoff: <70 μM
- Freie Aminosäuren: 1-150 μM
- Kurze Peptide
- Pflanzen brauchen bestimmtes Verhältnis von NO_3^- zu NH_4^+ für ideales Wachstum



<https://ccnull.de/foto/kleiner-setzling-in-erde/1090933>

Aufnahme von Stickstoff aus dem Boden (Nitrat)

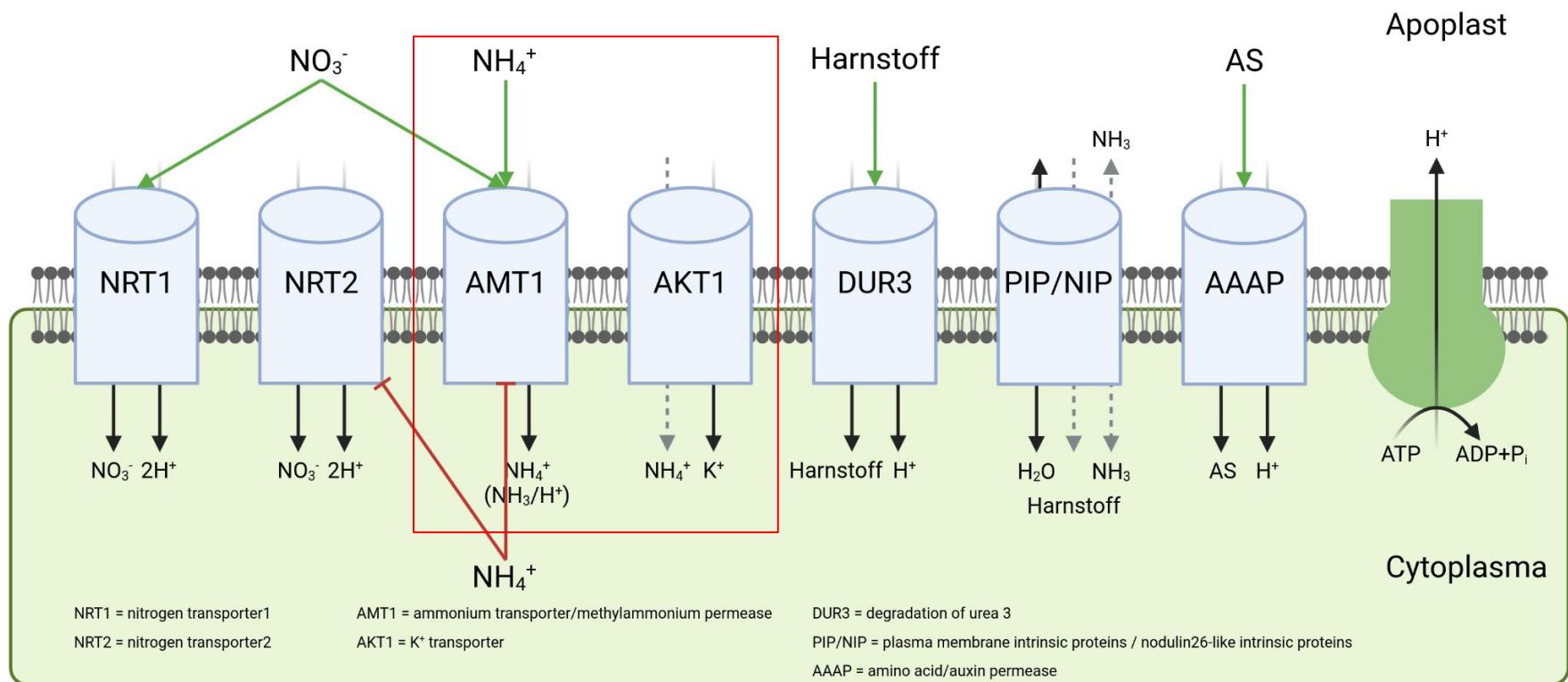
- NRT1 (NPF): Nitraaufnahme mit geringer Affinität
- NRT2: Nitraaufnahme mit hoher Affinität (induzierbar)



Review von Muratore et al., 2021: 10.3390/plants10040681

Aufnahme von Stickstoff aus dem Boden (Ammonium)

