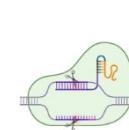
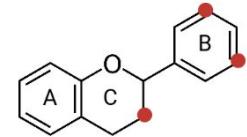
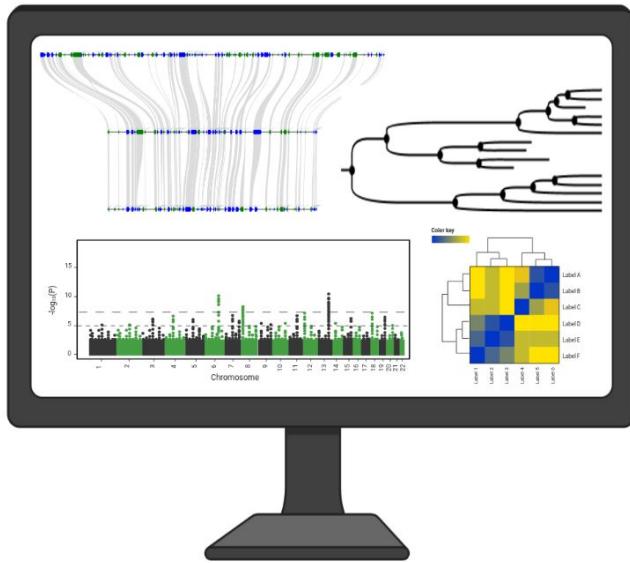


species  
biosynthesis  
plants  
sites  
genetic  
functional variants  
with  
decreasing  
single reference  
genes  
plants  
key regulatory  
sites  
systems biology  
genomes  
across  
genotype  
key regulatory  
sites  
conserved  
regions  
RNA-seq  
RGA  
transcription  
sites  
MYB  
interactions  
DNA-seq



# Molekulare Reaktion von Pflanzen auf abiotischen Stress

Prof. Dr. Boas Pucker

# Organisation

PDF über GitHub frei verfügbar:



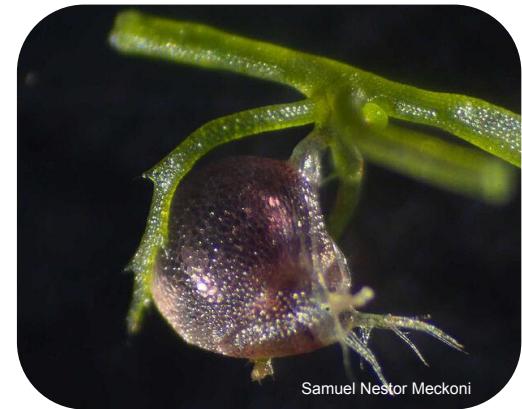
<https://lnk.tu-bs.de/vPugfT>



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

# Übersicht

- Was ist Stress?
- Typen von Stress
- Stress-Wahrnehmung
- Informationsweiterleitung
- Molekulare Stressantwort
- Beispiele: Salzstress
- Biotechnologie: Priming und genetische Verbesserungen



