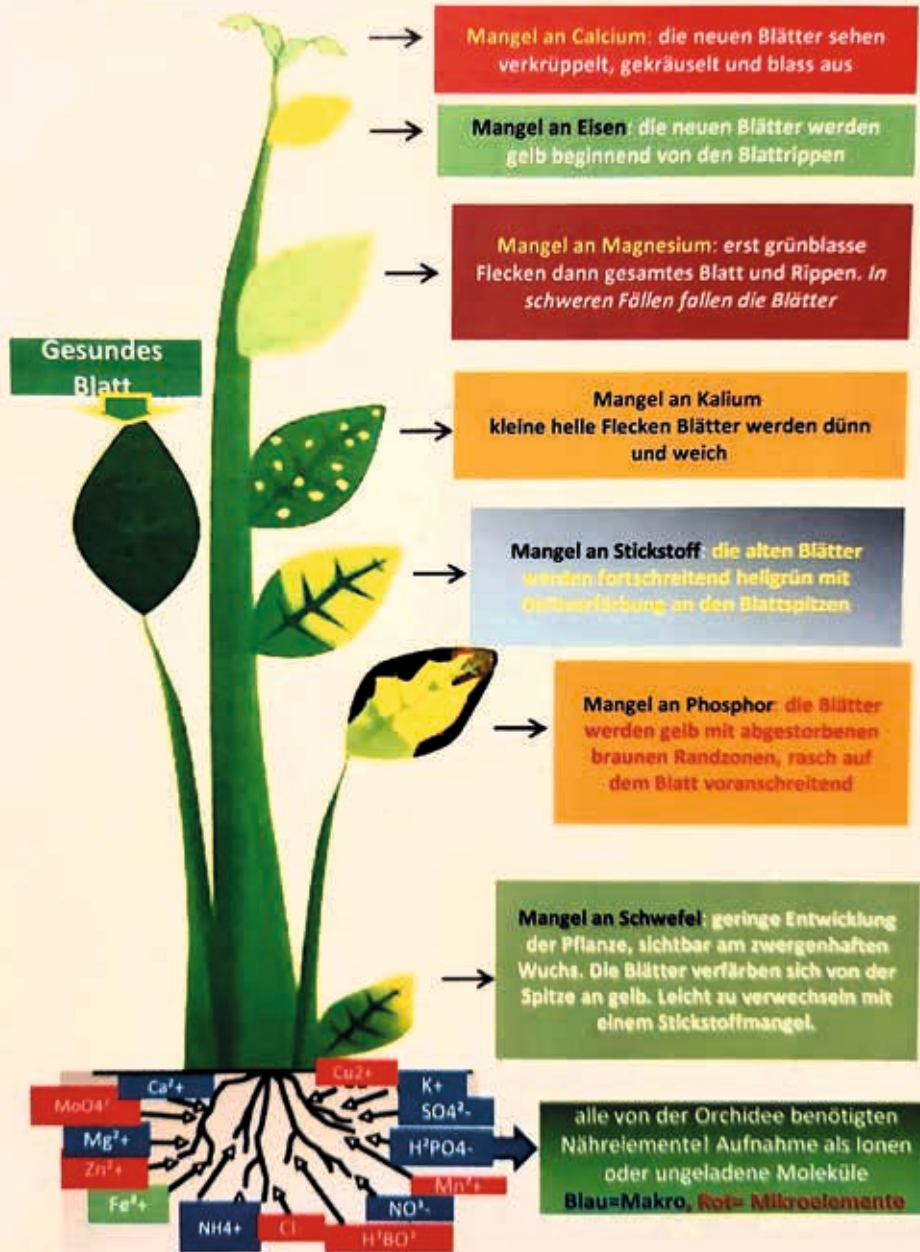
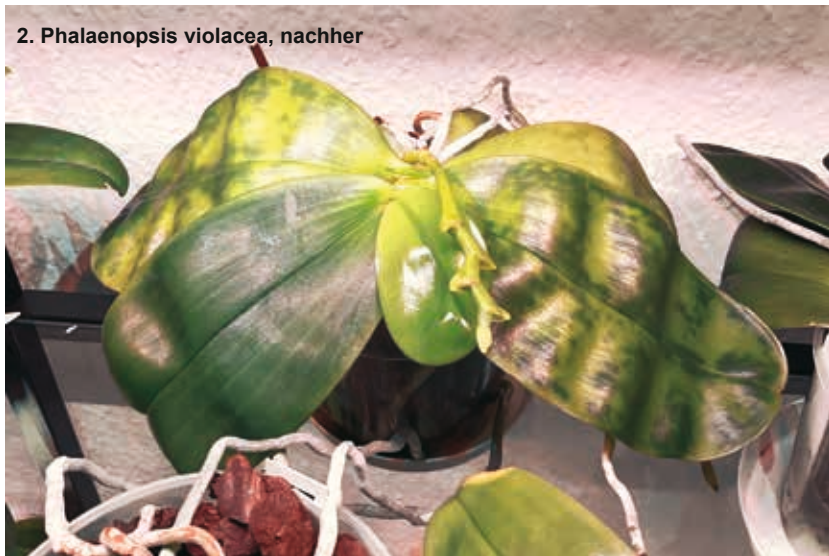


# Kleiner Nährstoffmangel-Führer





1. Phalaenopsis violacea, vorher



2. Phalaenopsis violacea, nachher

Fotos: Anonym, mit besten Dank seitens der Redaktion

Das Foto 2 zeigt eine deutliche Eisenchlorose, die von den älteren Blättern ausgeht und sich von Blatt zu Blatt weiter nach oben ausbreitet. Der Eisenmangel wurde durch Gießen über Jahre mit zu hartem Leitungswasser ( $>800 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) hervorgerufen, der zur Festlegung des Eisens als Eisencarbonat-hydroxid führte (s. Text). Vor circa einem halben Jahr wurde die Phalaenopsis auf Profidünger GOLD in destilliertem Wasser in einer Dosierung von etwa  $350 \mu\text{S}/\text{cm}$  (etwas mehr als eine Verschlusskappe) umgestellt und die Pflanze in die Lösung etwa jede Woche getaucht. So konnte die Chlorose allmählich gestoppt und Eisen für die Pflanze durch Chelatisierung mit Fe-EDDHA im Profidünger wieder verfügbar gemacht werden.

Das neue Blatt entwickelt sich bereits normal und im Übrigen ist bereits ein neuer Blütenansatz zu erkennen. Die auffallend geringe Anzahl der Blätter ist auf Wachstumsstockungen zurückzuführen – die Pflanze sollte dazu jetzt auch dringend in frisches Substrat umgetopft werden, welches in der Lage ist, die Nährsalze und Wasser gleichmäßig zu binden und erforderlichenfalls freizugeben.

## Düngen leicht gemacht Zur Kultur von Orchideen – Teil 2 – Eisen

**Dr. Wolfgang Ermert, Senden, Deutschland**

ist Mitglied in der Redaktion des Orchideenzaubers und hat einige Fachartikel, insbesondere auch zur Pflege von Orchideen wie Düngen und Schädlingsbekämpfung, veröffentlicht. Zu diesem Zweck untersucht er die Wachstumsbedingungen der Orchideen an ihren jeweiligen Standorten in Südamerika und Südostasien. In der Kultur liegt sein Schwerpunkt vor allem auf den Gattungen Stanhopea, Catasetum, Schomburgkia und Dendrobium.