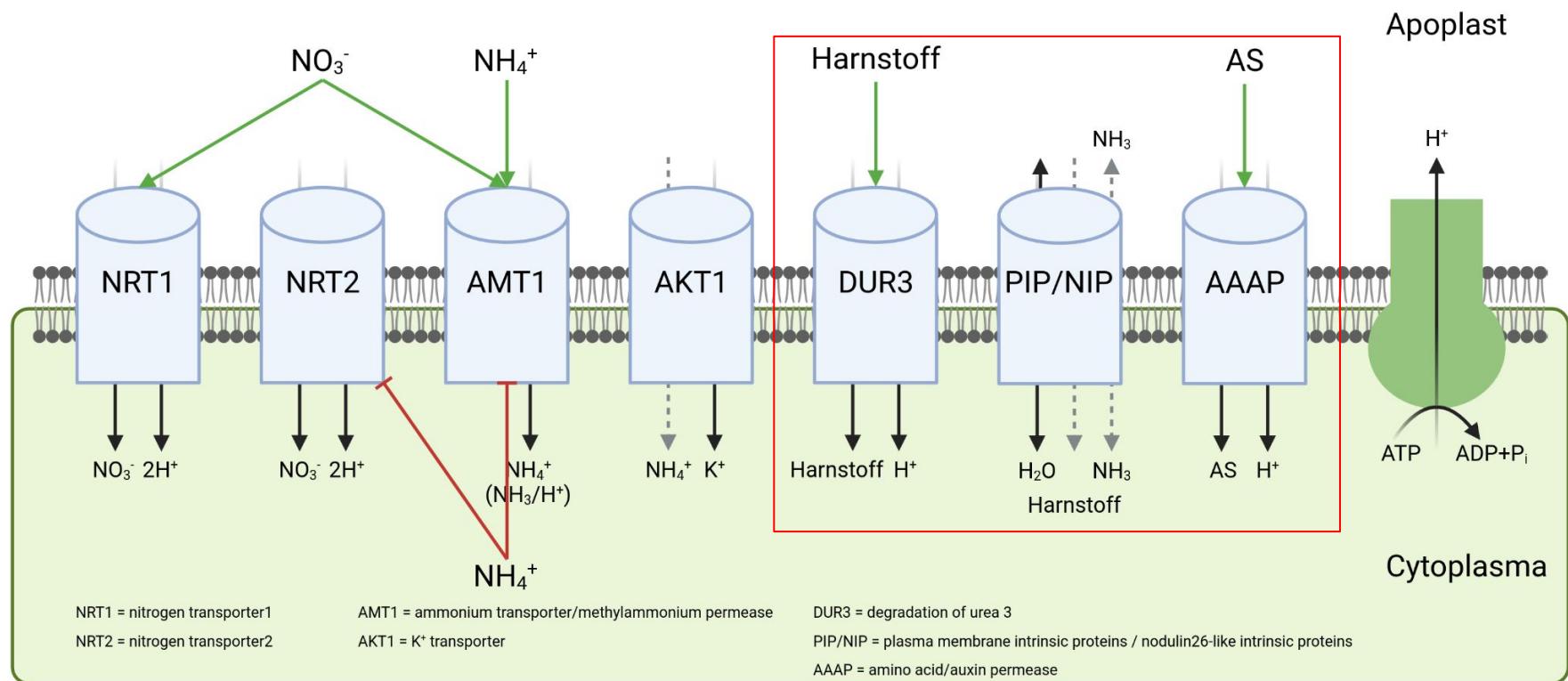
- AMT1: NH_4^+ -Uniport und NH_3/H^+ -Symport (hohe NH_4^+ -Konzentration ist toxisch)
- Nicht-selektive Kanäle / Aquaporine: NH_3 , NH_4^+ Diffusion in Zelle



Review von Muratore et al., 2021: 10.3390/plants10040681

Aufnahme von Stickstoff aus dem Boden (Harnstoff, AS)

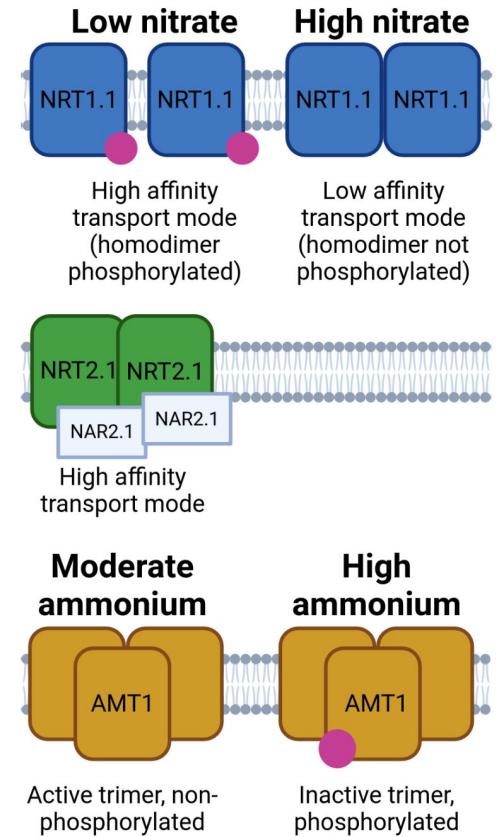
- DUR3 und PIP/NIP: Harnstofftransporter (H^+ -Symporter)
- AAAP: mögliche Aminosäuretransporter



Review von Muratore et al., 2021: 10.3390/plants10040681

Regulation der Stickstoffaufnahme

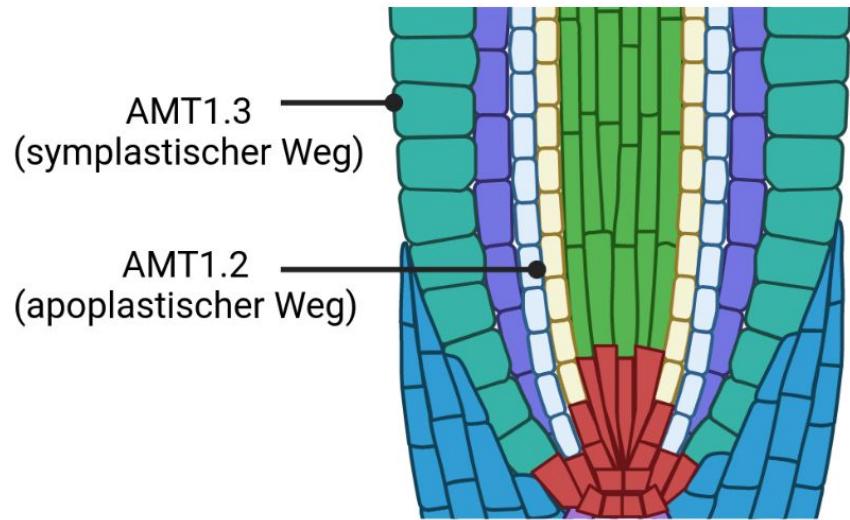
- Zu viel oder zu wenig Stickstoff stellt Herausforderung für Pflanzen dar
- Phosphorylierung der NRT1-Stickstoffimporter löst Dimere und steigert Affinität (bei geringer Nitratkonzentration)
- NRT1 fungiert als Transzeptor: Repressor für NRT2 (bei hoher Nitratkonzentration)
- AMT1 posttranslational reguliert (inaktives Trimer durch Phosphorylierung)



