

Hydrogeologie

Metallionen in wässriger Lösung

Prof. Dr. Georg Wieber

Metallionen in wässriger Lösung

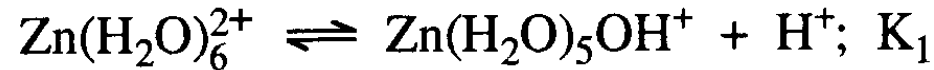
- metallischer Charakter,
- häufig: < 100 ppm,
- natürliche Emissionen:
 - Verwitterung, Vulkane, natürliche Aerosole aus natürlichen Quellen (Meere, Böden, ..)
- anthropogen verursachte Emissionen:
 - Erzgewinnung und/ Verhüttung, metall verarbeitende Industrie, ..
- z.T. für Organismen essentiell:
 - Cu, Zn, Co, Fe, Ni, Mn, Cr, V, Mo, Se
- z.T. nicht essentiell, aber toxisch:
 - Pb, Hg, Cd

Speziierung

= verschiedene Bindungsformen eines Elements

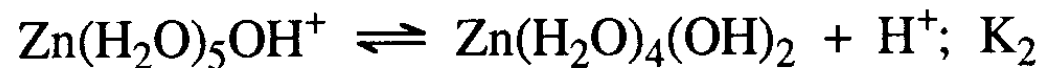
- z.B. gelöst (aq) oder fest (s),
- Komplexe mit verschiedenen Liganden,
- starke Unterschiede in der Wirkung auf Organismen,
- erhebliche Unterschiede hinsichtlich Verhalten in der Umwelt:
 - Transport in den Sedimenten,
 - Infiltration ins Grundwasser,
 -

Hydrolse und Bildung schwerlöslicher Oxide und Hydroxide



$$K_1 = \frac{[\text{Zn}(\text{OH})^+] [\text{H}^+]}{[\text{Zn}^{2+}]}$$

bzw.



$$K_2 = \frac{[\text{Zn}(\text{OH})_2] [\text{H}^+]}{[\text{ZnOH}^+]}$$

wobei $K_1 \cdot K_2 = \beta_2$

$$\beta_2 = \frac{[\text{Zn}(\text{OH})_2] [\text{H}^+]^2}{[\text{Zn}^{2+}]}$$

Für eine Spezies mit m Hydroxogruppen ist:

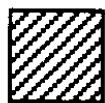
$$\beta_m = \frac{[\text{Me}(\text{OH})_m^{(n-m)+}] [\text{H}^+]^m}{[\text{Me}^{n+}]}$$

Speziierung der Metallionen

- A-Kationen haben die Elektronenkonfiguration eines Edelgases; sie werden als “harte” Kationen bezeichnet ; ihre Wechselwirkungen mit Liganden sind vorwiegend elektrostatischer Art; sie werden bevorzugt an “harten” Liganden gebunden z.B. an Fluorid und an Liganden mit Sauerstoff-donoratomen. Zu diesen gehören z.B. Al^{3+} , Ca^{2+} .
- B-Kationen haben eine Elektronenkonfiguration mit 10 oder 12 äusseren Elektronen; sie werden als “weiche” Kationen bezeichnet; ihre Wechselwirkungen mit Liganden haben zum Teil kovalenten Charakter; sie werden bevorzugt an S- oder N-Liganden gebunden. Dazu gehören zum Beispiel Cd^{2+} , Ag^{+} , Hg^{2+} .
- Alkali- und Erdalkali-Ionen können zu den A-Kationen gezählt werden; sie kommen meistens als freie Aquoionen vor; ihre Tendenz zur Komplexbildung ist gering.
- Elemente mit hohen Oxidationszahlen (z.B. As(V), Cr(VI) usw.) kommen überwiegend in hydrolysierten Spezies vor.