Samuel Nestor Meckoni

# Was ist Stress?

Stress = Beeinträchtigung des Wachstums oder der Vermehrungsfähigkeit



Wasserverfügbarkeit



Usien, CC BY-SA 3.0



Lena Fürstenberg



Stickstoffverfügbarkeit



Jakob Horz



Isdenion, CC BY-SA 3.0



Temperatur

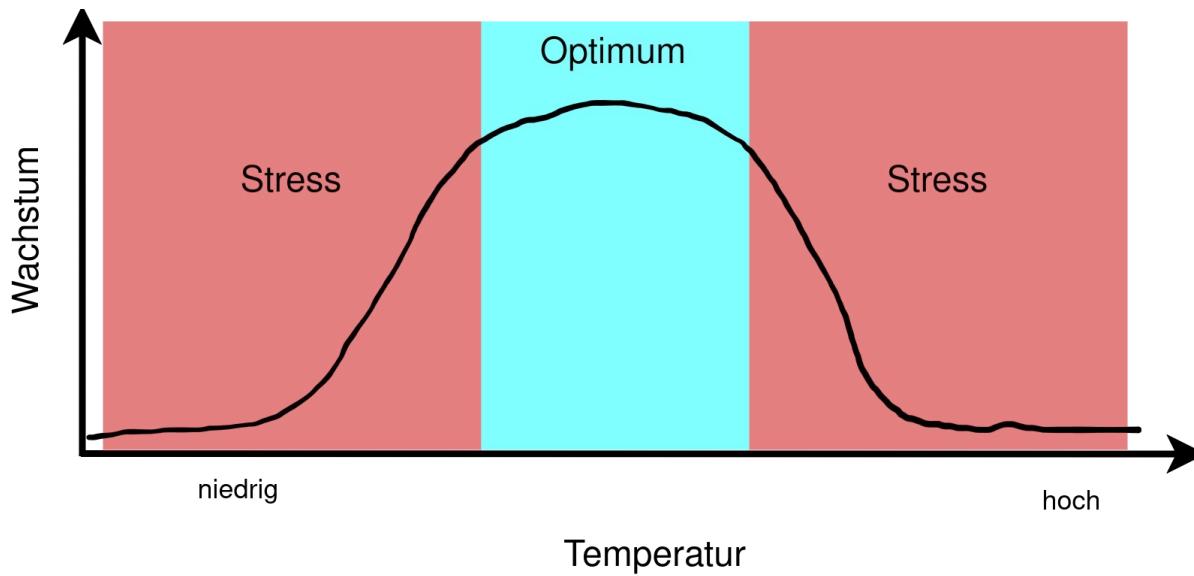


<https://doi.org/10.1038/s42003-023-05044-1>

Für verschiedene Pflanzenarten ganz unterschiedliche Bedingungen

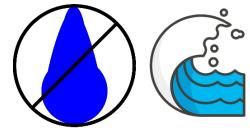
# Optimumskurve

- Abiotisch = Stressfaktoren sind nicht durch Lebewesen bedingt
- Für viele Faktoren lässt sich eine Optimumskurve bestimmen
- Interaktion verschiedener Faktoren ist möglich



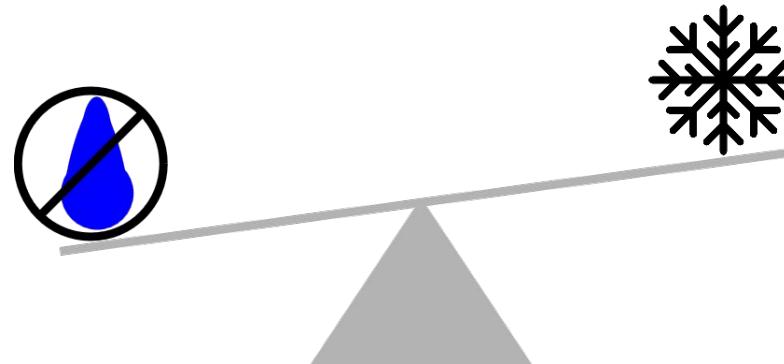
# Typen von abiotischem Stress

- Dürre / Überflutung
- Salz (hohe Salzkonzentrationen im Boden)
- Kälte (Frost) / Hitze
- Schwermetalle (z. B. Cadmium, Kupfer)
- Licht (UV-Strahlung, übermäßige / unzureichende Beleuchtung)
- Nährstoffmangel (z. B. Phosphor- oder Stickstoffmangel)
- Wind / mechanische Einwirkungen