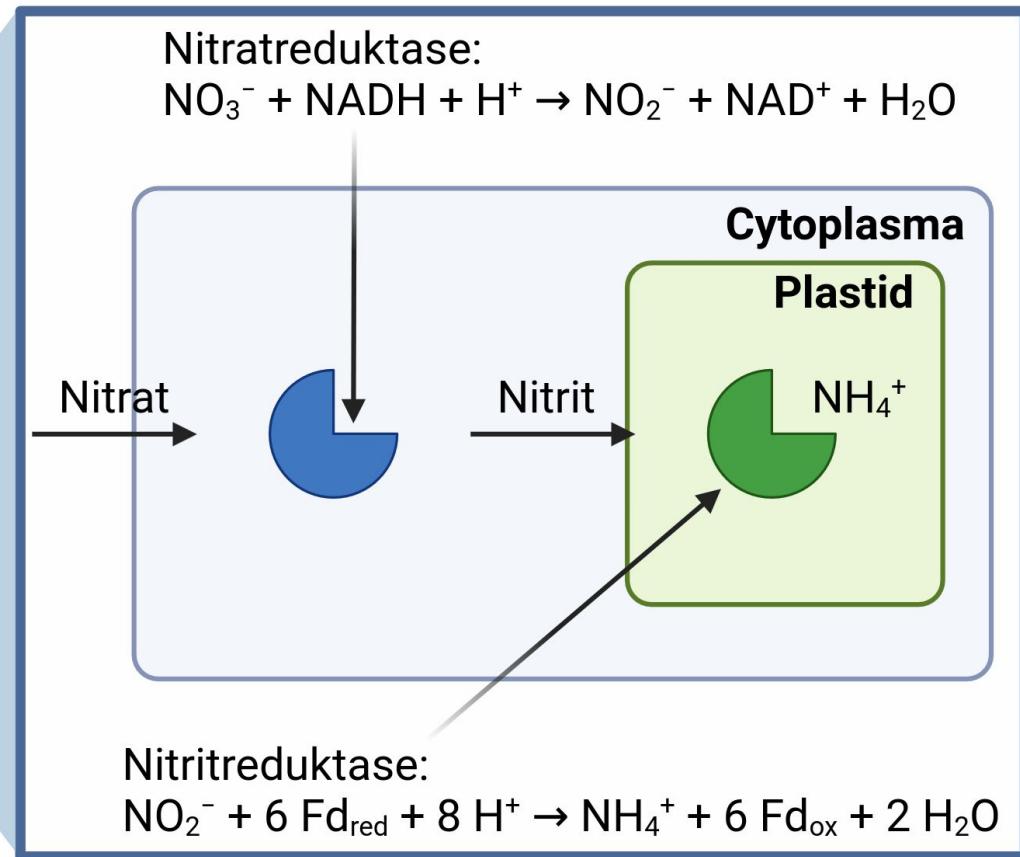
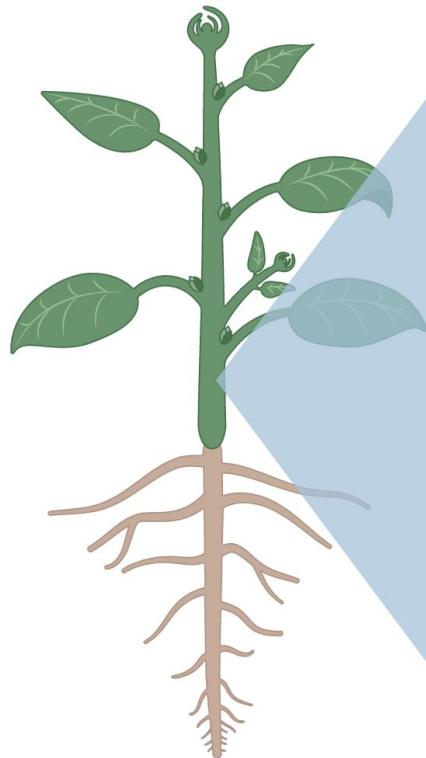
Review von Muratore et al., 2021: 10.3390/plants10040681

Symplastischer vs. apoplastischer Weg

- Symplastischer Weg:
 - durch Plasmodesmata
 - besser bei N-Mangel
 - AMT1.3 in Epidermis
 - fördert Wurzelwachstum
- Apoplastischer Weg:
 - durch Zellzwischenräume
 - schneller bei guter N-Versorgung
 - AMT1.2 in Endodermis
 - fördert Blattwachstum