Elemente nach koordinationschemischen Eigenschaften

I	II											III	IV	V	VI
Li	Be											B	C	N	
Na	Mg											Al	Si	P	S
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr ^{III} _{VI}	Mn ^{II} _{IV}	Fe ^{II} _{III}	Co ^{II}	Ni ^{II}	Cu ^I _{II}	Zn	Ga	Ge	As ^{III} _V	Se ^{IV} _{VI}
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo					Ag ^I	Cd	In	Sn	Sb ^{III} _V	Te
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W					Au ^I _{III}	Hg	Tl ^I _{III}	Pb ^{II}	Bi ^{III}	



A-Kationen



B- Kationen



hydrolysierte Spezies

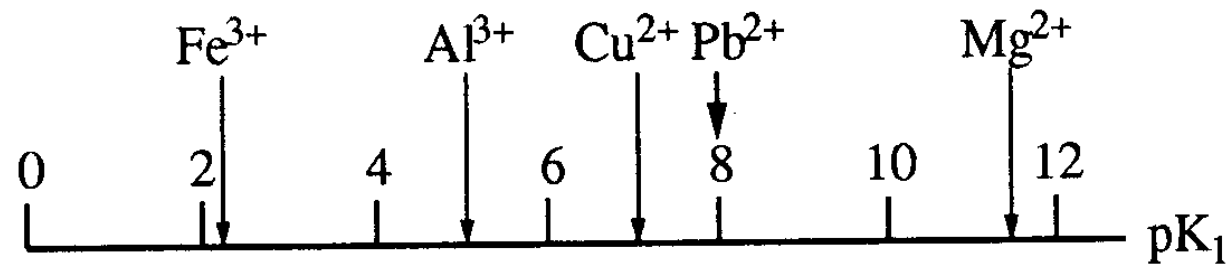


Kationen mit
überwiegendem
A-Charakter

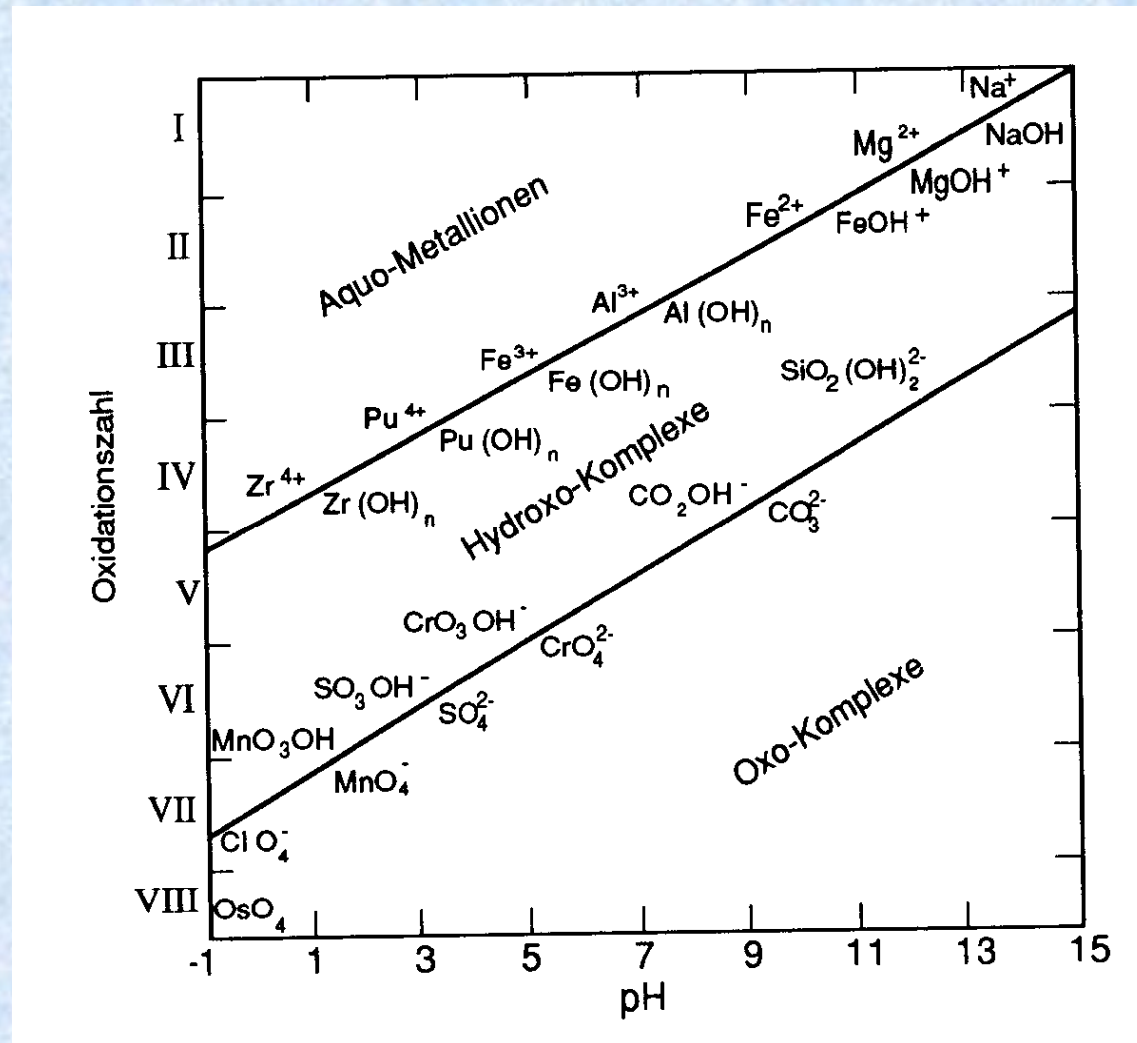


Kationen mit
überwiegendem
B-Charakter

Hydrolysekonstanten



Existenzbereiche von Komplexen



Speziierung von Metallen

TABELLE 6.2 Unter Süßwasserbedingungen hauptsächlich vorkommende anorganische Spezies (s. Text) und Verhältnisse von freien Me^{n+} zu totalen Me in Lösung

	Element	Hauptspezies	$[\text{Me}^{n+}]/[\text{Me}]_T$
Hydrolysiert, anionisch	B(III)	H_3BO_3 , $\text{B}(\text{OH})_4^-$	
	V(V)	HVO_4^{2-} , H_2VO_4^-	
	Cr(VI)	CrO_4^{2-}	
	As(V)	HAsO_4^{2-}	
	Se(VI)	SeO_4^{2-}	
	Mo(VI)	MoO_4^{2-}	

Speziierung von Metallen