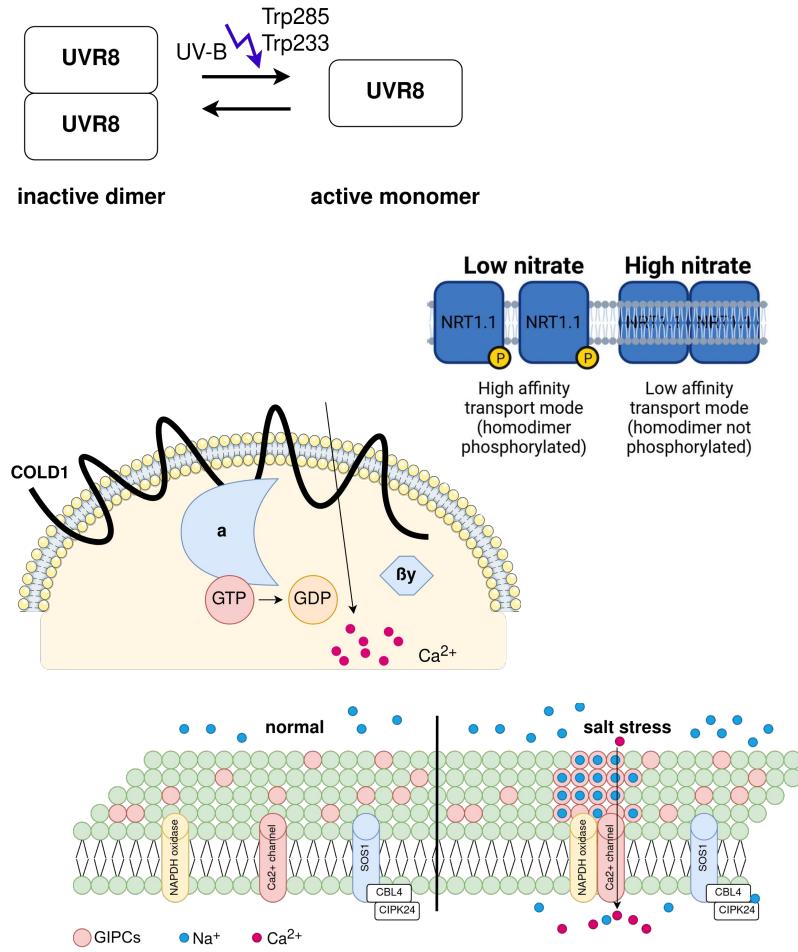
# Komplexität von Stress und Trade-offs

- Viel Ereignisse sind eine Kombination verschiedener Stressfaktoren
  - Starke Sonnenstrahlung: UV, Hitze, Wassermangel
  - Überflutung: kein Licht, kein O<sub>2</sub>, mechanischer Stress
- Jede Stressantwort hat (metabolische) Kosten
- Prioritäten für verschiedene Stressantworten müssen reguliert werden
- Komplexe Verschaltung der molekularen Signaltransduktionswege



# Wie detektieren Pflanzen Stress?

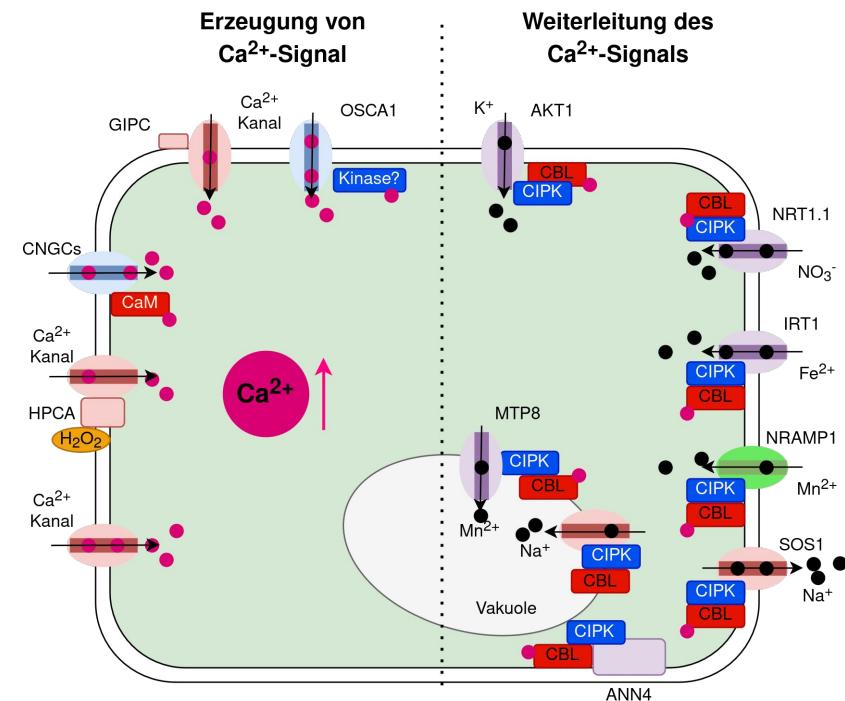
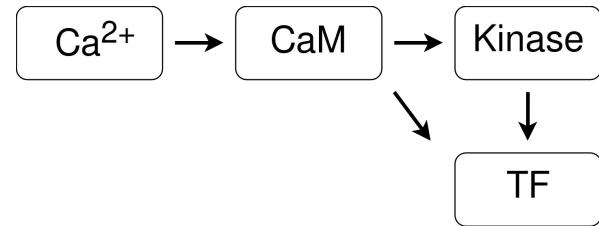
- UV-Stress: UV-Licht löst UVR8-Homodimer und aktiviert sie dadurch
- Stickstoffmangel: NRT1.1/NPF6.3 ist ein Transzeptor für die Nitrataufnahme
- Detektion von Kälte durch COLD1
- $\text{Na}^+$ -Detektion durch spezielle Lipide, die Glycosyl Inositol Phosphoryl Ceramides (GIPCs)