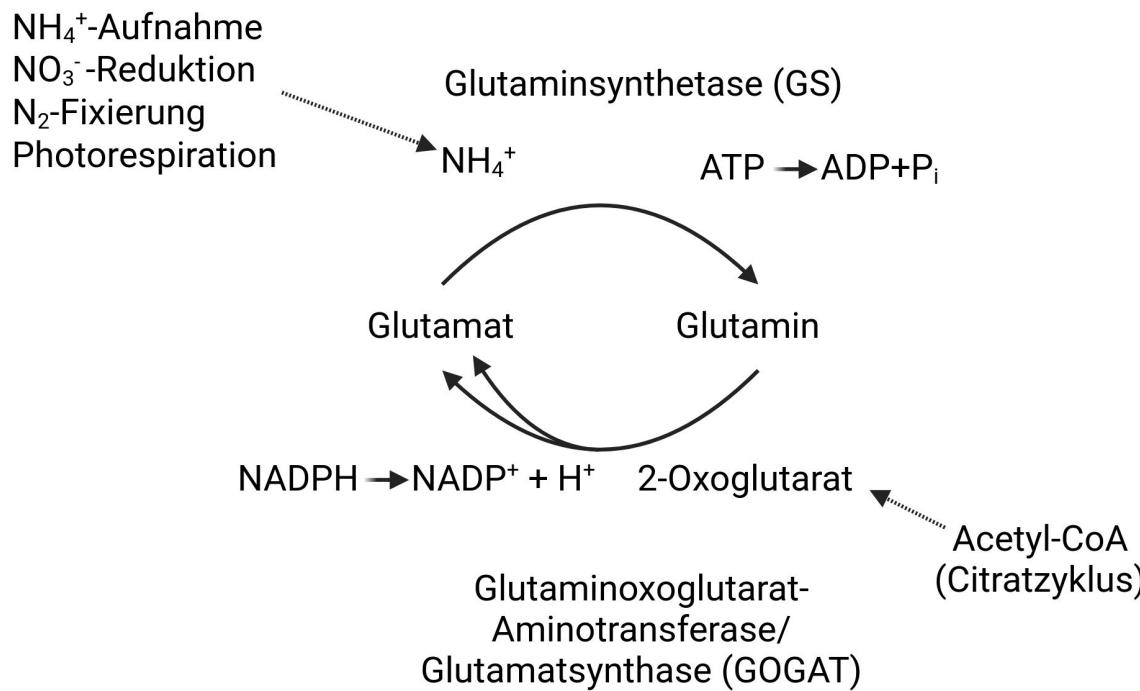


Stickstoffassimilation benötigt NH_4^+



- Ammonium wird in Aminosäuren assimiliert (GS/GOGAT-Zyklus)

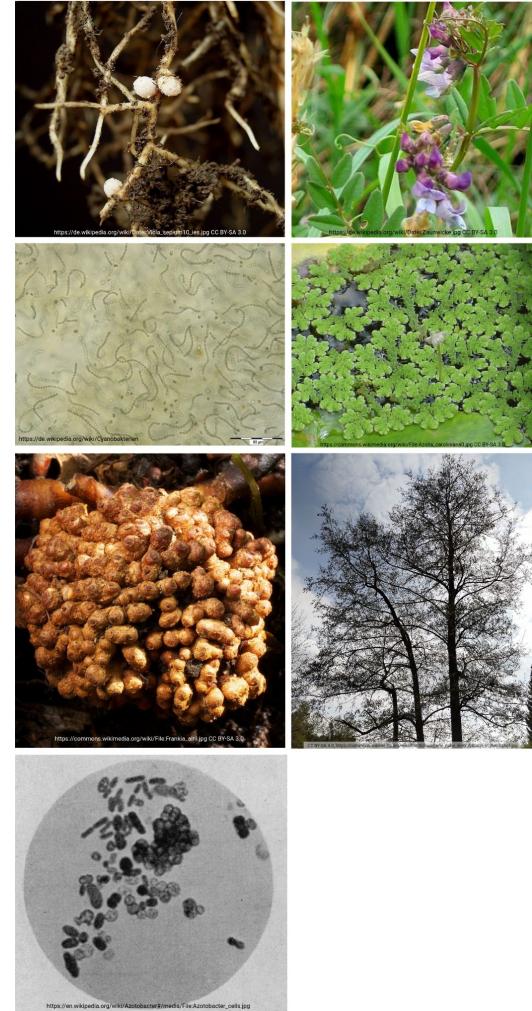
GS/GOGAT-Zyklus: NH_4^+ -Assimilation in Aminosäuren



- Transaminierungen ermöglichen die Synthese verschiedener Aminosäuren
- Aspartat & Asparagin bilden die Grundlage für die Biosynthese von DNA-Basen