3. Cynoches loddigesii

Foto: Dr. Wolfgang Ermert

Die prächtigen Blüten entwickeln sich nur bei der richtigen Nährstoffversorgung der Pflanzen.

Anmerkung der Redaktion: In diesem Beitrag finden Sie immer wieder Verweise auf Texte, Erklärungen in Box 1, 2, ... – den vollständigen Beitrag finden Sie auf unserer Homepage.

Im Teil 1 (Orchideenkurier 05/2022 und 06/2022) wurde auf die Calciumversorgung der Pflanze als ein wichtiges Schlüsselement eingegangen. Im Teil 2 möchte der Autor Dr. Wolfgang Ermert

nun über die Wichtigkeit von Eisen (siehe dazu auch die Abbildung der Modellpflanze S. 1) für die Ernährung der Orchidee darstellen:



## Eisen als Nährelement

Eisen zählt weder zu den Haupt-(Makro-)Elementen, noch zu den Spuren-(Mikro-)Elementen, obwohl es als Mikroelement aufgrund der niedrigen Konzentration und somit auch einem geringeren Bedarf im Vergleich zu den Makroelementen eingeordnet wird. Die Konzentration im Substrat liegt jedoch deutlich höher und kommt nach Calcium am häufigsten vor, weshalb es andererseits auch zu den Makroelementen gezählt wird – im Kompromiss bezeichnet man Eisen daher auch als Nebenelement.

Für den Eisenmangel charakteristische Merkmale sind die hellgrünen bis leuchtendhellen Blätter an der Sprossspitze. Zu Beginn sind die Blattadern noch grün, während das umgebende Gewebe bereits deutlich gelb gefärbt ist, dann wird das ganze Blatt gelb (s. Modellpflanze, S. 6) als chlorotisch bezeichnet und geht schließlich in Nekrosen (Blatträuselungen) über. Die Ursache hierfür liegt häufig in einer schlechten Substratverfügbarkeit des Eisens, das heißt, das Eisen ist als Eisen-Phosphat-Komplexe (unter Phosphor als Phytinsäurebildung dargestellt) oder Eisen-Carbonhydroxid festgelegt. Die Verfügbarkeit von freiem Eisen als  $Fe^{3+}$  (Erklärung siehe unten) ist daher auch stark pH-Wert-abhängig: je höher der pH-Wert, umso weniger ist es verfügbar. Wie im Falle von Calcium bereits hingewiesen, ist eine pH-Wert-Kontrolle wichtig – insbesondere dann, wenn sich chlorotische Blätter an der Pflanze zeigen. Das Optimum des pH-Werts liegt, wie unter Calcium beschrieben, zwischen 5,5 und 6,5. Um einen pH-Wert dauerhaft auf einen festen Wert, beispielsweise um pH 6, einzustellen, gelingt dies mit Pufferlösungen.

Pufferlösungen setzen sich aus dem Zusatz einer schwachen Säure wie Citronensäure, welche die basischen Hydroxidionen,  $OH^-$  (pH-Wert  $> 7$ ) abfängt, und einem geringen Zusatz einer starken Lauge wie Natronlauge, welche die sauren  $H^+$ -Ionen, auch Protonen oder Wasserstoffionen (pH-Wert  $< 7$ ) bezeichnet, aufnimmt.

Eine Pufferlösung, die den pH-Wert auf 5,5 bis 6,5

in etwa einstellt, besteht aus circa 15 g Citronensäure (wasserfrei) und 175 ml Natronlauge. Diese Mischung wird dann mit destilliertem Wasser auf 1 l aufgefüllt und stellt als Lösung einen sehr wirksamen Puffer im Substrat dar. Der Topf (Substrat mit der Pflanze) wird dabei für circa eine Minute in die Pufferlösung getaucht. Bei der Verwendung von Profidünger GOLD ist dies aber in der Regel nicht notwendig, da die Pufferkapazität der Düngerlösung bereits ausreichend hoch sein sollte.

**Tipp:** Stellen Sie eine chlorotische oder eine beginnende Gelbaufhellung der Blätter an ihrer Orchidee fest, so prüfen Sie unbedingt den pH-Wert des Substrats beispielsweise mit einem einfachen pH-Wert-Messgerät! Durch Zugabe einer geeigneten Pufferlösung oder Profidünger GOLD kann ein optimaler pH-Wert von 5,5 bis 6,5 eingestellt werden.

Nur bei extrem hohen (basischen) oder sehr niedrigen (sauren) pH-Werten, verursacht insbesondere durch Zusatz von biologisch-organischen Düngemittelzusätzen wie Gülle (pH-Wert  $> 8$ ) kann die Pufferkapazität der angegebenen Lösung nicht ausreichend hoch sein. Die Verwendung von organisch-biologischen Mitteln für die Düngung von Orchideen sollte sowieso nur dann erfolgen, wenn die Abbauprodukte der biologischen Zersetzung im zeitlichen und Temperaturverlauf bekannt und kontrollierbar sind.

Guano wird beispielsweise zu 8 bis 15 % N, 2 bis 3 % P, und 2 bis 4 % K sowie Spurenelemente zu einem pH-Wert  $> 8$  zersetzt, wie er neben anderen im Compo®-Orchideendünger als ein organisch-mineralischer Dünger enthalten ist.

Auch die Verwendung von pflanzlichen Stoffen aus der Lebens-, Genuss- und Futtermittelherstellung, pflanzlichen Stoffen aus Algen oder tierische Nebenprodukte wie Knochenmehl, wie im BioTrissol® Orchideendünger von Neudorff, muss unter diesem Aspekt als kritisch betrachtet werden.

Knochenmehl entstammt den zerkleinerten, entfeteten und gereinigten Knochen aus Schlachthöfen, als NP-(Stickstoff-Phosphor-)Dünger. Aufgrund

der nicht kontrollierbaren, temperaturabhängigen Zersetzungsreaktion von organischen Düngern wird daher insbesondere für den Einsatz als Orchideendünger eher abgeraten, da so auch eine gezielte Reaktion zur Beseitigung von auftretenden Mangelschäden einzelner Nährelemente vor allem Chlorosen durch Eisenmangel kaum oder gar nicht zu begegnen ist.

**Tipp:** Dünger mit organischen Zusätzen wie Guano, Knochenmehl, Melasse (Vinasse) etc. im Dünger sollten für Orchideen nicht verwendet werden, da eine Kontrolle über den Nährstoffgehalt durch Zersetzung über Zeit und Temperatur kaum gegeben ist und dadurch leicht Mangel oder Überdosierung an Nährelementen entstehen kann.

Eisen zählt zu den Schwermetallen (SM), aufgrund seines hohen spezifischen Gewichts ( $7,874 \text{ g/cm}^3$ ). Es liegt als Ion in zwei stabilen Wertigkeitsstufen vor, kann leicht von der einen zu der anderen Stufe wechseln, also ein Elektron aufnehmen und abgeben:  $Fe^{2+}$  oder  $Fe^{3+}$ . Im Substrat liegt das zweiwertige Eisen unter anaeroben Bedingungen (also bei Sauerstoffmangel infolge Verdichtung) und bei niedrigen pH-Werten vor und ist löslich. Dreiwertiges Eisen hingegen liegt unter aeroben, also „normalen“ Bedingungen bei hohen pH-Werten als Eisenoxid und anderen,  $Fe_2O_3$ , Rost oder in Form des Eisenhydroxid oder -oxidhydroxid  $OH-Fe=O$  vor. Es ist so bei hohen pH-Werten im Wasser nahezu völlig unlöslich und fällt somit als Rost oder rostartiger Schlamm im Substrat an. Somit liegt in der Regel Eisen als dreiwertiges Ion bei hohen pH-Werten unlöslich im Substrat vor und kann so von der Pflanze nicht aufgenommen werden.