UVR8 = UV RESISTANCE LOCUS 8  
 NRT1.1 = NITRATE TRANSPORTER 1  
 NPF6.3 = NRT1/PTR FAMILY  
 COLD1 = CHILLING-TOLERANCE DIVERGENCE 1  
 GIPCs = glycosyl inositol phosphoryl ceramides  
 MOCA1 = monocation-induced  $[\text{Ca}^{2+}]$  increases 1

# Signalweiterleitung mittels $\text{Ca}^{2+}$

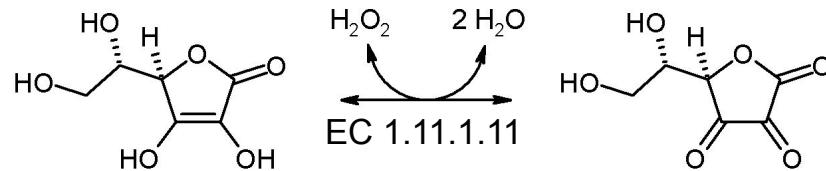
- Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ): fast universeller, sekundärer Botenstoff in Signalweiterleitung
- Bewegung von  $\text{Ca}^{2+}$  in und aus Zelle involviert zahlreiche Proteine
- CBL, Calmodulin (CaM): intrazelluläre  $\text{Ca}^{2+}$ -Sensoren (ca. 50 verschiedene)
- CDPK:  $\text{Ca}^{2+}$ -abhängige Kinase
- CIPK, CCaMK: Kinasen zur Signalweiterleitung
- $\text{Ca}^{2+}$ - und  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Signal verstärken sich gegenseitig



CBL = Calcineurin-B-like Proteins; CIPK = CBL-interacting protein kinases; CDPK =  $\text{Ca}^{2+}$ -dependent protein kinase; CCaMK =  $\text{Ca}^{2+}$ /CaM-dependent kinase

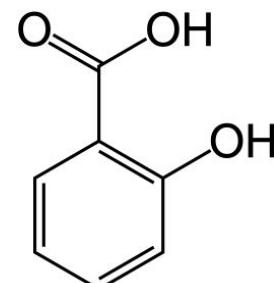
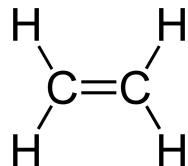
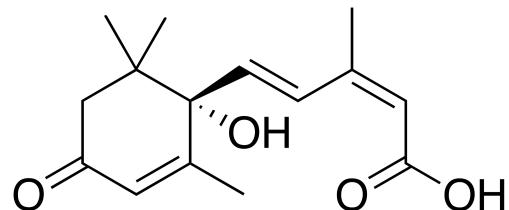
# Reaktive Sauerstoffspezies (ROS)

- Reaktive Sauerstoffspezies (ROS) - mit einer Doppelrolle
  - Hydrogenperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )
  - Superoxidanion ( $\text{O}_2^{\cdot-}$ )
- NADPH-Oxidasen sind wichtige ROS-Quelle
- Enzyme (Auswahl): jeweils viele Genkopien pro Spezies
  - Katalase (CAT):  $2 \times \text{H}_2\text{O}_2$  zu  $\text{O}_2$  und  $2 \times \text{H}_2\text{O}$
  - Superoxid-Dismutase (SOD):  $2\text{H}^+ + 2\text{xO}_2^{\cdot-}$  zu  $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$
  - Ascorbat-Peroxidase (APX):  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Detoxifikation



