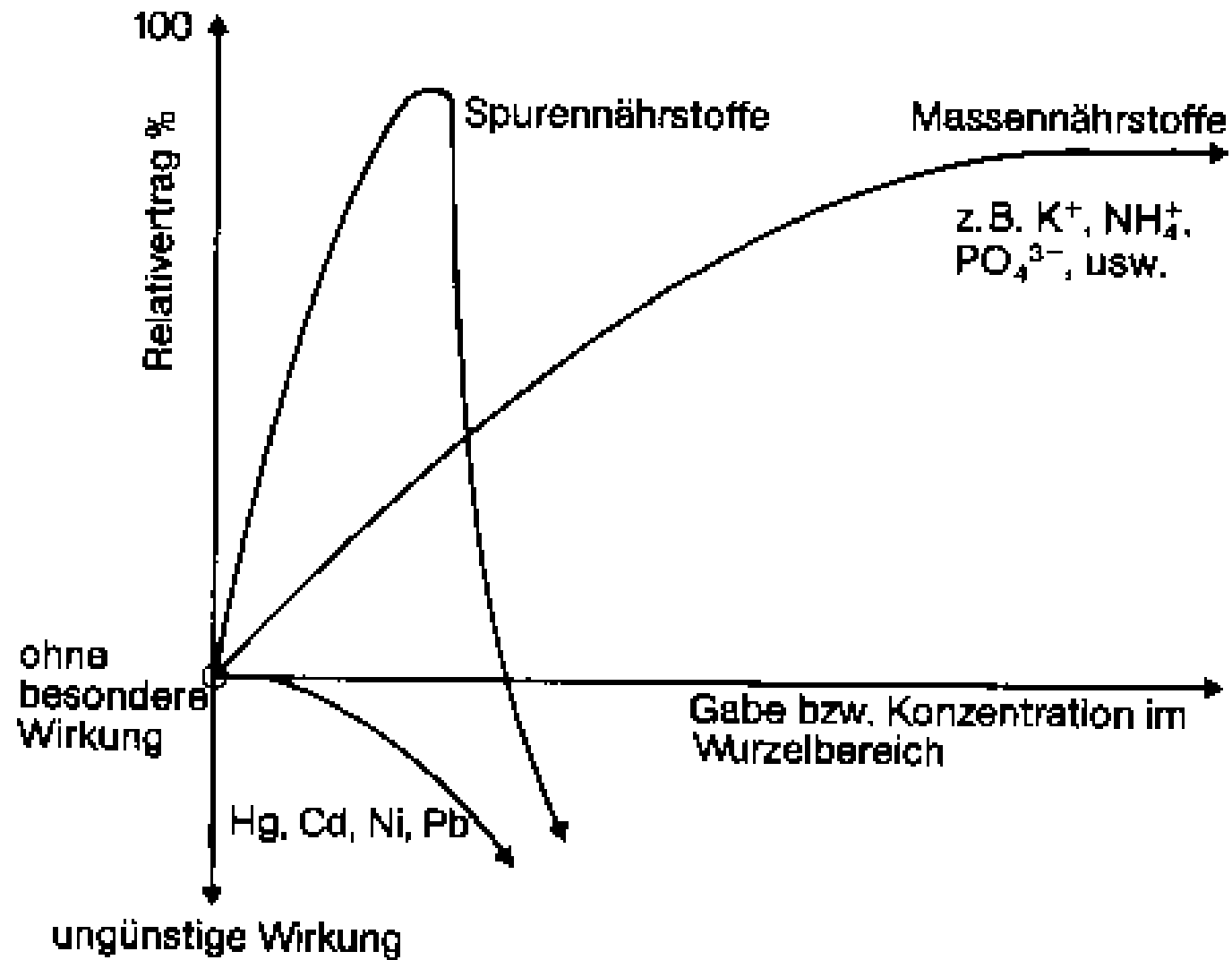


# **Warum brauchen Pflanzen Mikronährstoffe?**

**Mikronährstoffe besitzen bereits in kleinen Mengen (ppm) eine hohe physiologische Wirksamkeit. Bei höheren Gehalten (ppm!) wirken sie toxisch.**



**Abb. 2:** Kurve der Ertragsbeeinflussung (nach Cramer et al., 1981).

## **Wirkung in Enzymen**

- im Grundgerüst
- in der prosthetischen Gruppe (aktives Zentrum)

## **Aktivatoren/Inhibitoren der enzymatischen Prozesse**

**Harmonisch abgestuftes Verhältnis der Mikro-nährstoffe zueinander (Wechselwirkungen) und zu den Makronährstoffen**

# Periodensystem der Elemente

la										0																									
1												2																							
<b>H</b> 1,00794												<b>He</b> 4,002602																							
3		4												5		6		7		8		9		10											
<b>Li</b> 6,941		<b>Be</b> 9,012182												<b>B</b> 10,811		<b>C</b> 12,0107		<b>N</b> 14,00674		<b>O</b> 15,9994		<b>F</b> 18,9984032		<b>Ne</b> 20,1797											
11		12												13		14		15		16		17		18											
<b>Na</b> 22,989770		<b>Mg</b> 24,3040												<b>Al</b> 26,981538		<b>Si</b> 28,0855		<b>P</b> 30,973761		<b>S</b> 32,066		<b>Cl</b> 35,4527		<b>Ar</b> 39,948											
19		20		21		22		23		24		25		26		27		28		29		30		31		32		33		34		35		36	
<b>K</b> 39,0983		<b>Ca</b> 40,078		<b>Sc</b> 44,955910		<b>Ti</b> 47,867		<b>V</b> 50,9415		<b>Cr</b> 51,9961		<b>Mn</b> 54,938049		<b>Fe</b> 55,845		<b>Co</b> 58,933200		<b>Ni</b> 58,6934		<b>Cu</b> 63,546		<b>Zn</b> 65,39		<b>Ga</b> 69,723		<b>Ge</b> 72,61		<b>As</b> 74,92160		<b>Se</b> 78,96		<b>Br</b> 79,904		<b>Kr</b> 83,80	
37		38		39		40		41		42		43		44		45		46		47		48		49		50		51		52		53		54	
<b>Rb</b> 85,4678		<b>Sr</b> 87,62		<b>Y</b> 88,90585		<b>Zr</b> 91,224		<b>Nb</b> 92,90638		<b>Mo</b> 95,94		<b>Tc</b> (98)		<b>Ru</b> 101,07		<b>Rh</b> 102,90550		<b>Pd</b> 106,42		<b>Ag</b> 107,8682		<b>Cd</b> 112,411		<b>In</b> 114,818		<b>Sn</b> 118,710		<b>Sb</b> 121,760		<b>Te</b> 127,60		<b>I</b> 126,90447		<b>Xe</b> 131,29	
55		56		57		58		59		60		61		62		63		64		65		66		67		68		69		70		71			
<b>Cs</b> 132,90545		<b>Ba</b> 137,327		<b>La</b> 138,9055		<b>Ce</b> 140,116		<b>Pr</b> 140,90765		<b>Nd</b> 144,24		<b>Pm</b> (145)		<b>Sm</b> 150,36		<b>Eu</b> 151,964		<b>Gd</b> 157,25		<b>Tb</b> 158,92534		<b>Dy</b> 162,50		<b>Ho</b> 164,93032		<b>Er</b> 167,26		<b>Tm</b> 168,93421		<b>Yb</b> 173,04		<b>Lu</b> 174,967			
				72		73		74		75		76		77		78		79		80		81		82		83		84		85		86			
				<b>Hf</b> 178,49		<b>Ta</b> 180,9479		<b>W</b> 183,84		<b>Re</b> 186,207		<b>Os</b> 190,23		<b>Ir</b> 192,217		<b>Pt</b> 195,078		<b>Au</b> 196,96655		<b>Hg</b> 200,59		<b>Tl</b> 204,3833		<b>Pb</b> 207,2		<b>Bi</b> 208,98039		<b>Po</b> (209)		<b>At</b> (210)		<b>Rn</b> (222)			
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96		97		98		99		100		101		102		103			
<b>Fr</b> (223)		<b>Ra</b> (226)		<b>Ac</b> (227)		<b>Th</b> 232,0381		<b>Pa</b> 231,03688		<b>U</b> 238,0289		<b>Np</b> (237)		<b>Pu</b> (244)		<b>Am</b> (243)		<b>Cm</b> (247)		<b>Bk</b> (247)		<b>Cf</b> (251)		<b>Es</b> (252)		<b>Fm</b> (257)		<b>Md</b> (258)		<b>No</b> (259)		<b>Lr</b> (262)			
						104		105		106		107		108		109		110		111		112		113		114									
						<b>Rf</b> (261)		<b>Hn</b> (262)		<b>Unh</b> (263)		<b>Ns</b> (262)		<b>Hs</b> (265)		<b>Mt</b> (266)		<b>Uun</b> (269)																	