Biologische Stickstofffixierung

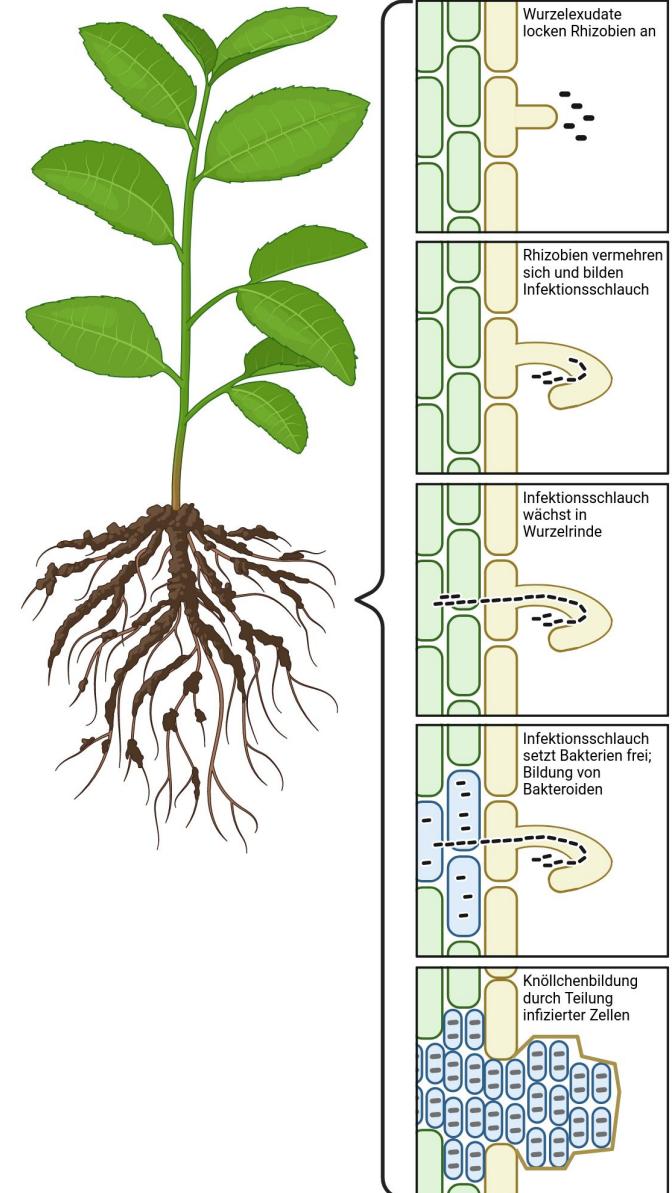
- Rhizobien (Knöllchenbakterien) fixieren in Interaktion mit Leguminosen Stickstoff
- Cyanobakterien fixieren Stickstoff in Ozeanen und in Symbiose für *Azolla*
- Erlen und Kasuarinen haben Symbiose mit stickstofffixierenden Frankia-Bakterien
- Freilebende Bakterien: *Azotobacter*, *Closterium*, *Klebsiella*, *Rhodospirillum*



Zehr, 2011: 10.1016/j.tim.2010.12.004
Karthikeyan, 2013: 10.1007/s12038-013-9362-3
Sanow et al., 2023: 10.1094/MPMI-10-22-0223-CR

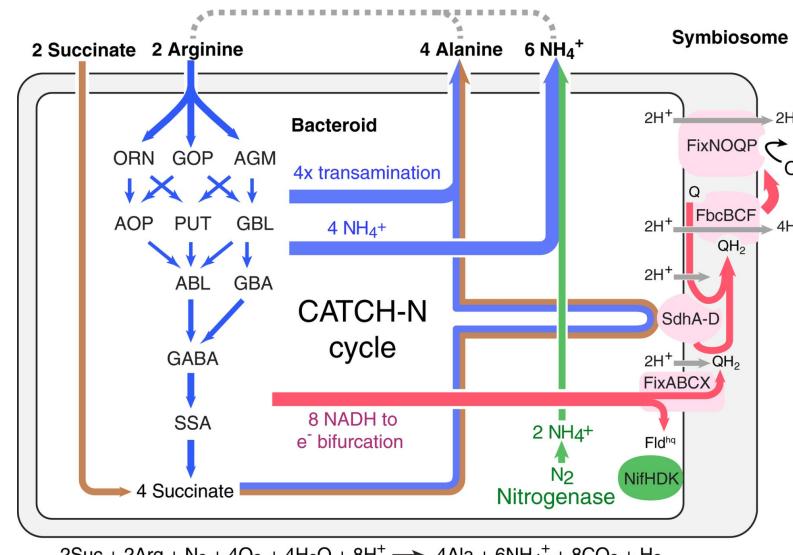
Knöllchenbildung

- Rhizobien werden durch Exsudate (z. B. Luteolin) chemotaktisch angelockt
- Wurzelknöllchen entstehen durch Zellvergrößerung assoziiert mit Polyploidisierung der Zellen
- Bakterien degradieren zu Bakteroiden (Symbiosomen)
- Bakterienstamm muss mit Pflanzenart kompatibel sein



Wurzelknöllchen - eine Symbiose?

- Stickstofffixierung ist energetisch teuer: 16 ATP pro N₂-Molekül
- Bakterien erhalten Succinat und Arginin von Pflanze
- NH₄⁺ an Pflanze liefert (Abgabe überschüssiger Elektronen)
- CATCH-N-Zyklus ermöglicht Überleben der Bakterien
- Pflanze bekämpft Bakterien (Sauerstoffentzug, Ansäuerung)



Flores-Tinoco et al., 2020: 10.15252/msb.20199419

Carnivore Pflanzen

- Carnivore Pflanzen fangen meist Einzeller, Algen, Gliedertiere oder Insekten als Stickstoffquelle
- Carnivore Pflanzen sind nur an extremen Standorten kompetitive



Anand2202, CC BY-SA 4.0,
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Nepenthes_in_the_Southern_Western_Shats.jpg