# Molekulare Signalübertragung

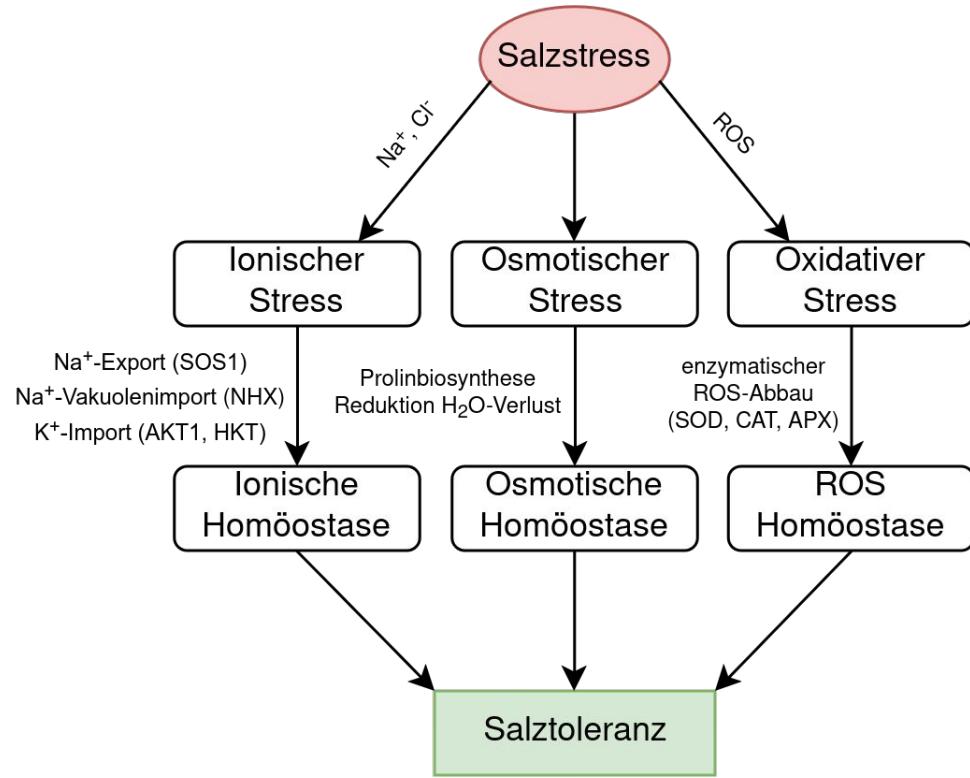
- Transkriptionsfaktoren zur Kontrolle der Genaktivitäten
  - ERF: wichtig bei Trocken-, Salz- und Kältestress (>100)
  - NAC: meist aktiv als Dimer (ca. 100)
  - WRKY: aktiv als Homo- oder Heterodimer (meist <100)
  - DREB: wichtig bei Trocken-, Salz- und Kältestress (ca. 50)
- Phytohormone (abiotische Stressantwort):
  - ABA (abscisic acid): Trockenstress, Salzstress, Temperaturstress
  - Ethylen: Salzstress, Überflutung
  - Salicylsäure: Trockenstress, Temperaturstress



ERF = ethylene response factor; NAC = NAM, ATAF, und CUC; WRKY = Tryptophan, Arginin, Lysin, Tyrosin; DREB = Dehydration-Responsive Element Binding Proteins

# Salzstress

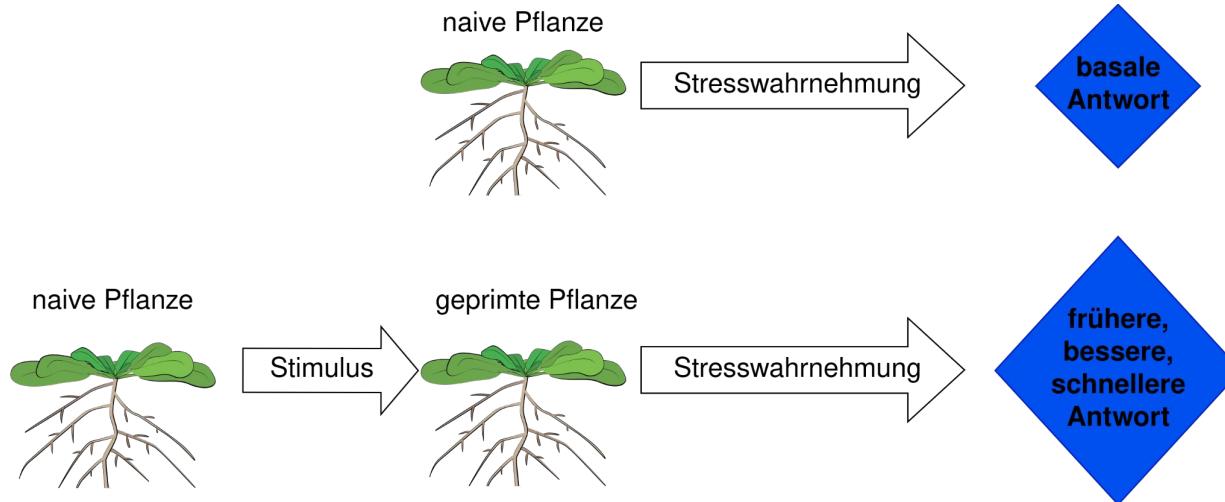
- Detektion durch Kanäle/Sensoren aktiviert ABA- und Ethylenbiosynthese
- DREBs regulieren Osmotoleranz
- Ionischer Stress: Homöostase von  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  durch selektiven  $\text{Na}^+$ -Export und  $\text{K}^+$ -Import
- Osmotischer Stress: Prolinbiosynthese und Minimierung des Wasserverlusts
- Oxidativer Stress: enzymatischer ROS-Abbau (SOD, CAT, APX)