**Tipp:** Um die Eisenverfügbarkeit nicht noch weiter zu verschlechtern, darf auf keinen Fall mit Gesteinsmehl gedüngt werden, was zu einer starken pH-Wert-Erhöpfung führt. Verwenden Sie kein Gesteinsmehl zur Versorgung der Pflanze mit Spurenelementen, sondern besser einen Dünger wie Profidünger GOLD, der alle Spurenelemente in der richtigen Dosierung enthält!

Die Chelate und Chelatisierung des Eisens werden in der **Box 1** dargestellt. Zusammengefasst ergeben sich zur Verwendung der Eisenchelate folgende Tipps:

**Tipp 1:** Enthält der verwendete Dünger Eisen in Form des Fe-EDTACHelats (**Box 1**), darf er wegen der Toxizität und des instabilen Komplexes bei pH-Werten  $> 6$  nicht über längere Zeit für Orchideen verwendet werden!

**Tipp 2:** Bei beginnenden Eisenchlorosen von Orchideen sollte entweder eine Lösung von Basafer® Plus als hochwertigstes Eisenchelat (40 mg/l Wasser) oder aber Profidünger GOLD (20 ml/l Wasser) über die Wurzel oder sicherer und schneller über das Blatt unter Zusatz eines Sprühmittels gegeben werden!

Rostige Nägel oder andere rostige Eisenteile können in einem Gefäß, beispielsweise in einer PET-Flasche, mit Wasser versetzt werden und über Zeit immer wieder mal kurz geschüttelt als rostig-schlammige Dispersion in der Nähe der Wurzel auf den Boden oder das Substrat aufgetragen werden. Damit wird zwar kein Eisen-III direkt pflanzenverfügbar, da es als Eisenoxid nicht löslich ist, und ein akuter Eisenmangel nicht direkt behoben werden, aber die Wurzel der Pflanze kann so das höherkonzentrierte Eisen in der Rhizosphäre nach Ansäuern unter Chelatbildung (siehe **Box 2**) besser erreichen und somit aufnehmen. Wenn diese Methode angewendet wird, geschieht dies in der Kenntnis, dass so keine unmittelbare Beseitigung des Eisenmangels stattfinden kann, sondern nur eine leichtere Erreichbarkeit von Eisenoxid für die Pflanze erzeugt wird.

Im Handel werden spezielle Eisen-III-Lösungen zur Beseitigung von Eisen-Chlorosen angeboten. Fetrlon® von Compo ist zum Beispiel ein Spurennährstoffmischdünger und enthält Bor, Eisen, Zink, Kupfer, Mangan, Molybdän sowie Magnesium und wird für die Behandlung von Chlorosen empfohlen. Es enthält zu diesem Zweck Eisen chelatisiert als FeEDTA in 4 %igem Zusatz. Wie bereits

erklärt, ist diese Art des Chelats (EDTA) für Orchideen toxisch und kann zum Verlust der Pflanzen führen. Daher ist vom Einsatz von Fetrilon abzuraten, vor allem aber von Fetrilon 13 %, mit hochdosiertem FeEDTA 13 %, sollte auf keinen Fall für Orchideen verwendet werden, da es zu irreparablen Pflanzenschäden führt (siehe Tipp oben). Optifer ist ein biologisch organisches Produkt und besteht aus Eisen-II-sulfat aus Tannennrinde extrahiert. Sprüht man diese Lösung auf die Blätter von Orchideen, wandelt sich Eisen-II, welches toxisch für Orchideen (und nicht nur auf den Reisfeldern s. u.) ist, rasch unter Sauerstoff zu Eisen-III um und es bildet sich sofort das unlösliche Eisenoxid, das sich als Rost auf den Blättern abscheiden kann. Somit ist bei Eisenmangel auch Optifer keine gute Lösung zum Einsatz für Orchideen – abgesehen von dem relativ hohen Anteil an Sulfat also Schwefel, der auch zu Schäden führen kann (siehe unter Schwefel).

**Tipp:** Für Orchideen sollten keine Lösungen wie Fetrilon, Fetrilon 13 % oder Optifer zur Vermeidung von Eisenchlorosen verwendet werden - dies kann im Falle von Optifer zu Rostbildung auf den Blättern und insbesondere bei Fetrilon 13 % durch toxisches FeEDTA zum Verlust der Pflanze führen (siehe auch den vorherigen Tipp!). Auch der Einsatz von rostigen Nägeln als Dispersion auf die Wurzel gesprüht, vermeidet Eisenchlorosen nicht direkt, sorgt aber für eine bessere Erreichbarkeit des Eisens aufgrund einer deutlich erhöhten Konzentration in der Rhizosphäre.

Aus der Darstellung der Siderophore der Pflanze (Box 2) ergibt sich aufgrund des komplizierten, mehrstufig verlaufenden Aufnahmemechanismus, dass die Pflanzen über einen ausreichend hohen Speicher an Eisen in Form des Ferritins verfügen sollte, eine geringfügige Überdosierung hat keine Folgen. überschüssiges Eisen kann in der Vakuole oder in den Chloroplasten als (Phyto-)Fenitin abgelagert und bei Bedarf rasch wieder mobilisiert werden. Ferritin besteht aus einem mit einer Proteinhülle umgebenden Fe(III)hydroxid-phosphat-

Komplex und enthält etwa 4000 Eisenmoleküle. Die Kriterien für eine gute Aufnahme des Eisens aus Box 2 sind zusammenfassend also der pH-Wert, die Temperatur, die Art des Chelats und vor allem ist auch noch das Redoxpotenzial maßgebend. Das Redoxpotenzial spiegelt das Vermögen, Elektronen abzugeben (Oxidation) oder aufzunehmen (Reduktion), wieder. Wenn Wasser Sauerstoff verdrängt, führt dies zu Sauerstoffmangel und einem niedrigeren Redoxpotenzial (1 V fällt auf +0,5 bis +0,6 V). Nimmt das Redoxpotenzial weiter zu, das heißt durch immer weniger Angebot an (oxidierend wirkendem) Sauerstoff wird  $Fe^{3+}$  zu  $Fe^{2+}$  reduziert. Infolge von übermäßigem Gießen wird der Sauerstoff immer stärker aus dem Substrat verdrängt, in der Folge wird die Atmung eingestellt, der Transpirationsstrom fällt weiter ab und es kommt zu einer Mangelernährung – wie unter Calcium im Teil 1 bereits dargestellt.

**Tipp:** Wenn das Substrat (fast) ausgetrocknet ist (Trockenstress vermeiden!) muss gegossen werden. übermäßiges Gießen führt jedoch zu Staunässe im Substrat und zur Sauerstoffverdrängung, Einstellung des Transpirationsstroms und der Atmung, folglich zu Wachstumsdepression und Bildung von toxischen  $Fe^{2+}$ -Ionen bei Anwesenheit von Eisenoxid.