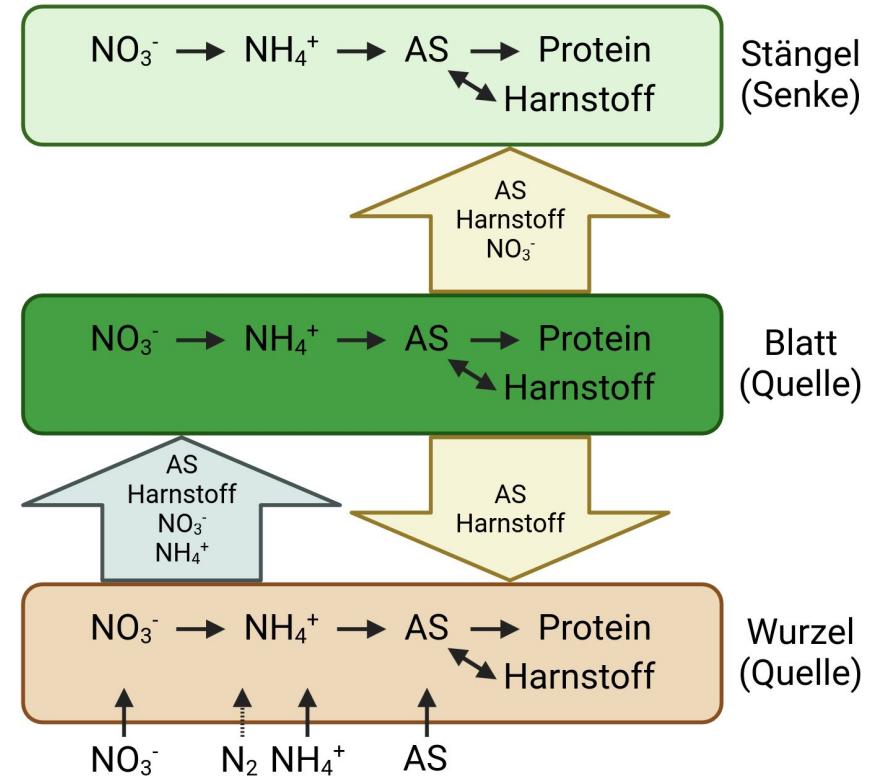
Jakob Horz



Samuel
Nestor
Meckoni

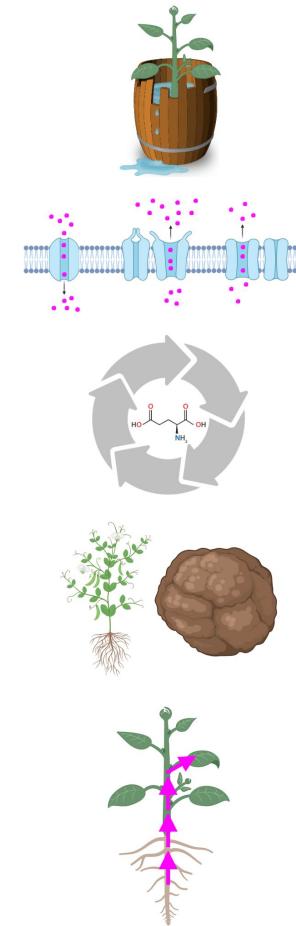
Transport zwischen Pflanzenorganen

- Transport via Phloem und Xylem möglich
- Aminosäuren (Asparagin) und Harnstoff sind organische Transportform von Stickstoff
- Stickstoff wird in der zentralen Vakuole gespeichert
- Samen sind wichtiges Senkengewebe wegen Lagerproteinsynthese



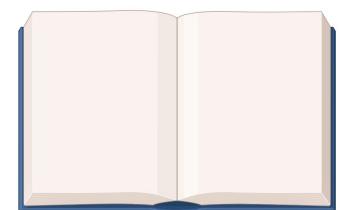
Zusammenfassung

- Stickstoff als limitierender Faktor
- Aufnahme aus der Umgebung
- Stickstoffassimilation (GS/GOGAT-Zyklus, Transaminierung)
- Biologische Stickstofffixierung (Knöllchenbakterien)
- Stickstofftransport in Pflanzen



Weiterführender Literatur

- Bedeutung von Stickstoff für Pflanzen: <https://doi.org/10.1111/nph.19508>
- Stickstoff-Transporter in Membran: <https://doi.org/10.3390/plants10040681>
- GS/GOGAT-Zyklus: <https://doi.org/10.1104/pp.105.071910>
- Biologische Stickstofffixierung: <https://doi.org/10.1038/nrmicro954>
- Stickstoff-Transport in Pflanze: <https://doi.org/10.1111/nph.14876>
- Carnivore Pflanzen: <https://doi.org/10.1080/17429145.2022.2038710>
- Stickstoff-Mangel: <https://doi.org/10.1111/nph.18833>



Materialverfügbarkeit

PDF über GitHub verfügbar:

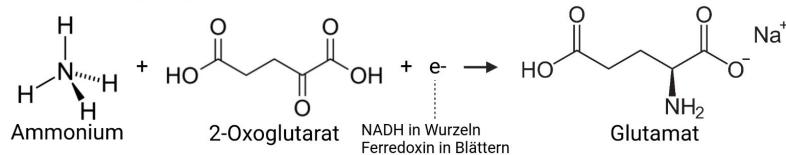
<http://bit.ly/3TT89aE>



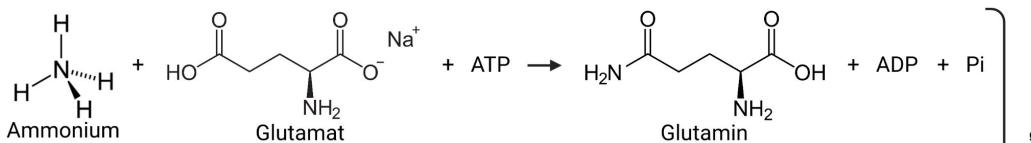
Ammoniumassimilation

- Glutamat-Dehydrogenase: Ammonium an 2-Oxoglutarat erzeugt Glutamat
- Glutamat-Ammonium-Ligase fügt Ammonium an Glutamat -> Glutamin
- Glutamat-Synthase transferiert Amidogruppe auf 2-Oxoglutarat -> 2x Glutamat