SOS1 = Salt Overly Sensitive 1, NHX =  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  Exchangers (Vakuolenimport), AKT1 = *Arabidopsis K<sup>+</sup> Transporter 1*, HAK = High-Affinity K<sup>+</sup> Transporters, DREB = Dehydration-Responsive Element Binding Proteins, SOD = Superoxiddismutase, CAT = Katalase, APX = Ascorbatperoxidase

# Priming

- Abiotischer Stress löst Reaktion der Pflanze aus, die zukünftig hilfreich ist
- Geringere Empfindlichkeit gegenüber Pilzbefall oder Viren
- Höhere Toleranz gegenüber großer Hitze oder Kälte
- Beispiel: Priming an jungen Tomatenpflanzen (HortiPrimed)



# Genetische Verbesserung der Stresstoleranz

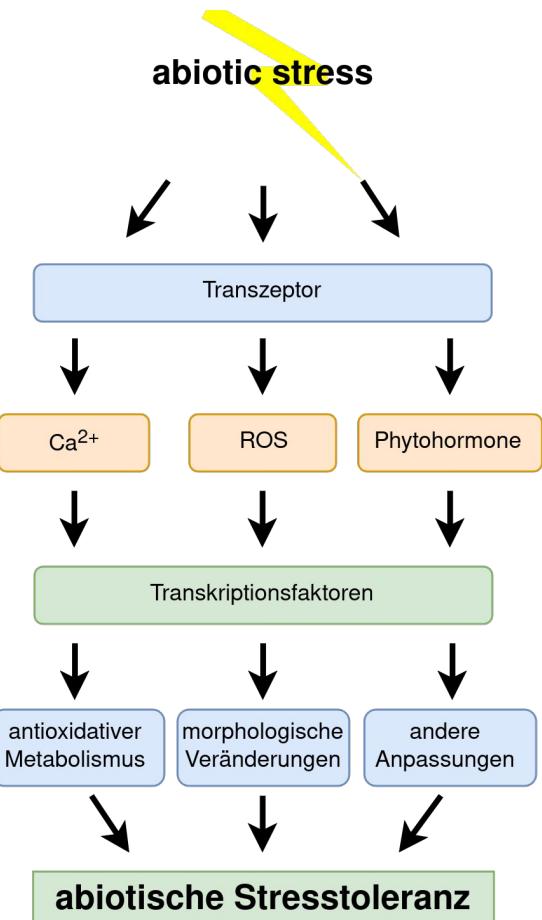
- Züchtung mit molekularen Markern in Stresstoleranz-Genen
- SOD aus Mangrove in Reis eingebracht führt zu besserer Trocken- und Salzstresstoleranz (Prashanth, 2008)
- OsAPX1 oder OsAPX2-Überexpression in Reis hat Trockentoleranz verbessert (Sato, 2011; Zhang, 2013)



SOD = Superoxiddismutase  
APX = Ascorbatperoxidase

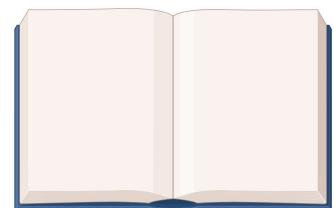
# Zusammenfassung

- Stressbedingungen sind für jede Art individuell
- Wahrnehmung & Integration von verschiedenen Stress-Signalen
- Reaktionen auf verschiedene Stressfaktoren können ähnlich sein (ROS-Abbau)
- Beispiel Salzstress
- Priming and genetische Verbesserungen



# Weiterführender Literatur

- UVR8 (UV-Stressantwort): Liu et al., 2024: 10.1038/s41467-024-45575-7
- $\text{Ca}^{2+}$ -Signaling: Ranty et al., 2006: 10.4161/psb.1.3.2998; Dong et al., 2022: 10.1111/jipb.13228
- ROS: You & Chan, 2015: 10.3389/fpls.2015.01092
- Salzstress: Dong et al., 2022: 10.1111/jipb.13228
- Streichel-Gen: Lange & Lange, 2015: 10.1038/nplants.2014.25
- Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften: 10.1007/978-3-662-61943-8



# Fragen zur Lernerfolgskontrolle

1. Welche Arten von abiotischem Stress gibt es?
2. Welche Mechanismen der Stressdetektion gibt es in Pflanzen?
3. Welche Transkriptionsfaktorfamilien sind besonders wichtig für die pflanzliche Antwort auf abiotischen Stress?
4. Was ist die doppelte Rolle von ROS?
5. Wie reagieren Pflanzen auf starkes UV-Licht?
6. Wie reagieren Pflanzen auf oxidativen Stress?
7. Welche Enzyme dienen dem Abbau von ROS?