### Legende:

Ordnungszahl → 26  
 Symbol → Fe  
 relative Atommasse (IUPAC, 1993) → 55,845  
 Elektronenkonfiguration → 1s-14s

Bei nicht in der Natur vorkommenden radioaktiven Elementen ist die Masse des stabilsten Isotops angegeben.

# B

Kein Bestandteil oder Cofaktoren von Enzymen, primäre kausale Wirkung?

50 – 90 % in den Zellwänden (zellwandstabilisierende Polysaccharide, Ester mit Hydroxylgruppen von Zuckern, Phenolen) oder Polycarbonat-Borat-Ca-Komplexe: deshalb schwer beweglich.

**B-** Störung der Entwicklung von Cambialzellen →

Gewebsveränderungen (beeinträchtigte Zellstreckung, mangelnde Differenzierung, Absterben meristematischer Gewebe) ...

Blockierung der Zellwandsynthese?

Verschiebung des Anteils Zellulose → Glucane, Pectine.

## Bormangel



## **B+** Steigerung der Phosphataufnahme

**B-** Nucleotid- P-Fractionen beeinträchtigt →  
Nucleinsäuresynthese! → Proteinhaushalt (mehr AS)  
Rückwirkung auf Zellwandbildung und Integrität der  
Membranen (Funktionieren der H<sup>+</sup>-ATPasepumpe)  
weniger phosphorylierte Zucker



**B+** Hemmung der Phosphoglucomutase → mehr Zellulose, Stärke, weniger Zuckerstoffwechsel

### Regulation im Pentosephosphatzyklus

**B-** Komplexbildungen reduziert → Abzweigung des **Shikimatweges** → mehr Phenole (Braunfärbungen, Lignifikation  
Erhöhung der Peroxidase- und Phenoloxidase-aktivitäten).

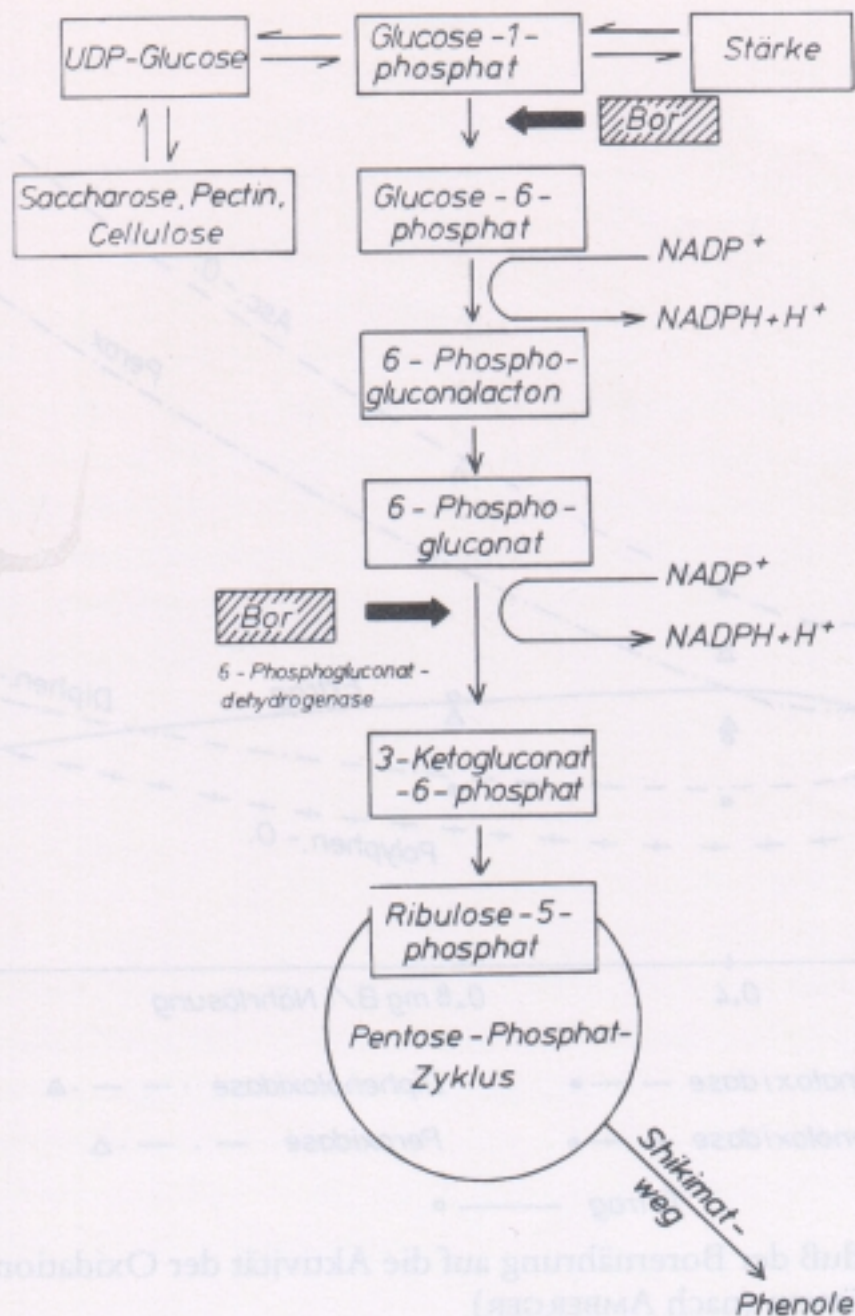
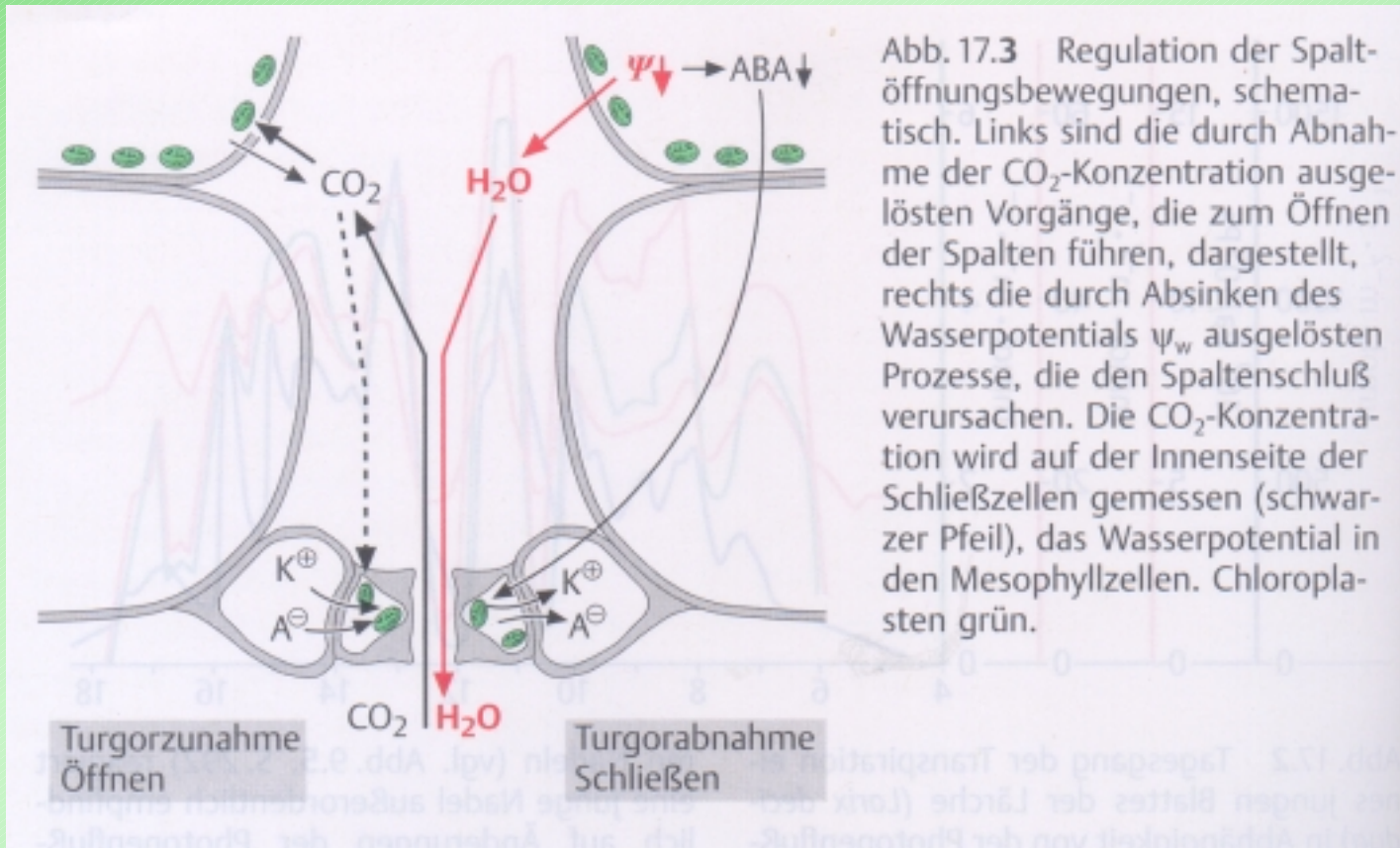