Überwiegend freie Metallionen	Li	Li ⁺	1.00
	Na	Na ⁺	1.00
	Mg	Mg ²⁺	0.94
	K	K ⁺	1.00
	Ca	Ca ²⁺	0.94
	Sr	Sr ²⁺	0.94
	Cs	Cs ⁺	1.00
	Ba	Ba ²⁺	0.95

Speziierung von Metallen

Komplexbildung mit OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^-	Be(II)	BeOH^+ , $\text{Be}(\text{OH})_2^0$	1.5×10^{-3}
	Al(III)	$\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$	1×10^{-9}
	Ti(IV)	$\text{TiO}_{2(s)}$, $\text{Ti}(\text{OH})_4^0$	
	Mn(IV)	$\text{MnO}_{2(s)}$	
	Fe(III)	$\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$	2×10^{-11}
	Co(II)	Co^{2+} , CoCO_3^0	0.5
	Ni(II)	Ni^{2+} , NiCO_3^0	0.4
	Cu(II)	CuCO_3^0 , $\text{Cu}(\text{OH})_2^0$	0.01
	Zn(II)	Zn^{2+} , ZnCO_3^0	0.4
	Ag(I)	Ag^+ , AgCl^0	0.6
	Cd(II)	Cd^{2+} , CdCO_3^0	0.5
	La(III) ^{a)}	LaCO_3^+ , $\text{La}(\text{CO}_3)_2^-$	8×10^{-3}
	Hg(II)	$\text{Hg}(\text{OH})_2^0$	1×10^{-10}
	Tl(I), (III)	Tl^+ , $\text{Tl}(\text{OH})_3$, $\text{Tl}(\text{OH})_4^-$	2×10^{-21} ^{b)}
	Pb(II)	PbCO_3^0	5×10^{-3}
	Bi(III)	$\text{Bi}(\text{OH})_3^0$	7×10^{-16}
	Th(IV)	$\text{Th}(\text{OH})_4^0$	
	U(VI)	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$, $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$	$1 \cdot 10^{-7}$ ^{c)}