## Sauerstoff

Mit speziellen Geräten wie einer Aquarienbelüftungspumpe (Sprudler) kann durch eine Erhöhung des Sauerstoffgehalts im Wasser auch keine Verbesserung in der  $O_2$ -Versorgung effektiv erreicht werden. Wasser kann nur relativ wenig Sauerstoff anreichern. Bei 0 °C beträgt der Sättigungswert 14,6 mg/l und sinkt bei 20 °C auf 9,1 mg/l. Bei Verwendung von speziellen Sauerstoffanreicherungsgeräten wie Oxywell oder Oxicur kann er zwischenzeitlich auf 40 bis 70 mg angehoben werden (Kosten für ein solches Gerät: 299 €), bei Oxicur auf 40 bis 90 mg (2152 SFr), bei angereicherterem Sauerstoff im Mineralwasser liegt er bei 50 bis

70 mg (Werbung: „Ohne Sauerstoff keine Energie, ohne Sauerstoff keine Leistungsfähigkeit“). Solche „Sauerstoffwässer“ enthalten zwar bis zu zehnmal mehr an Sauerstoff als nicht angereichertes Wasser, aber im Vergleich mit dem, was die Pflanze täglich über die Luft aufnimmt (im zweistelligen Gramm-Bereich im Vergleich zu nur mg angereichertes Wasser, je nach Größe der Pflanze und Art), ist dies minimal mehr und nicht von ausschlaggebender Bedeutung. Den Sauerstoffstatus des Pflanzenorganismus über Sauerstoffwasser zu verbessern, ist nicht sinnvoll (Effekt wenn überhaupt gering und dazu noch relativ teuer, bei Verwendung spezieller dafür geeigneter Geräte).

**Tipp:** Sauerstoffangereichertes Wasser (Sauerstoffwasser) durch Anreicherungsgeräte oder fertiges Mineralwasser führt zu einer minimalen Anreicherung des Sauerstoffs im Wasser, verändert somit das Redoxpotenzial kaum und ist nicht sinnvoll, wenn so der Sauerstoffstatus der Pflanze und damit die Energie für Wachstum etc. verbessert werden soll.

Aus „Box 3: Funktionen des Eisens in der Pflanze“ ergibt sich nachfolgender Tipp:

**Tipp:** Aufgehellte Blätter können auch durch eine zu hohe Lichteinstrahlung, tief dunkelgrüne Blätter durch eine zu geringe Lichteinstrahlung verursacht werden. So gleicht die Pflanze die mangelnde oder zu starke Lichteinstrahlung durch eine Erhöhung oder Erniedrigung des Chlorophyllgehalts im Blatt aus. In der Kultur ist in etwa eine hellgrüne Blattfärbung, beispielsweise im Falle von Cattleyen, für einen ausreichend hohen Chlorophyllgehalt und damit für die Photosynthese anzustreben.

## Zusammenfassung

Zusammenfassend folgt für die Ernährung der Pflanze mit Eisen:

- Eisen ist zu einem Valenzwechsel  $Fe^{2+}$  zu  $Fe^{3+}$  unter Aufnahme, Reduktion, oder umgekehrt

Abgabe, Oxidation, eines Elektrons fähig.

- $Fe^{3+}$  liegt im Substrat bei hohen pH-Werten und in aeroben (Sauerstoff) Medien ausschließlich vor.
- $Fe^{3+}$  liegt als Oxid (Rost) vor, ist unlöslich und daher sehr schlecht pflanzenverfügbar – je höher der pH-Wert umso schlechter.
- $Fe^{3+}$  muss für einen besseren Transport zur Wurzel und als Schutz vor Reduktion als Chelat gebunden werden: synthetisch oder natürlich (Siderophor).
- Das wirksamste synthetisch hergestellte Chelat ist orthoortho-EDDHA (Basafer), das schlechteste und toxisch wirkende ist EDTA (nicht verwenden).
- Der Aufnahmemechanismus der Pflanze verläuft sehr komplex: Ansäuern der Wurzelumgebung, Ausschüttung von Siderophore, Bindung von  $Fe^{2+}$  im Siderophor, Transport mit dem Massestrom zur Wurzel, Aufnahme unter Reduktion des  $Fe^{3+}$  zu  $Fe^{2+}$ , Transport des  $Fe^{2+}$  als Nicotianamin-Komplex zum Zielorgan.
- Auftreten von Chlorosen (Gelbfärbung der Blätter) infolge eines Eisenmangels, der die Chlorophyllbildung in der Porphyrin biosynthese unterbindet.
- Behandeln von Chlorosen mit einer Lösung aus Basafer (40 mg/l) oder mit Profidünger GOLD (10 ml/500 ml), effektiv auch über das Blatt, folgend der Empfehlung in der Dosierung für Eisen-III (2 mg/l jede dritte Woche) von Dr. Rakocy, University Virgin Islands.

Wird fortgesetzt ...

Dr. Wolfgang Ermert, Senden



Anmerk. d. R.: Auch dieser Beitrag wurde bereits in der Ausgabe 85 im **OrchideenZauber** veröffentlicht und uns dankenswerterweise zur Verfügung gestellt.

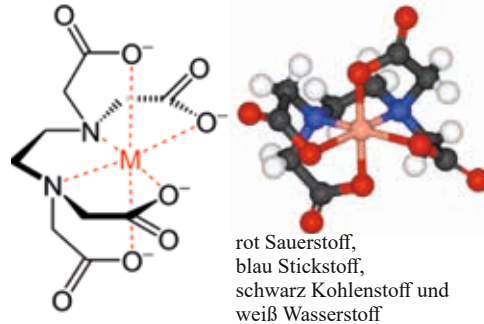
## Box 1: Chelate des Eisens

Eisen besitzt eine ausgeprägte Fähigkeit, aufgrund seiner Nebenvalenzen, die eine schwächere Wechselwirkung zwischen Molekülen im Vergleich zu einer ionischen Bindung ausüben, „Metall-Chelat-Komplex“ mit organischen Molekülen einzugehen. Die Komplexbildner als Liganden oder Chelatoren (griechisch chele = Krebssehne) können entweder von Pflanzenwurzeln als Siderophore ausgeschieden oder synthetisch hergestellt werden. Sie umfassen dabei das Eisen zangenartig wie ein „Krebs“, je nach Anzahl der Bindungsstellen unterscheidet man 2-, 3-, 4- oder mehrzählige Chelate (s. Abb.). Um die Orchideen mit ausreichendem Eisen in einer Düngung zu versorgen, wird Eisen in synthetisch hergestellten, organischen, geeigneten Komplexverbindungen chelatisiert, kann so rasch aufgenommen und ein Eisenmangel vermieden werden.

Verschiedene mehr oder weniger gut geeignete Chelate werden in den Düngungslösungen, die Eisen-III umschließen können, verwendet. Als Chelat wandert Eisen-III relativ leicht mit dem Massestrom zur Wurzel und wird vor Oxidation zu Rost geschützt. Das bekannteste und am häufigsten hierfür in Düngungslösungen eingesetzte Chelat ist Fe-EDTA, Eisen-Ethylendiamintetraessigsäure (engl. acetic acid), da es relativ preiswert und gut verfügbar ist.

Fe-EDTA ist jedoch für Orchideen keine gute Wahl! Einerseits ist es für viele Pflanzen, insbesondere Orchideen, toxisch – Fe-EDTA wird als Herbizid in der Landwirtschaft zur Bekämpfung von Unkraut verwendet – und andererseits ist es nur bis zu einem pH-Wert um 6 (s. Abb.) stabil, das heißt, da im Substrat häufig höhere pH-Werte vorliegen, fällt unlöslicher Rostschlamm aus.