# Zeit für Fragen!

PDF über GitHub verfügbar:



<https://lnk.tu-bs.de/vPugfT>



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



# Wenn Pflanzen rot werden - Anzeichen von Stress



Anthocyane



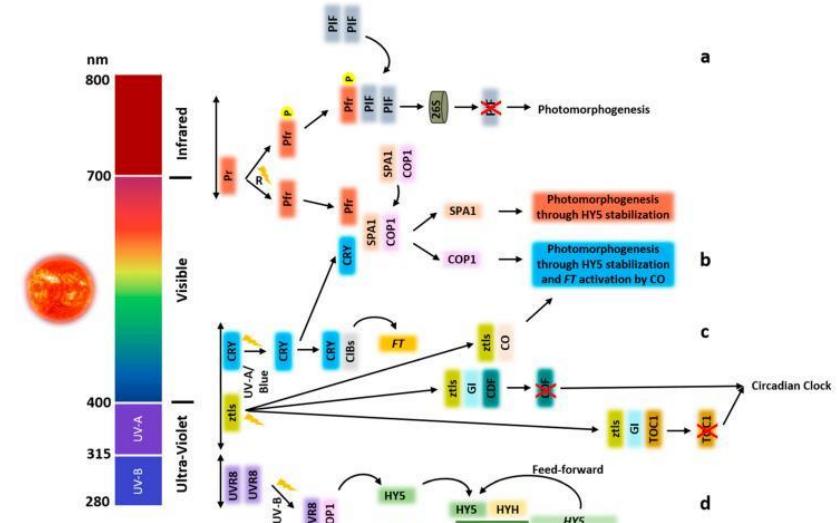
Betalaine



Carotenoide

# Wie detektieren Pflanzen Stress (Beispiel Licht)?

- Lichtrezeptoren sind spezifisch für bestimmte Wellenlängen
- Phytochromes = rotes Licht (aktiviertes Pr) und infrarotes Licht (inaktiviertes Pfr)
- Cryptochromes = aktiviert durch blaues Licht (CRY)
- Phototropins = UV-A/blaues Licht aktiviert PHOT2, aber inaktiviert PHOT1
- Zeitlupe-Proteine = UV-A/blaues Licht aktiviert ZTLs
- **UVR8-Proteine** = UV-Licht löst Homodimer und aktiviert es damit



# Molekulare Anpassungen an abiotischen Stress

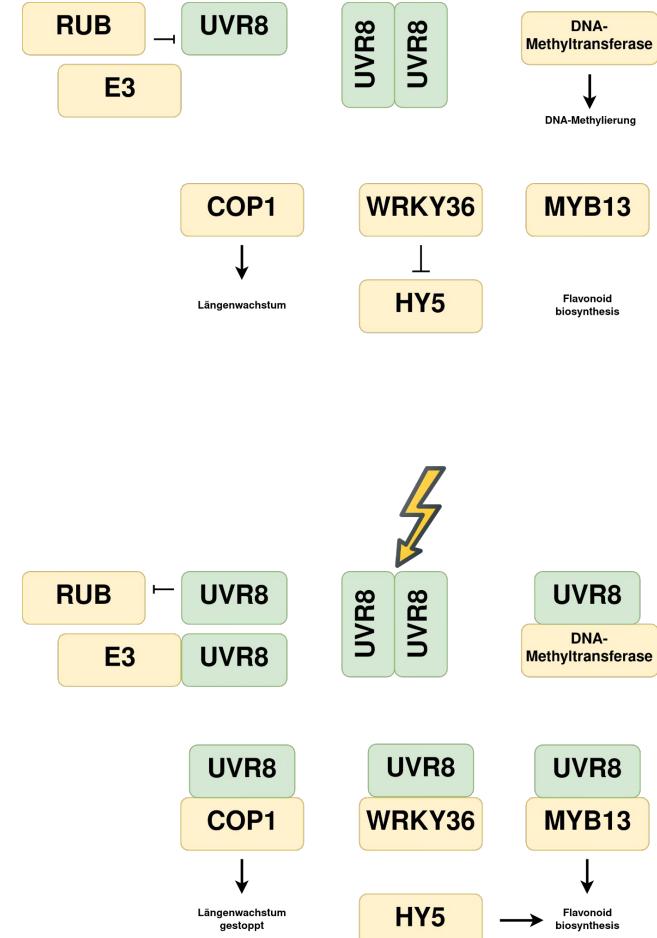
- Genetische und epigenetische Regulation
- Hitzeschockproteine (HSPs): stabilisieren/falten andere Proteine
- Aquaporine: Bedeutung von Wasserkanälen bei Trocken- und Salzstress.
- Osmotische Anpassung: Akkumulation von kompatiblen Soluten wie Prolin, Glycin-Betain oder Trehalose
- Akkumulation von Pigmenten
- Produktion antioxidativer Metabolite & antioxidativer Enzyme