Konstanten sind aus Smith und Martell 1974-1989, Turner et al., *Geochim. Cosmochim. Acta* **45**, 855 (1981), Fouillac und Criaud, *Geochim. J.* **18**, 297 (1984), Millero, *Geochim. Cosmochim. Acta* **56**, 3123 (1992).

^{a)} La(III) ist für Lanthanide repräsentativ

^{b)} Redoxzustand unter natürl. Bedingungen unsicher, Verhältnis für Tl(III)

^{c)} als UO_2^{2+}

Wichtige Liganden natürlicher Gewässer

Konzentrationsbereiche in Süßwasser und Meerwasser (log Konz. (mol/l))		
	Süßwasser	Meerwasser
HCO_3^-	-4 – -2.3	-2.6
CO_3^{2-}	-6 – -4	-4.5
Cl^-	-5 – -3	-0.26
SO_4^{2-}	-5 – -3	-1.55
F^-	-6 – -4	-4.2
$\text{HS}^-/\text{S}^{2-1)}$	-6 – -3	–
Aminosäuren	-7 – -5	-7 – -6
org. Säuren	-6 – -4	-6 – -5

analytische Methoden

Trennung nach Grösse	Trennung nach Reaktivität	Spezifische Bestimmung einzelner Verbindungen
Filtration	Elektrochemische Methoden: ionenselektive Elektroden; voltammetrische Methoden	Gaschromatographie Flüssigchromatographie
Ultrafiltration		
Gelchromatographie	Ionenaustauscher	Spektroskopische Methoden
Dialyse	Ligandenaustausch, Bindung an einer festen Phase	

Beurteilungsgrundlagen

Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS): Konzentrationen, bei denen trotz einer Erhöhung gegenüber regionalen Hintergrundwerten keine relevanten ökotoxikologischen Wirkungen auftreten können und die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleiteter Werte eingehalten werden.

- Grundwasser soll überall als Trinkwasser nutzbar bleiben,
- als Lebensraum intakt gehalten werden.

Weitere Beurteilungsgrundlagen

1. rechtlich verbindliche, ökologisch begründete Umweltnormen für aquatische Lebenswesen (LAWA, 2003),
2. PNEC-Werte: entsprechend EU-einheitlichen und transparenten Prinzipien abgeleiteten und überprüften Werten (z.B. Chemikalienrecht),
3. Zielvorgaben der LAWA,
4. Zielvorgaben der Niederlande (mit ausführlichen Ableitungen).

GFS (LAWA, 2004)

Anorganische Parameter	Geringfügigkeitsschwellenwert (µg/L)
Antimon (Sb)	5
Arsen (As)	10
Barium (Ba)	340
Blei (Pb)	7
Bor (B)	740
Cadmium (Cd)	0,5
Chrom (Cr III)	7 s. Anhang 3
Kobalt (Co)	8
Kupfer (Cu)	14
Molybdän (Mo)	35
Nickel (Ni)	14
Quecksilber (Hg)	0,2
Selen (Se)	7
Thallium (Tl)	0,8
Vanadium (V) ¹⁾	4
Zink (Zn)	58
Chlorid (Cl ⁻)	250 mg/L
Cyanid (CN ⁻)	5 (50) s. Anhang 3
Fluorid (F ⁻)	750
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	240 mg/L

- 1) Die Anwendung des GFSwertes für Vanadium ist bis zum 31.12.2007 ausgesetzt. Diese GFS entspricht zwar dem aktuellen Wissen über die Humantoxizität von Vanadium und dem lebenslangen Schutz vor möglichen Wirkungen. Sie beruht jedoch auf einer unvollständigen und nur strittig zu bewertenden Datenbasis. Durch die Aussetzung soll insbesondere der Industrie die Gelegenheit gegeben werden, die experimentelle Datenbasis zur Human- und Ökotoxizität zu ergänzen. Es wird vermutet, dass auf verbesserter Datenbasis die GFS für Vanadium erhöht werden kann.