In relativ vielen preisgünstigen kommerziellen Düngungslösungen (auch speziell als Orchideendünger) wird Fe-EDTA eingesetzt und kann somit eine mögliche Quelle für Pflanzenverluste darstellen!



**Links: EDTA als Chelatbildner M ist das komplexgebundene Metall z. B. Fe<sup>3+</sup>, das sechs koordinative Bindungen (rot) mit Stickstoff und Sauerstoff in Form des Säureanions der Carboxy-Gruppe COO<sup>-</sup> der Essigsäure eingeht.**

**Rechts: Das Strukturmodell, in der Mitte Fe<sup>3+</sup>.**

**Quelle: Wikipedia**

**Tipp:** Überprüfen Sie den von Ihnen verwendeten Dünger und achten Sie darauf, ob er Eisen als Fe-EDTA enthält – diesen Dünger sollten Sie auf keinen Fall insbesondere für besonders empfindliche Orchideen über längere Zeit wegen der Toxizität und des instabilen Komplexes bei pH-Werten >6 verwenden.

Als gut geeignete, synthetisch hergestellte Chelatoren werden entweder DTPA (Diethylentriamin-pentaessigsäure, engl. acetic acid) als Fe-EDTPA-Komplex, der in einem pH-Wert-Bereich bis 7,5 stabil ist, oder noch besser EDDHA (Ethylenediamine-N,N'-di(2-hydroxyphenyl)essigsäure) als Fe-EDDHA-Komplex, der in einem pH-Wert-Bereich von 2,5 bis 9 stabil ist, empfohlen. Dünger, die Eisen in dieser Form chelatisiert enthalten, sind für Orchideen sehr gut geeignet und verträglich – vor allem aber als Fe-EDDHA. Fe-EDDHA wird im Handel auch unter der Bezeichnung Sequestren® beispielsweise Sequestren®-Fe-138 angeboten. Fe-EDDHA

## Box 1: Chelate des Eisens

verfügt über eine weitere besondere Eigenschaft als organisches Molekül, die man sich seit einigen Jahren zu Nutzen gemacht hat. Es kann in verschiedenen sterischen Anordnungen (darunter wird die Position der Moleküle im Raum verstanden) und zwar sowohl in einer ortho-ortho- als auch in einer ortho-para-Stellung vorliegen (s. Abb.).

In der ortho-ortho-Stellung entsteht eine weitere Bindungsstelle, die das Eisen noch fester binden kann. Dadurch wird ortho-ortho-Fe-EDDHA noch stabiler als die ortho-para-Anordnung etwa bis zu einem pH-Wert von 10 (s. Vergleichsabbildung Fe-EDTA zu Fe-EDDHA), was vor allem bei stark basischem Substrat in Anwesenheit von Hydrogencarbonaten (s. Teil 1) sehr wichtig ist und kann Eisen optimal vor einer Oxidation schützen.

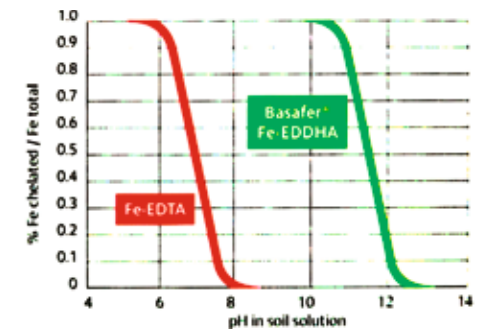
Im unter der Handelsbezeichnung Basafer® Plus angebotenes Fe-EDDHA liegt es zu 83 % in der ortho-ortho-Form (in Basafer zu 58 %) mit einer pH-Wert-Stabilität bis 11 bei 100 % Wasserlöslichkeit vor und enthält circa 5 % Eisen gebunden – 1 g Basafer Plus enthält also 50 mg Eisen. Basafer ist deutlich teurer als beispielsweise Fe-EDTA, es gibt auch aus Kostengründen keinen Dünger mit Basafer® Plus, sondern lediglich in Form eines Einzeldüngers. (Sequestren® erweist sich im Übrigen unter Lichteinwirkung auf Dauer als weniger stabil).

Bei akutem Eisenmangel und damit verbundenen auftretenden Chlorosen sollte sofort eine Behandlung mit Basafer® Plus über die Wurzel oder besser über das Blatt mit 2 mg/1 Fe durchgeführt werden (Rakocy et al., University of Virgin Islands, die diese Dosierung von Eisen über Jahre erforscht und als Empfehlung abgegeben haben), entsprechend 40 mg Basafer® Plus in 1 l Wasser.

Profidünger GOLD enthält ausschließlich das hochwirksame Basafer® Plus als Eisenchelator in der von Rakocy empfohlenen Dosierung. Mit Profidünger GOLD 10 ml/500 ml Wasser (gleich zwei Verschlusskappen auf einen halben Liter Wasser)

entsprechend 1 mg/1 wöchentlich wird die empfohlene Menge von circa 2 mg/1 Fe sicher erreicht und die Lösung kann so heilend sowie vorbeugend gegen (Eisen-)Chlorosen eingesetzt werden. Sie kann auch über die Blätter unter gründlichem Einsprühen vor allem unter Zusatz eines Spreitmittels auf Silikonbasis wie Break®-through oder Silvet® Gold (s. dazu auch Teil 1) gut appliziert werden, da so eine direkte und schnelle Aufnahme über die Blattöffnungen (Stomata) gegeben ist und der im Text beschriebene, über die Wurzel erfolgende, mehrstufige (daher länger dauernde und daher auch nicht immer perfekt funktionierende) komplizierte Aufnahmeprozess vermieden oder umgangen wird.

**Randbemerkung:** Gerade am Beispiel Eisen lässt sich die Entwicklungsarbeit des Profidüngers GOLD über Jahre ablesen, um schließlich einen für Orchideen gut verträglichen und hoch effektiven Chelator wie Basafer Plus zu finden. In den Formulierungen von EPSTEIN et al. (2015) ist dies (noch?) nicht enthalten, sondern nur Sequestren, das sich für Orchideen aber als weniger gut verträglich erwies.



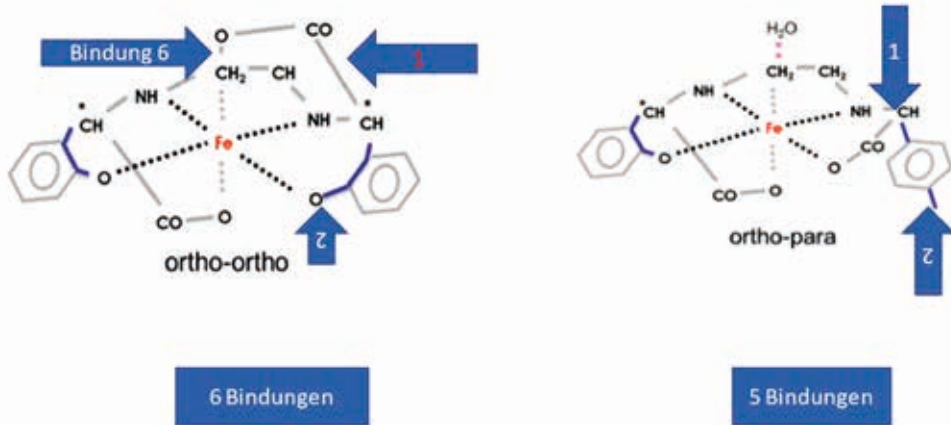
**Vergleich der Stabilität von Fe-EDTA mit Fe-EDDHA bezüglich pH-Wert: Fe-EDTA beginnt bei pH-Wert 6 Eisen freizusetzen, Basafer bei pH-Wert 11.**