# Oxidativer Stress und antioxidative Abwehrmechanismen

- ROS stellen Gefahr für alle Zellkomponenten dar
- Enzyme (Auswahl): jeweils viele Genkopien pro Spezies
  - Superoxid-Dismutase (SOD):  $2\text{H}^+ + 2\text{xO}_2^{*-}$  zu  $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$
  - Ascorbat-Peroxidase (APX):  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Detoxifikation mittels Ascorbinsäure
  - Katalase (CAT):  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Detoxifikation zu  $\text{O}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$
  - Glutathion-Peroxidase (GPX):  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Detoxifikation mittels Glutathion
  - Glutathion S-transferase (GST):  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Detoxifikation mittels Thioredoxin
  - Peroxiredoxin (PRX):  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Detoxifikation
- Nicht-enzymatische Antioxidantien:
  - Ascorbinsäure
  - Glutathion
  - Carotenoids
  - Flavonoide

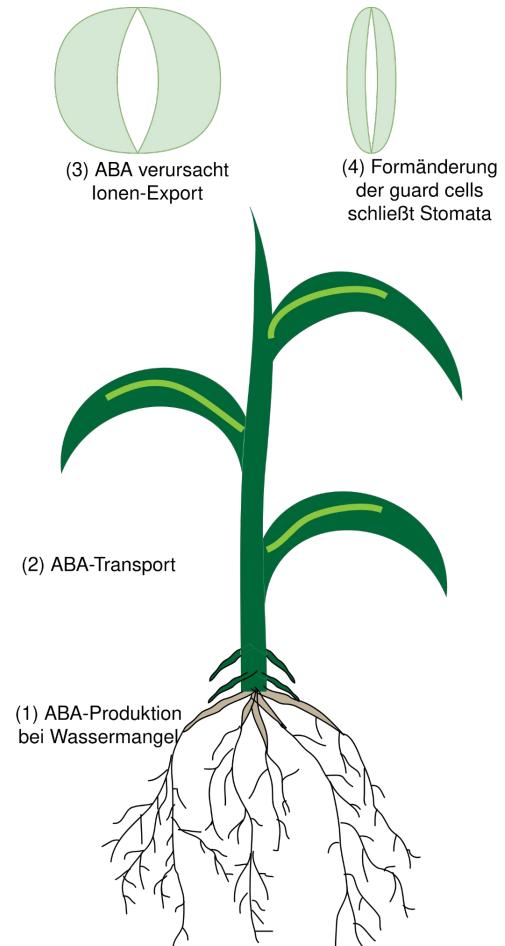
# UV-Lichtantwort von Pflanzen

- UVR8 kann UV-B- und UV-A-Licht detektieren
- Inaktives UVR8-Dimer wird durch UV-Lichtabsorption aufgelöst
- UVR8-Monomer interagiert im Zellkern mit Transkriptionsfaktoren
- UVR8-Monomer bindet E3 Ubiquitin-Ligase und stabilisiert dadurch HY5
- UVR8-Monomer inaktiviert seinen eigenen Repressor RUP
- UVR8-Monomer bindet an DNA-Methyltransferase und inhibiert diese



# Trockenstress (Wassermangel)

- ABA-Produktion in Wurzelhaaren bei Wassermangel
- ABA-Transport in Blätter
- Guard cells haben ABA-Rezeptoren -> Diffusion von Ionen aus Guard cells
- Weniger osmotisch aktive Moleküle in Guard cells verursacht Wasserverlust
- Guard cells verformen sich und schließen Stomata (verhindert Wasserverlust)



ABA = abscisic acid