Abb. 92. Wirkung des Bors auf den Zuckerstoffwechsel

# Cl

Kein Bestandteil von Stoffen, Wirkung nur in Ionenform

Osmoregulans (Turgordruck, Stomatabewegung)



# Cl

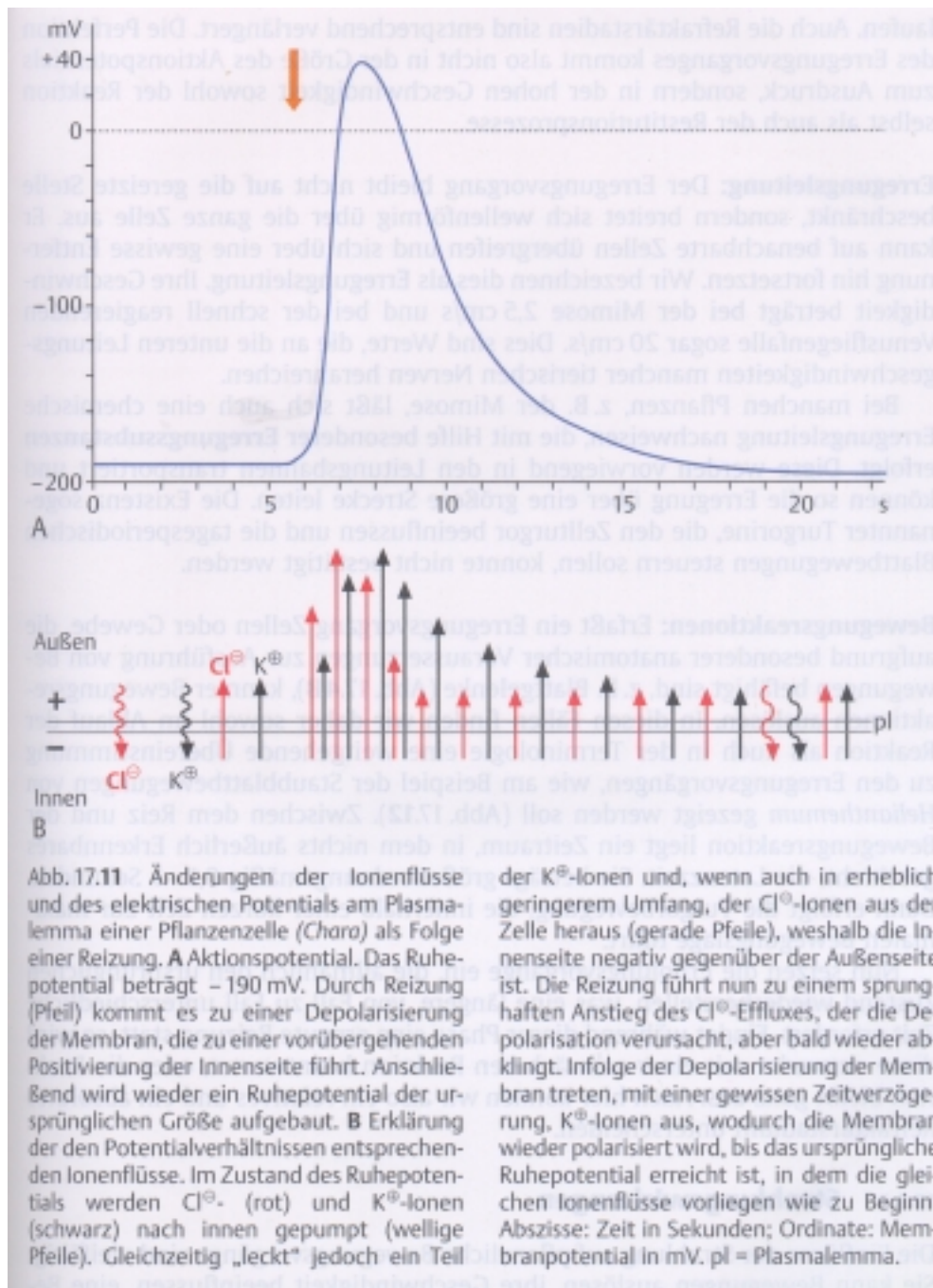
Kein Bestandteil von Stoffen, Wirkung nur in Ionenform

Osmoregulans (Turgordruck, Stomatabewegung)

Plasmaquellung (Funktion des Plasmas)

H<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> Cotransport Plasma → Vakuole (Ansäuerung)

Membranpotential (Reizphysiologie, Stress)