Abb.: Basafer®

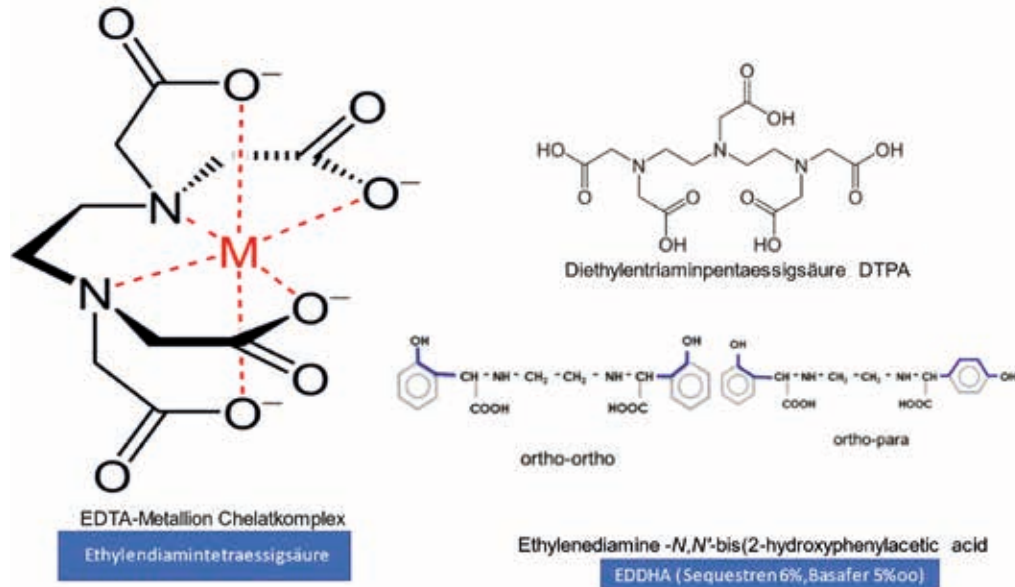


**Box 1: Chelate des Eisens**

**Besonderheit der Ortho-Ortho Stellung Basafer**



Sequestren ortho-para

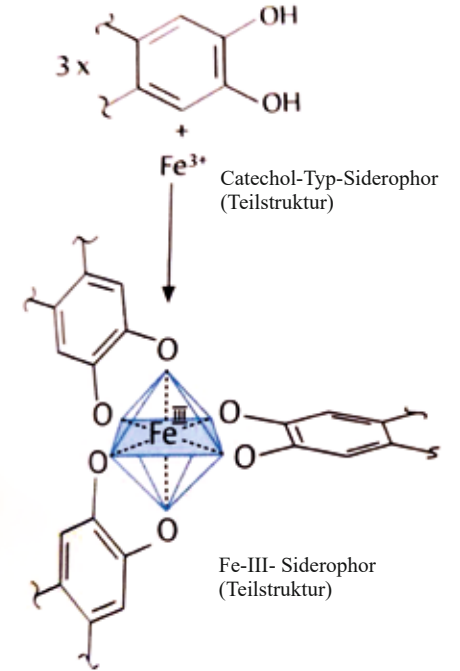


Basafer plus (ortho-ortho 85 %)

**Box 2: Wirkung und Struktur der Siderophore „Eisenträger“ und der Transport des Eisens in der Pflanze**

Um das Defizit zwischen dem Eisenbedarf 10<sup>-4</sup> bis 10<sup>-6</sup> Mol und der Eisenverfügbarkeit im Substrat von 10<sup>-1</sup>s bis 10<sup>-18</sup> Mol zu überwinden und die Löslichkeit von Eisen zu erhöhen, scheiden Orchideen unter Ansäuerung der Rhizosphäre (Wurzelumgebung) Chelatkomplexe aus, die als (Phyto-) Siderophore (gr. Eisenträger) bezeichnet werden. Die Möglichkeit, Eisen-III als Chelat zu binden und so in eine lösliche und mobile Form zu überführen, ist für die Ernährung der Pflanze von lebenswichtiger Bedeutung, um einem Eisenmangel vorbeugen zu können. So gelangt das im Siderophor gebundene Eisen mit dem Massestrom (s. Teil 1) zur Wurzel der Pflanze und kann von ihr aufgenommen werden. Siderophore sind organische Verbindungen vom Catechol-Typ, wobei sich drei Moleküle des Catechols an das Eisen-III anlagern können und so einen sehr stabilen Komplex mit sechs Bindungen ausbilden (s. Abb.). Es wurden bisher circa 200 verschiedene Siderophore nachgewiesen, die von der Pflanze ausgeschieden werden können. Siderophore sind kleine Moleküle und besitzen eine sehr geringe Molmasse. So sind sie in der Lage, leicht über spezifische Eisen-Kanäle in der Zellwand hinein- und herauszuschlüpfen. Die Konzentration im Wurzelbereich kann dabei sehr hoch werden (2 mg/l). Liegt in der Pflanze nicht mehr genügend Fe<sup>2+</sup> vor, wird die Siderophorsynthese in der Pflanze in Gang gesetzt, die Eisenkanäle in der Zellwand geöffnet und schnell relativ hohe Konzentrationen über die Zellwand in das angrenzende Medium ausgeschüttet.

Der Aufnahmeprozess vollzieht sich dabei in Etappen, die auch gleichzeitig ablaufen können. Zunächst werden über die Wurzelzellwand Protonen zur Ansäuerung in die Rhizosphäre ausgeschieden, die durch die Reduktion von ATP zu ADP unter Bildung eines Protons entstehen. Diese pH-Wert-Absenkung führt zu einer höheren Löslichkeit des Eisen-III-Hydroxy-Komplexes – eine pH-Wert-

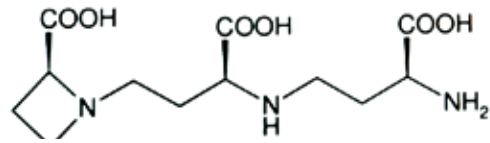


**Komplexierung von Fe<sup>3+</sup> durch Siderophore vom Catechol-Typ.**

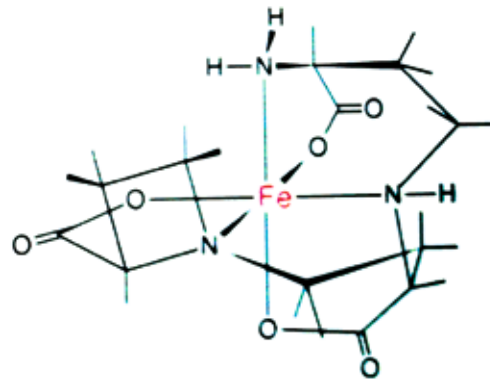
**Aus WEILER & NOVER: Allgemeine und molekulare Botanik, S. 236.**