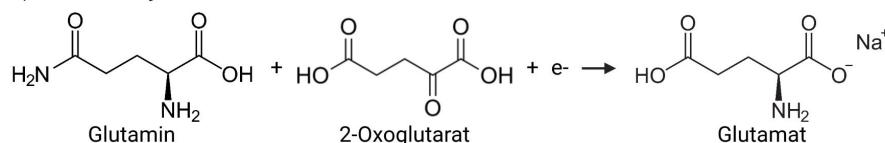
Glutamatdehydrogenase:



1) Glutamat-Ammonium-Ligase:



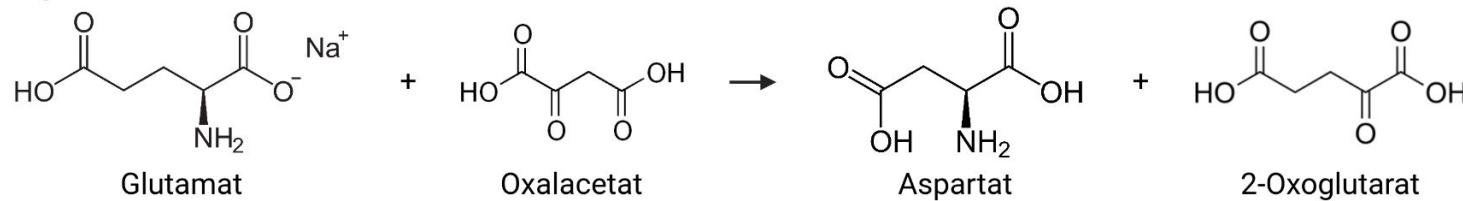
2) Glutamat-Synthase:



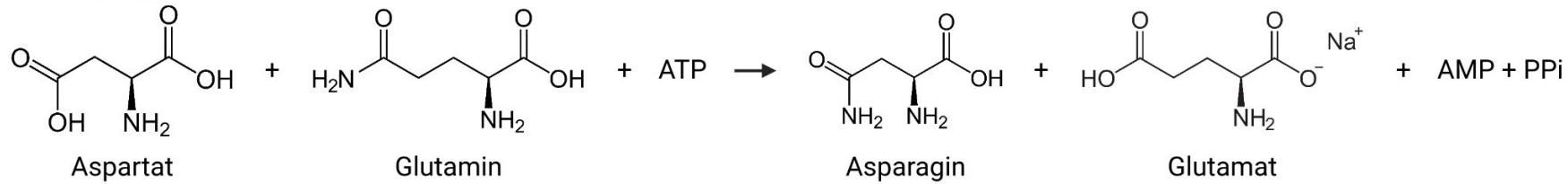
Transaminierungen

- Transaminierungen ermöglichen Synthese verschiedener Aminosäuren
- Asparaginsynthetase transferiert Amino-Gruppe von Glutamin auf Aspartat

Aspartat-Aminotransferase:

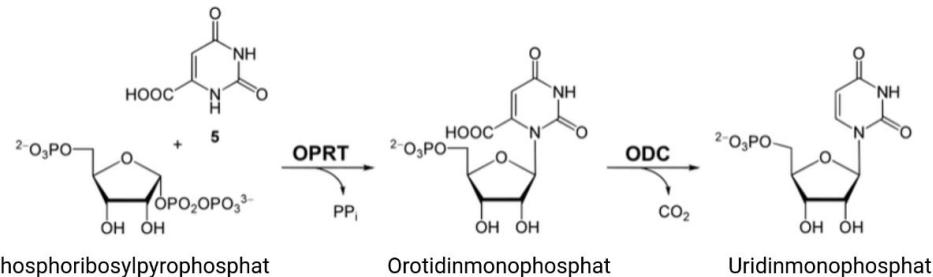
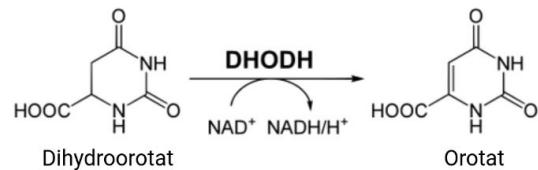
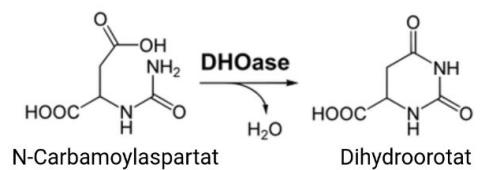
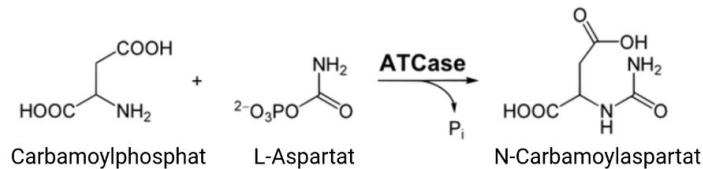