# Cl

Kein Bestandteil von Stoffen, Wirkung nur in Ionenform

Osmoregulans (Turgordruck, Stomatabewegung)

Plasmaquellung (Funktion des Plasmas)

H<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> Cotransport Plasma → Vakuole (Ansäuerung)

Membranpotential (Reizphysiologie, Stress)

Photolyse des Wassers am PS II, Cofaktor des Mn-Enzyms (O<sub>2</sub>-Freisetzung)

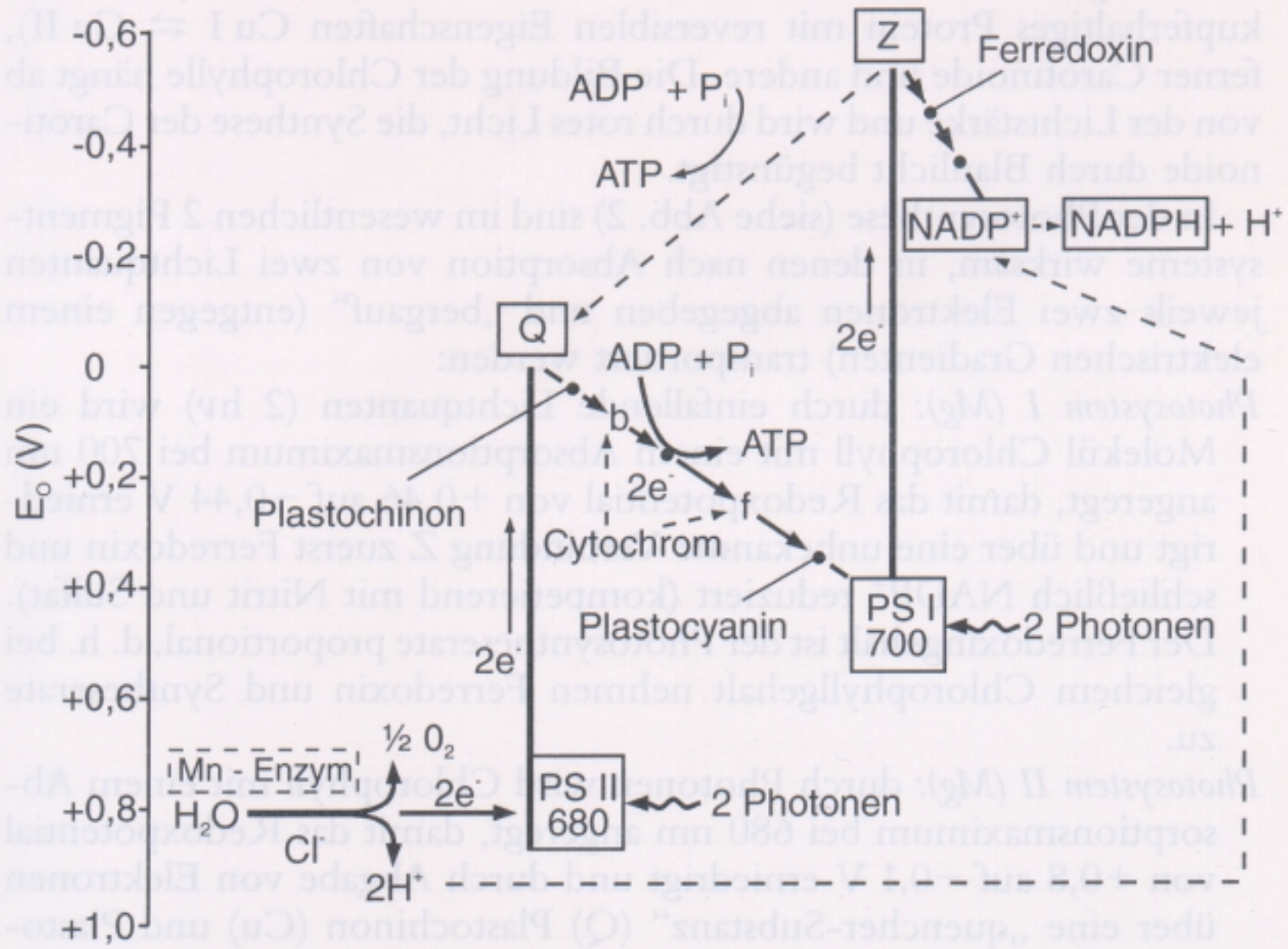


Abb. 2. Photosynthese – Lichtreaktion

# Cl

Kein Bestandteil von Stoffen, Wirkung nur in Ionenform

Osmoregulans (Turgordruck, Stomatabewegung)

Plasmaquellung (Funktion des Plasmas)

H<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> Cotransport Plasma → Vakuole (Ansäuerung)

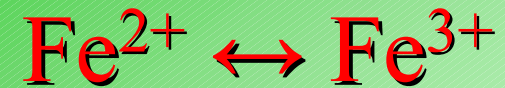
Membranpotential (Reizphysiologie, Stress)

Photolyse des Wassers am PS II, Cofaktor des Mn-Enzyms (O<sub>2</sub>-Freisetzung)

Cofaktor bei der Asparaginsynthese  
(Langstreckentransport von AS)



**Fe**



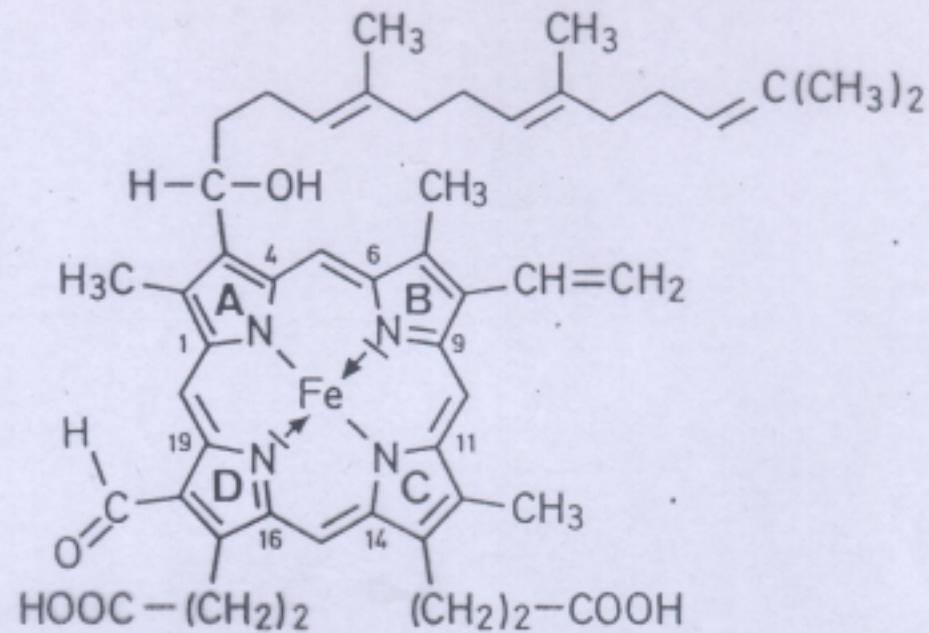
Bildung von Komplexen über coordinative Bindungen,  
Redox-Reaktionen

$\text{Fe}^{2+}$  Auslösen von Teilungsvorgängen in meristematischen  
Zellen

**Hämone** (Fe(III)Prot), Katalasen, Peroxidasen (Entgiftung  
von  $\text{H}_2\text{O}_2$ ), Cytochromoxidase (Endatmung (FeCu-  
hältig) Bildung von  $\text{H}_2\text{O}$ )

**Cytochrome** (Elektronentransportketten! Redoxsysteme)

*Cytochrom a* (33) und *a<sub>3</sub>* sind Bestandteile der *Cytochromoxidase* (Komplex IV), welche in tierischen Mitochondrien aus zwölf Untereinheiten besteht. Die beiden prosthetischen Gruppen entsprechen Häm A: Position 3 trägt einen Farnesyl-Rest (s. S. 355), Position 18 eine Formyl-Gruppe.