Absenkung von 1 hat eine 100-fache höhere Löslichkeit, allerdings immer auf niedrigem Niveau, zur Folge. So gleichen die Siderophore aufgrund einer ausgeprägten hohen Affinität zu Fe<sup>3+</sup> die schlechte Verfügbarkeit aus und nehmen Eisen auf. Auch Bodenpilze können solche Chelatkomplexe ausscheiden und somit die Verfügbarkeit von Eisen zusätzlich steigern. An der Zellwand (dem Plasmalemma) wird das siderophorgebundene Fe<sup>3+</sup> zu Fe<sup>2+</sup> reduziert und da das Siderophor Fe<sup>2+</sup> deutlich geringer binden kann, in die Zelle transportiert. Das Fe<sup>2+</sup> wird dann in der Pflanzenzelle in einen Chelatkomplex mit Nicotianamin (auch als FUR

**Box 2: Wirkung und Struktur der Siderophore „Eisenträger“ und der Transport des Eisens in der Pflanze**



Nicotianamin-Molekül



Drei Moleküle Nicotianamin, die Fe<sup>2+</sup> sechsfach gebunden in einem Chelatkomplex fest umschließen.

infolge einer zu hohen Zinkkonzentration wird Nicotianamin bevorzugt an Zink gebunden und steht so nicht mehr ausreichend zur Verfügung. Zink darf daher nur in ganz geringen Spuren, maximal 50 µg/l, dem Dünger zugesetzt werden, um Chlorosen durch Eisenmangel, hervorgerufen durch Zink und damit Festlegung des Chelatkomplexes Zn-Nicotianamin, zu vermeiden.

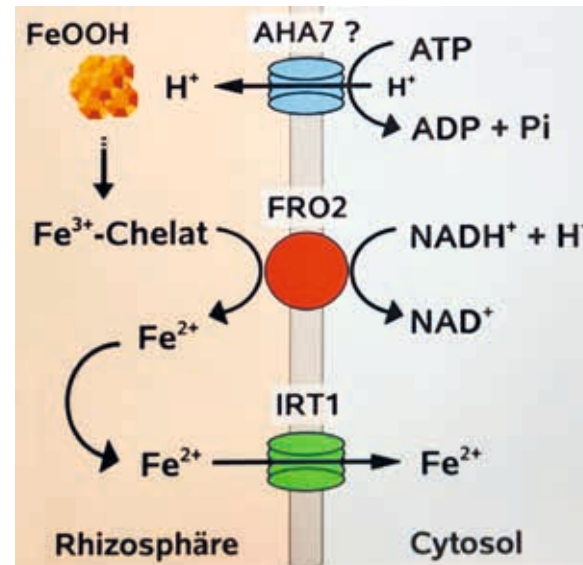
**Tipp:** Der Dünger darf nicht mehr als maximal 50 µg/l Zink wie im Profidünger GOLD zur Vermeidung von Eisenchlorosen enthalten. Vermeiden Sie bei Regenwasserverwendung Zinkgießkannen, -regenrinnen, -sammelbehälter und Ähnliches.

Nicotianamin (NA) kann Eisen als Fe<sup>2+</sup> gut und fest komplexieren. Der Transport von Fe<sup>2+</sup> erfolgt somit in Form des NA-Chelats in der Pflanze. Es sollte noch erwähnt werden, dass der komplex verlaufende Aufnahmemechanismus zum Beispiel auch durch nicht wirksame Mutanten von der Eisenreduktionsoxidase (FRO<sub>2</sub>) gestört sein kann – ein leider häufig auch eintretender Fall. Eine solche Mutante wurde beispielsweise als yellow stripe identifiziert, weil sie durch den von ihr bewirkten Eisenmangel gelbe scharf abgegrenzte Längsstreifen im Spross verursacht.

Allerdings läuft häufig in der Orchidee folgende Reaktion ab: setzt man Basafer (s. Box 1) dem Substrat in der Nähe der Pflanze zu (s. Abb. oben), um so dem Fe-III-Mangel zu begegnen, reagieren sie nach kurzer Zeit (innerhalb eines Tages) mit einem verstärkten Eisenmangel, also Gelbverfärbung der Blätter, dann aber springt das Warnsystem zur Erkennung des nicht ausreichend vorhandenem Fe<sup>2+</sup> in der Pflanze an und nun läuft das oben zur Eisenaufnahme geschilderte Szenario (Ansäuern der Wurzelumgebung, Ausschüttung von Siderophore, Freisetzung des Fe<sup>3+</sup> aus dem Basafer-Komplex, Reduktion des Fe<sup>3+</sup> zu Fe<sup>2+</sup>) ab, sodass

fenic uptake regulator bezeichnet) überführt und nicht als freies Ion weiter zu den Zielorganen, beispielsweise den Chloroplasten, transportiert (s. Abb.). Diese Darstellung entspricht den neuesten Erkenntnissen und weicht daher in der Beschreibung beispielsweise von Wikipedia ab. Liegt eine Störung der Nicotianamin-Bildung in der Pflanze vor, wird die Eisenverteilung gestört und so Chlorose hervorgerufen. Das bedeutet, auch wenn die Pflanze genügend Eisen aufgenommen hat, kann eine Chlorose auftreten, wenn kein freies Nicotianamin in der Pflanze vorliegt. Nicotianamin ist nach neueren Untersuchungen normalerweise ausreichend in der Pflanze vorhanden, da es aus drei Molekülen Adenosyl-Methionin, einem Grundbaustein der Pflanze, gebildet wird. Aber

**Box 2: Wirkung und Struktur der Siderophore „Eisenträger“ und der Transport des Eisens in der Pflanze**

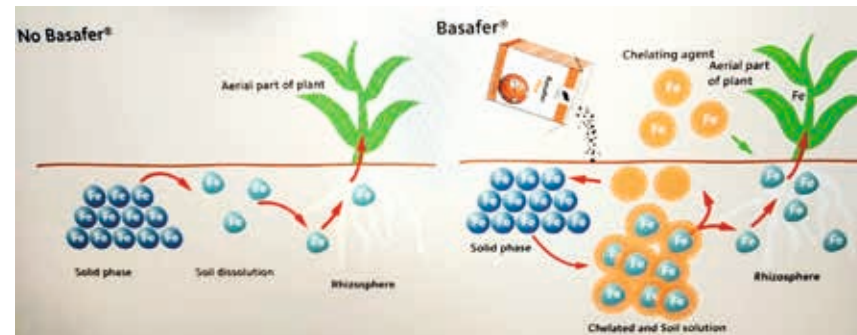


Aufnahmemechanismus nach neuesten Untersuchungen: Zunächst wird die Rhizosphäre angesäuert (ATP wandelt sich in ADP, unter Freisetzung eines Protons um AHA7 ?)

**Oben:** das so im Substrat gebildete Eisenhydroxid wird durch Ausscheidung von Siderophor aus der Pflanze chelatisiert,

**Bildmitte:** und so mit dem Wurzelstrom an die Wurzeloberfläche gesogen, wo es zu Fe<sup>2+</sup> durch FRO<sub>2</sub> (ferrit reduction oxidase 2) reduziert wird

unten: und schließlich über IRT1 in die Pflanze transportiert wird.



Die Abbildung zeigt links eine große Menge an Eisen an das Substrat gebunden, aber nicht verfügbar.

Rechts: Fe an EDDHA gebunden, das zur Pflanze transportiert wird.

Eisen wird dabei aus dem EDDHA-Komplex nach Reduktion zu Fe<sup>2+</sup> freigesetzt und so in die Pflanze transportiert.