Asparaginsynthetase:



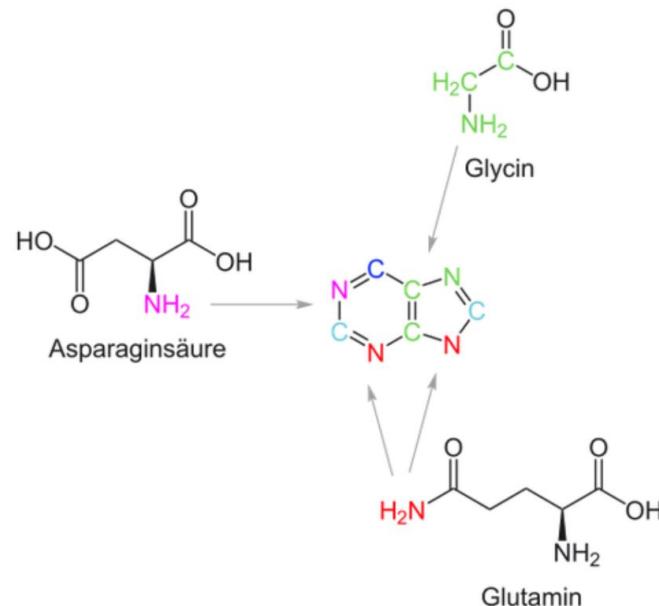
Biosynthese von DNA/RNA-Bausteinen

Pyrimidinbiosynthese:



Modifiziert von <https://de.wikipedia.org/wiki/Pyrimidin-de-novo-Synthese>

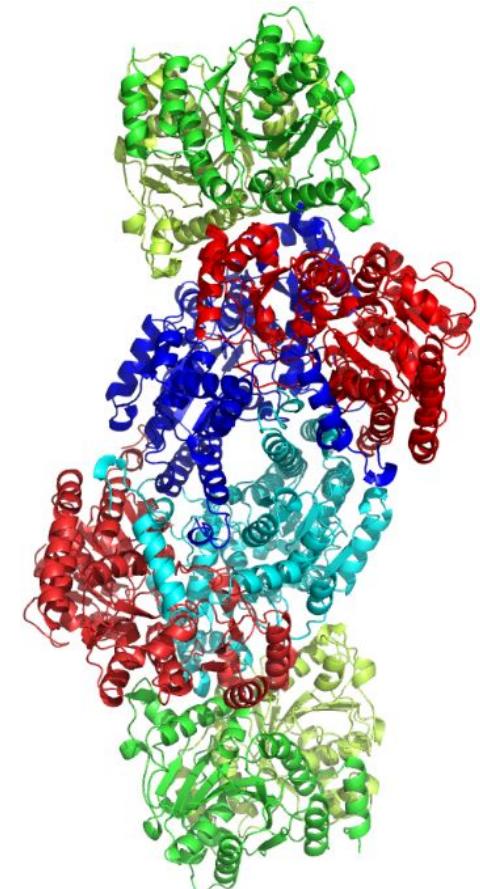
Purinbiosynthese:



Modifiziert von <https://de.wikipedia.org/wiki/Purinbiosynthese>

Mechanismus der Stickstofffixierung

- Zentrales Enzym ist MoNitrogenase (zwei Komponenten)
 - I = Nitrogenase Molybdän-Eisen (MoFe) Protein
 - II = Nitrogenase Eisen (Fe) Protein
- Sauerstofffreie Umgebung und große Mengen ATP erforderlich
- Leghämoglobin verursacht rote Farbe (Protein von Pflanzen, Porphyrinring von Bakterien)



Jjijjejsj, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nitrogenase.png>

Stickstoffmangel - warum werden Pflanzen rot?

- Stickstoffmangel induziert die Anthocyanbiosynthese
- Anthocyane werden in Anthocyanoplasten oder Anthocyanic Vascular Inclusions (AVIs) gesammelt
- Postulierte Funktionen:
 - Stark glykosylierte Anthocyane als Zuckerspeicher
 - Abfangen von ROS (in Vakuole)
 - Photoprotektion
 - Lebenszeitverlängerung zur Nährstoffextraktion
- Anthocyane werden als Antwort auf verschiedene Stresse gebildet



Gould et al., 2002: 10.1046/j.1365-3040.2002.00905.x
Lo Piccolo et al., 2018: 10.3389/fpls.2018.00917
Jezek et al., 2023: 10.1111/nph.18833

Stickstoffdüngung

- Faktoren für Stickstoffdüngestrategien und -managementpraktiken: ökologische Auswirkungen und Ressourceneffizienz
- Leguminosen als Zwischenfrucht anbauen
- Stickstoffdünger:
 - Kalkammonsalpeter
 - Harnstoff
 - Kalkstickstoff
 - Schwefelsaures Ammoniak
 - Organische Stickstoffdünger (Hornspäne & Hornmehl)
- *P. psycrotolerans* könnte für Denitrifikation von Böden verwendet werden (anoxic)

Einfluss von Stickstoff auf das Pflanzenwachstum

- Expression der *AMT1*-Gene ist durch NH_4^+ -Konzentration gesteuert
- Gezielte Düngung kann schnelle AMT1.2-Route verwenden, um Ressourcen in oberirdische Strukturen zu investieren