**Eisen-Schwefelproteine** (Thiolgruppen, anorg. S)

Flavoproteine  $\rightarrow$   $\text{H}_2\text{O}_2$  (z. B. Polymerisation von Lignin, Suberin)

Leghämoglobin  $\rightarrow$   $\text{N}_2$ -Bindung

Ferredoxin (Speicher und Überträger von  $e^-$ , zahlreiche Stoffwechselprozesse)

z. B.: Nitratreduktion, Nitritreduktion

Enzyme: Nitrogenase ( $\text{N}_2$ -Bindung + Mo)

Lipoxygenase (Lipidstoffwechsel), NADH-

Cytochromoxidase,

Fe-SOD ( $\text{O}^{2\cdot-} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$ ) u. a.

**Chlorophyllbildung!** Fe-Mangel (Ringbildung unterbleibt, Chlorose) Biosynthese von Porphyrinen (vgl. auch Katalase, Peroxidase, **Cytochrome** u.a.)

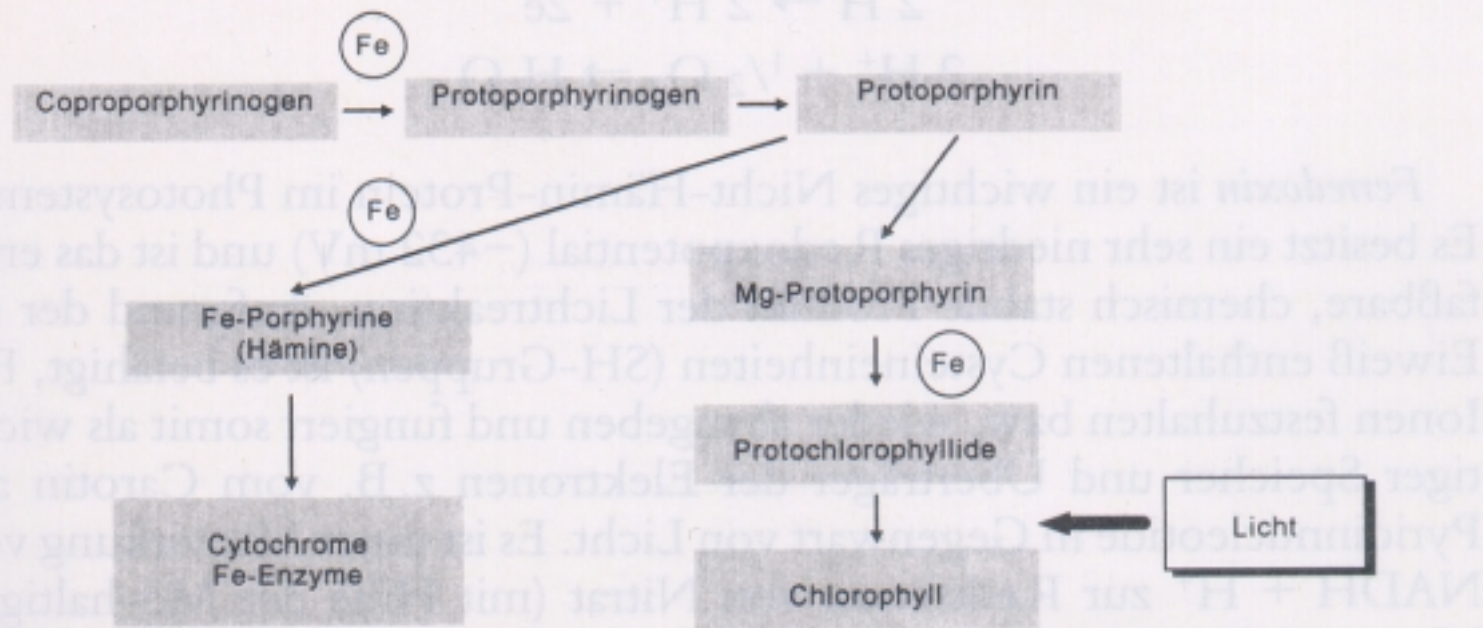
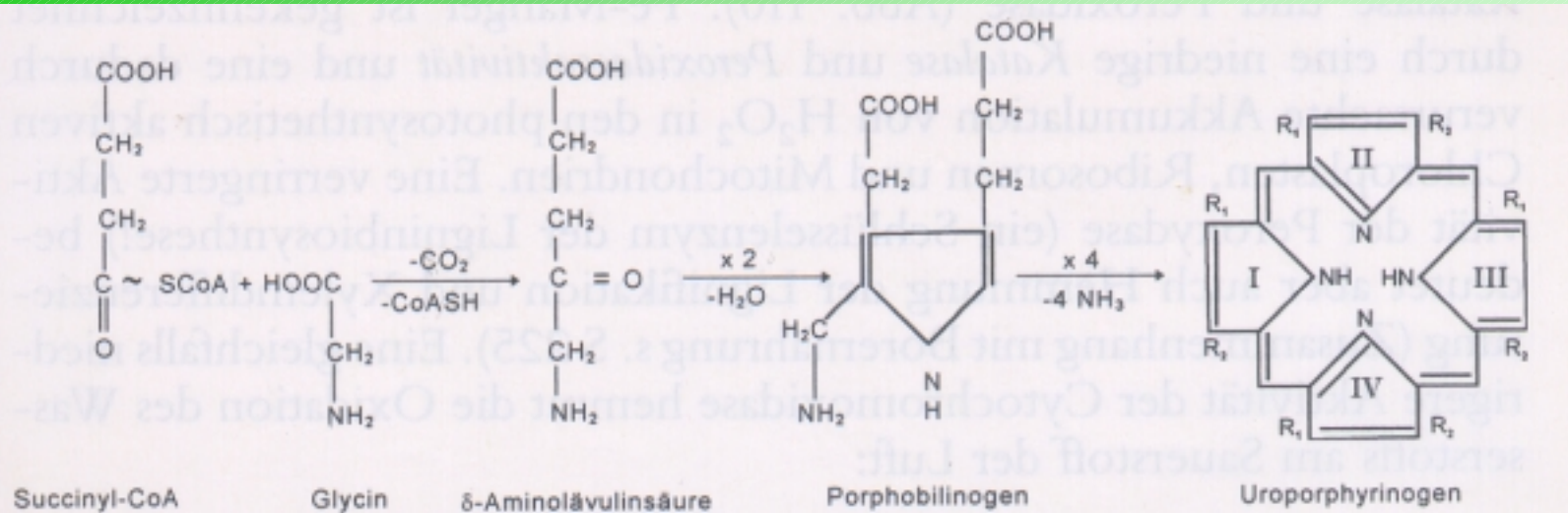


Abb. 109. Farbstoffsynthese

**Chlorophyllbildung!** Fe-Mangel (Ringbildung unterbleibt, Chlorose) Biosynthese von Porphyrinen (vgl. auch Katalase, Peroxidase, **Cytochrome** u.a.)