Abb.: Basafer

am Ende der Kette die Pflanze  $\text{Fe}^{2+}$  aufnehmen kann und es zu einer deutlichen Chlorophyllneubildung kommen kann - dies geschieht wiederum in wenigen Stunden! Zwar ist der Eisenmangel damit zunächst behoben, aber nach kurzer Zeit wiederholt sich dieser Vorgang von neuem. Dieser sehr komplizierte Mechanismus zur Eisenaufnahme wird durch Anwesenheit von Hydrogencarbonat stark gestört (basische Bedingungen legen Eisen fest, s.o.) und er gilt im Übrigen auch für andere

Schwermetalle – auch für toxische wie Cadmium!

**Tipp:** Nach Behandlung der Orchidee mit Fe-III-Chelaten wie Basafer aufgrund von auftretenden Chlorosen kann dies zunächst zu einer Verstärkung der Chlorose führen, was jedoch kein Grund zur Besorgnis ist, denn nach wenigen Stunden wird die Chlorose dann vollständig behoben.

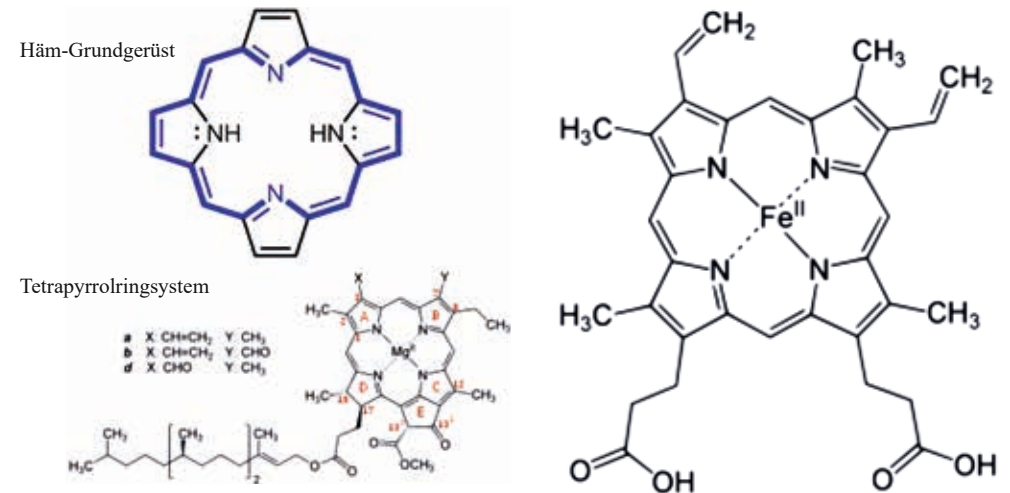
### Box 3: Funktionen von Eisen in der Pflanze

Eisen erfüllt mehrere Funktionen in der Pflanze, die im Wesentlichen darauf beruhen, dass es wie beschriebene Komplexe (Chelate) bilden kann und so durch den Valenzwechsel  $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+}$  an Reduktions-Oxidationsprozesse durch Aufnahme und Abgabe eines Elektrons an vielen Reaktionsabläufen in der Zelle maßgeblich mitwirken kann. Bei der Porphyrinbiosynthese ausgehend von Glutamyl-tRNA in den Plastiden entsteht in einer mehrstufigen Reaktionsfolge als Endprodukt entweder Chlorophyll, durch Einbau eines Magnesium- ( $\text{Mg}^{2+}$ ) Ions (siehe später unter Magnesium) in das Tetrapyrrol-Ringsystem (s. Abb.) oder Häm durch Einbau von Eisen als  $\text{Fe}^{2+}$ .

Das Häm liegt nicht frei in der Zelle vor, sondern wird im gut löslichen und membrangebunden Cytochrom-Protein gebunden und dient so in den Zellen in vielen Redoxreaktionen als Ein-Elektronen-Überträger. Als Folge eines Fe-Mangels kann sich das Tetrapyrrolringsystem aber nicht bilden, die Synthese bleibt auf der Stufe der

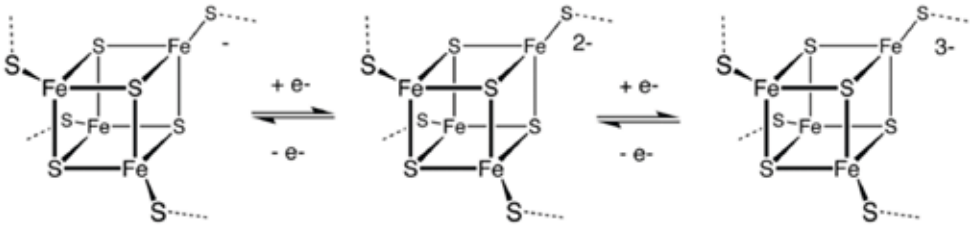
ö-Aminolävulinsäure stehen und es kommt zu einer Anhäufung der Säure in den Chloroplasten und die Chlorophyll- und Häm-Bildung unterbleibt. Dies führt dann in der Folge zum geschilderten Schadensbild der Chlorose in der Gelbfärbung der Blätter. Der Chlorophyllgehalt der Blätter kann als ein Gradmesser für die Eisen-Versorgung angesehen werden, das heißt, je heller das Blatt, um so stärker der Eisenmangel. Allerdings gilt dies nur dann, wenn die Pflanze in etwa immer annähernd gleichen Lichtbedingungen ausgesetzt ist.

Aufgehellte Blätter können auch ein Zeichen von einer zu hohen Sonneneinstrahlung sein, in diesem Falle zieht die Pflanze das Chlorophyll aus den Blättern ab, damit es so in der Photosynthese nicht zu einer „überhitzten“ Reaktion aufgrund eines zu hohen Chlorophyllgehalts im Blatt kommen kann. Hingegen steigt bei einer Dunkelgrünverfärbung des Blatts der Chlorophyllgehalt, durch eine nicht ausreichende Lichteinstrahlung. So wird durch ein





### Box 3: Funktionen von Eisen in der Pflanze



Ein  $\text{Fe}_4\text{S}_4$ -Cluster, als Elektronenüberträger. Eisen ist dabei am Schwefel des Cysteins, einer essenziellen Aminosäure, zusätzlich gebunden.

Abb.: Wikipedia

erhöhtes Chlorophyllangebot die Photosyntheserate wieder angehoben.

Häufig wird auch der Chlorophyllgehalt des Blatts mit einem Gehalt an Katalase- und Peroxidaseaktivität in Verbindung gesetzt und dieser wiederum korreliert mit dem Eisengehalt. Eisenmangel hat somit auch eine niedrige Konzentration der Katalase und Peroxidase zur Folge und führt damit zu einer Anreicherung von Wasserstoffperoxid (toxisch) in den Chloroplasten etc. – hierauf wird in der Borennährung noch näher eingegangen!

Zu den wichtigsten und für die Zelle in vielen ablaufenden Stoffwechselprozessen unverzichtbarer,

durch kein anderes Redoxsystem zu ersetzender, Elektronen-Lieferant zählt Ferredoxin. Es handelt sich um relativ kleine Proteine, die Eisen und Schwefel enthalten und in einem Eisen-Schwefel-Cluster angeordnet sind. Sie liegen entweder als  $\text{Fe}_2\text{S}_2$  oder als  $\text{Fe}_4\text{S}_4$  ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ) vor (s. Abb.).

Auf eine wichtige Funktion des  $\text{Fe}_4\text{S}_4$  Clusters zur Reduktion von Nitrit (toxisch für die Zelle) wird unter dem Teil Stickstoff noch näher eingegangen werden.