**Chlorophyllbildung!** Fe-Mangel (Ringbildung unterbleibt, Chlorose) Biosynthese von Porphyrinen (vgl. auch Katalase, Peroxidase, **Cytochrome** u.a.)

**Photosynthese** Elektronentransportkette aus verschiedenen Häminen und Fe-S-Proteinen

**Aktivierung von Enzymen** z. B. Arginase, Xanthinoxidase



Integraler Bestandteil von Enzymen

**Photosynthese!** Mn-haltiges Enzym, Elektronentransport,  
Pigment zu P680  $\rightarrow$   $\text{O}_2$ -Freisetzung (Cl)

**MnSOD** Schutz vor Sauerstoffradikalen ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )



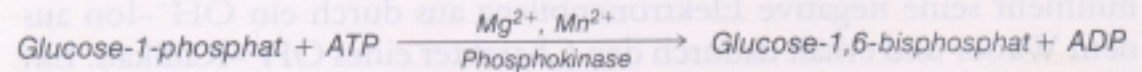
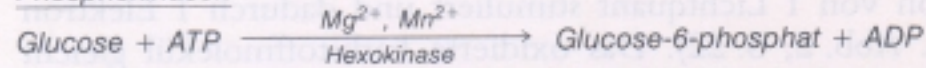


# Cofaktor

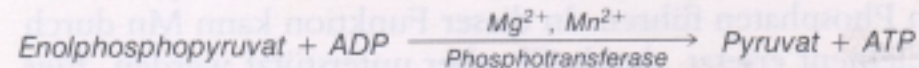
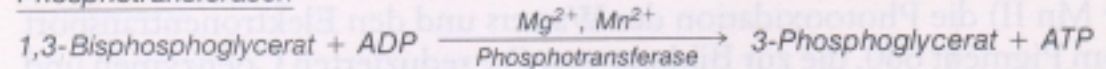
Nitratreduktion: Nitrit  $\rightarrow$   $\text{NH}_3$  (**Mn**- hohe Nitritgehalte)

Energiestoffwechsel:

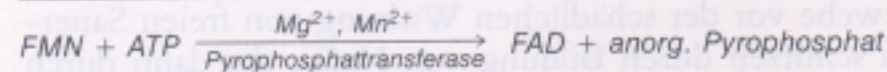
### Phosphokinasen



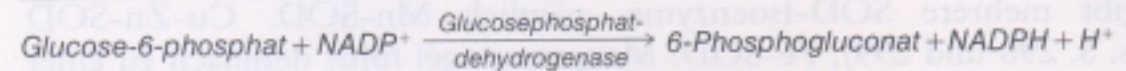
### Phosphotransferasen



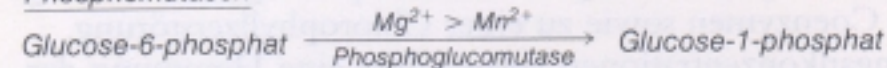
### Pyrophosphotransferasen



### Phosphatesterdehydrogenasen



### Phosphomutasen



### Phosphatasen und Pyrophosphatasen

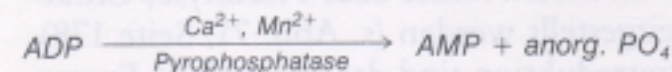
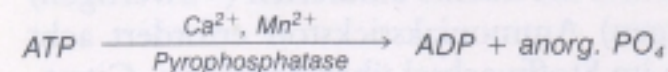
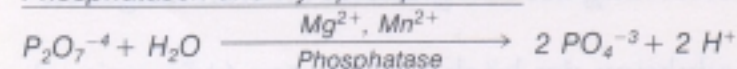


Abb. 113. Aktivierung von Phosphorylierungsreaktionen durch  $\text{Mn}^{2+}$

## Cofaktor

Nitratreduktion: Nitrit  $\rightarrow$   $\text{NH}_3$  (**Mn**- hohe Nitritgehalte)

Energiestoffwechsel:

Oxydationsreaktionen, Decarboxylierungen im  
Citratzyklus

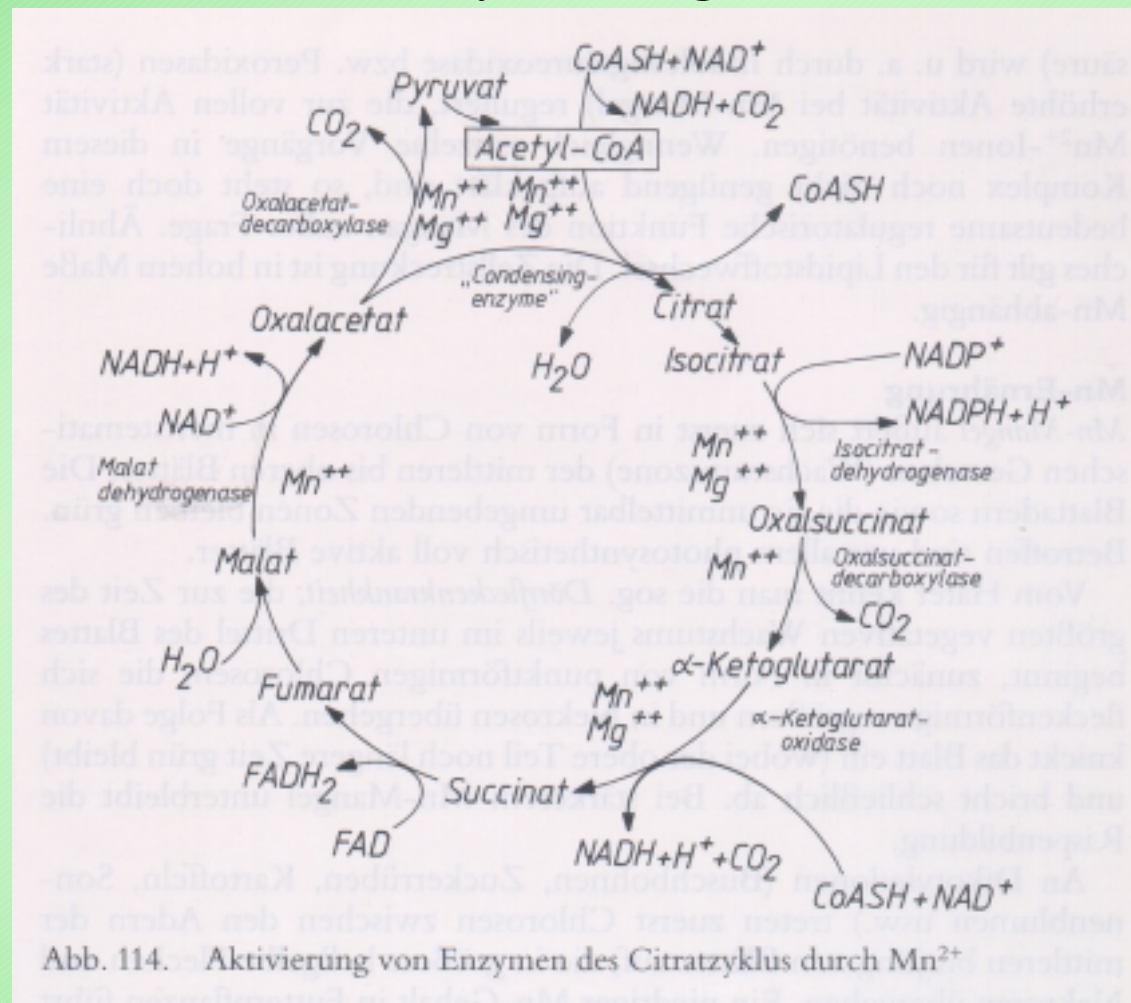


Abb. 114. Aktivierung von Enzymen des Citratzyklus durch  $\text{Mn}^{2+}$

## Cofaktor

Nitratreduktion: Nitrit  $\rightarrow$   $\text{NH}_3$  (**Mn**- hohe Nitritgehalte)

Energiestoffwechsel:

Oxydationsreaktionen, Decarboxylierungen im  
Citratzyklus

Proteinsynthese DNA-abhängige Polymerase

Reduktive Aminierung und Transaminierung, Verknüpfung  
von Peptidbindungen

Abbau von Reserveeiweiß ( z. B. Peptidasen)

Aromatenbildung und Ligninbiosynthese

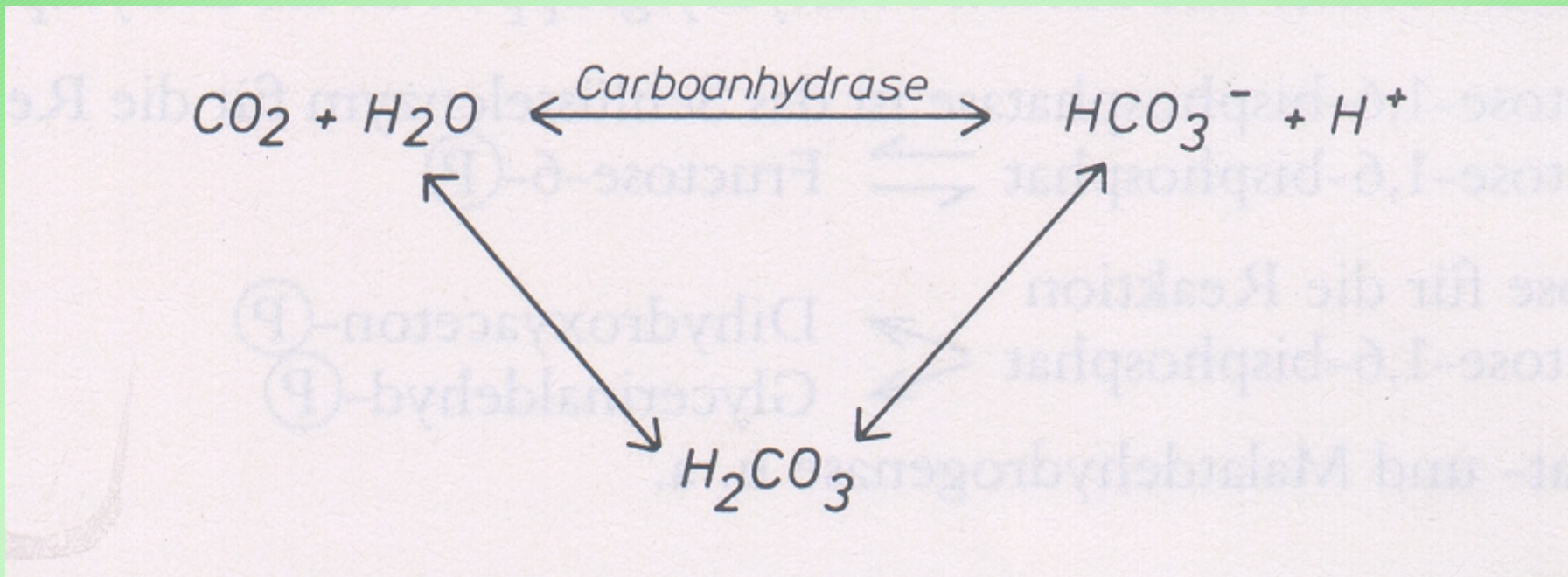
Wachstoffschaushalt (IAA-Oxidase bei Mn-Mangel  
erhöht, Abbau)  $\rightarrow$  Wachstumsstörungen (red.  
Zellstreckung)

**Zn**

**Zn<sup>2+</sup>**

Bestandteil von Enzymen

Carboanhydrase, Anionenaustausch, C<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> für  
PEP-Carboxylase, (C<sub>3</sub>?)



**Zn**

**Zn<sup>2+</sup>**

## Bestandteil von Enzymen

Carboanhydrase, Anionenaustausch, C<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> für  
PEP-Carboxylase, (C<sub>3</sub>?)

Alkoholdehydrogenase

SOD (CuZn-Enzym) Entgiftung, bei Mangel  
Chlorophyllschädigung

Asc-Peroxidase, GSH-Reduktase, Entgiftung

DNA-RNA-Polymerasen, Proteinbiosynthese

(bei **Zn**- Anreicherung von Nitrat und org. Säuren,  
Aminosäuren)

## Cofaktor (Aktivator)

- Fructose-1,6-bisphosphatase ist das Schlüsselenzym für die Reaktion  
Fructose-1,6-bisphosphat  $\rightleftharpoons$  Fructose-6-(P)
- Aldose für die Reaktion  
Fructose-1,6-bisphosphat  $\begin{cases} \rightarrow \text{Dihydroxyaceton-(P)} \\ \rightarrow \text{Glycerinaldehyd-(P)} \end{cases}$
- Lactat- und Malatdehydrogenase u. a.

## Cofaktor (Aktivator)

Hexokinase ( $\text{Glu} + \text{ATP} \rightarrow \text{Glu-6-P} + \text{ADP}$ )

RUBISCO

Stärkesynthese

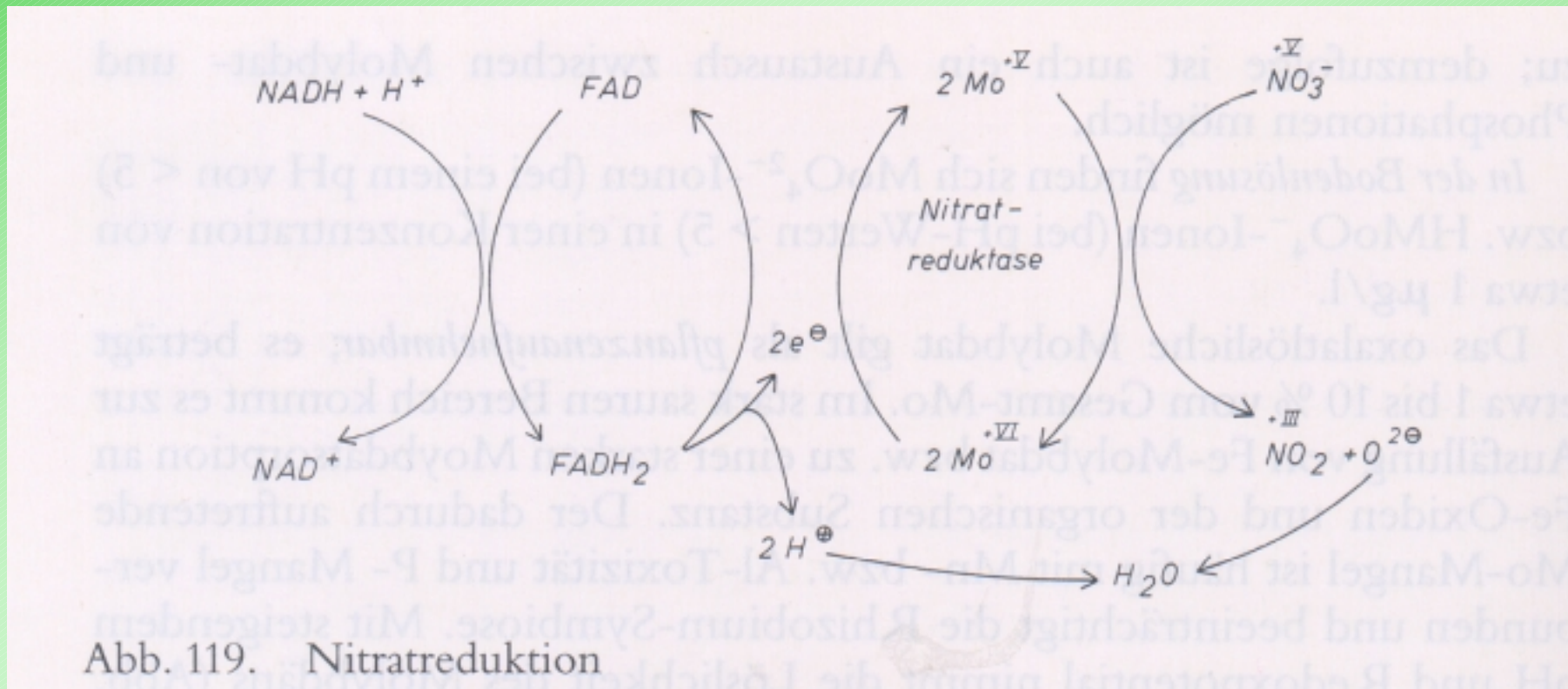
Aktivierung von Chromosomenabschnitten, Regulation  
SH-haltiger Enzyme, Stabilisierung von Ribosomen  
(Eiweißstoffwechsel)

**Zn-** Synthese von IAA reduziert, Abbau gefördert →  
Wachstumsstörungen



Metallkomponente wichtiger Enzyme

Nitratreduktase (MoFe-Protein)







Metallkomponente wichtiger Enzyme

Nitratreduktase (MoFe-Protein)

**Mn-** Nitratanreicherung (Störung im AS-Stoffwechsel)

Nitrogenase Schlüsselenzym bei  $\text{N}_2$ -Fixierung

Hydrogenase  $\text{N}_2$ -Bindung  $\text{H}_2 \rightarrow 2 \text{H}^+ + 2\text{e}^-$

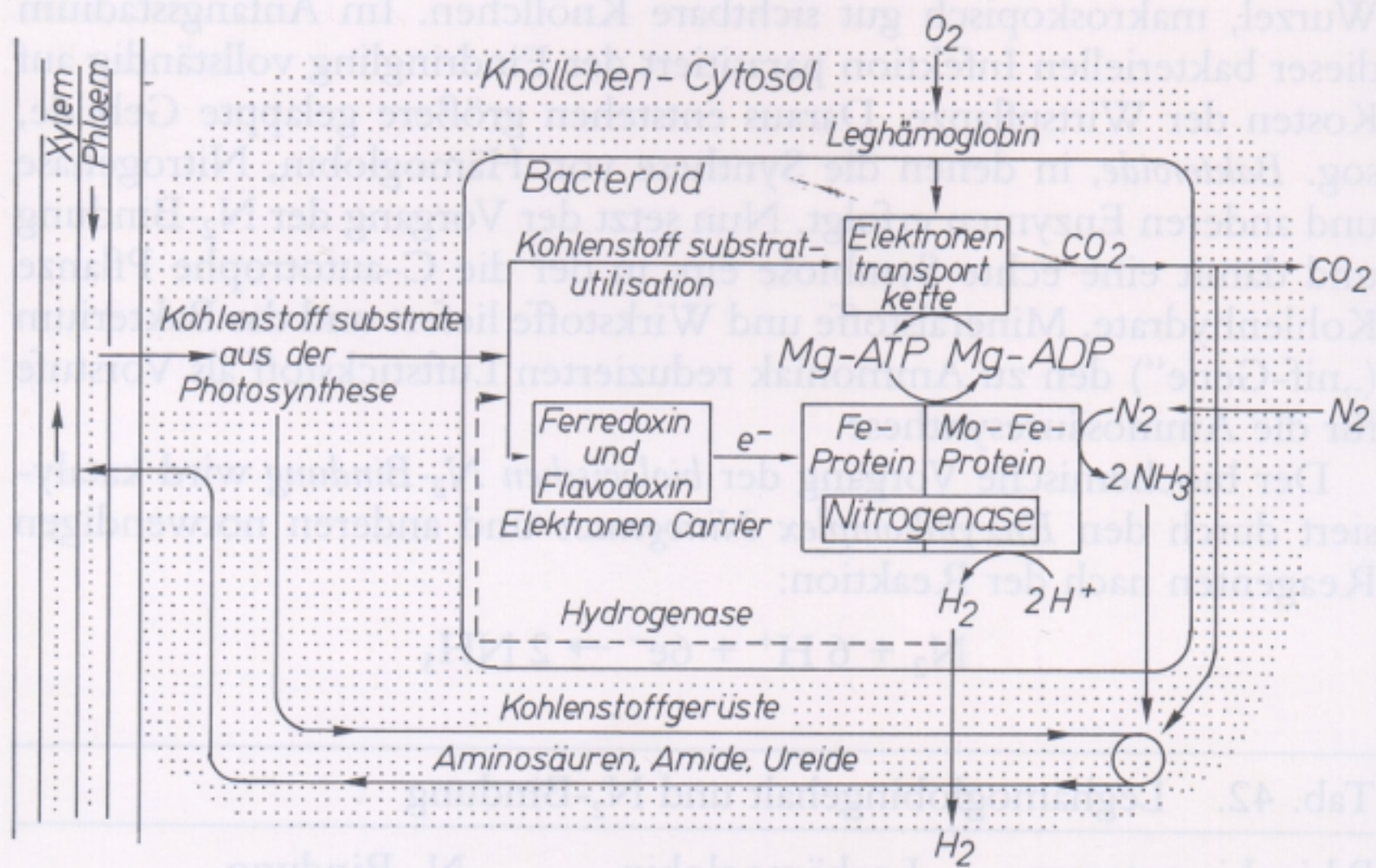


Abb. 68. Biologische  $N_2$ -Bindung



Cu-Protein Plastocyanin im PS I

Cu-Enzyme in Redoxsystemen, Cu-haltige Peroxidasen  
(z.B. Thyrosinase), Laccase, Ligninstoffwechsel





Cu-Protein Plastocyanin im PS I

Cu-Enzyme in Redoxsystemen, Cu-haltige Peroxidasen  
(z.B. Thyrosinase), Laccase, Ligninstoffwechsel

**Cu-** geringe Lignifizierung

Abbau von Polyaminen

Ascorbinsäureoxidation

Mitochondrien: Fe und Cu-haltige Cytochromoxidase  
(e<sup>-</sup> Transport, Endatmung!)

Cu-Zn-SOD Entgiftung von O<sup>2·-</sup>, **Cu-** Chl-Zerstörung

Aminosäurestoffwechsel NO<sub>2</sub> → NH<sub>3</sub>, Einbau von NH<sub>3</sub>  
in Carbonsäuren

## Elemente für spezielle Stoffwechselprozesse

**Se** Glutathionperoxidase (in Pflanzen?)

Radikalentgiftung

**Na** Halophyten, C<sub>4</sub> und CAM-Pflanzen: Beteiligung

am Transport von Metaboliten zwischen

Mesophyll- und Bündelscheidenchloroplasten

**Co** Dipeptidasen, B<sub>12</sub>: N<sub>2</sub>-Bindung (Beteiligung)

Einfluss auf Methioninsynthese u.a.

**Ni** Bestandteil der Urease (Abbau eiweißreicher

Reservestoffe, z. B. Leguminosen)