Beispiele

- Antimon
- Arsen,
- Barium,
- Blei.

Datenblatt Geringfügigkeitsschwelle

Antimon

Substanzname	Antimon
CAS-Nr.	7440-36-0
Geringfügigkeitsschwellenwert (µg/L)	5
Maßgebliche Basis für den Vorschlag	X TrinkwV ? Analog TrinkwV ? Ökotoxizität ? Hintergrundwert x 2
Grenzwert der TrinkwV (µg/L)	5
Analog TrinkwV vorgeschlagener Wert <ul style="list-style-type: none">- Humantoxikologisch begründeter Wert- Ästhetisch begründeter Wert- Minimierungswert	
Ökotoxikologische Kriterien (µg/L): <ul style="list-style-type: none">EU-QZPNEC (UBA)LAWA ZVMPCSonstige	6,3 (Crommentuijn et al., 1997)

Erläuterung

Ausschlaggebend für die Festlegung der Geringfügigkeitsschwelle ist der Grenzwert der TrinkwV.

Datenblatt Geringfügigkeitsschwelle

Arsen

Substanzname	Arsen
CAS-Nr.	7440-38-2
Geringfügigkeitsschwellenwert (µg/L)	10
Maßgebliche Basis für den Vorschlag	X TrinkwV ? Analog TrinkwV ? Ökotoxizität ? Hintergrundwert x 2
Grenzwert der TrinkwV (µg/L)	10
Analog TrinkwV vorgeschlagener Wert <ul style="list-style-type: none"> - Humantoxikologisch begründeter Wert - Ästhetisch begründeter Wert - Minimierungswert 	
Ökotoxikologische Kriterien (µg/L): <div style="margin-left: 100px;"> EU-QZ PNEC (UBA) LAWA ZV MPC Sonstige </div>	31 (Crommentuijn et al., 1997) 10 (UBA, 2000): Qualitätsziel der Schweiz für aquatische Lebensgemeinschaften

Erläuterung

Ausschlaggebend für die Festlegung der Geringfügigkeitsschwelle ist der Grenzwert der Trinkwasserverordnung.

Datenblatt Geringfügigkeitsschwelle

Barium

Substanzname	Barium
CAS-Nr.	7440-39-3
Geringfügigkeitsschwellenwert (µg/L)	350
Maßgebliche Basis für den Vorschlag	? TrinkwV ? Analog TrinkwV x Ökotoxizität ? Hintergrundwert x 2
Grenzwert der TrinkwV (µg/L)	
Analog TrinkwV vorgeschlagener Wert	
<ul style="list-style-type: none"> - Humantoxikologisch begründeter Wert - Ästhetisch begründeter Wert - Minimierungswert 	700 (Leitwert WHO 1996)
Ökotoxikologische Kriterien (µg/L):	
<div style="text-align: right; padding-right: 20px;"> EU-QZ PNEC (UBA) LAWA ZV MPC Sonstige </div>	350 (Crommentujin et al., 1997)

Erläuterung

Ausschlaggebend für die Festlegung der Geringfügigkeitsschwelle sind ökotoxikologische Kriterien.

Humantoxikologische Bewertungskriterien

Die WHO (1996) empfiehlt einen Trinkwasser-Leitwert von 700 µg/L für Barium. Dieser Wert wurde von der empfindlichsten verfügbaren epidemiologischen Untersuchung abgeleitet, in der Barium im Trinkwasser in einer Konzentration von 7,3 mg/l keine signifikanten Veränderungen im Blutdruck oder in der Häufigkeit von Herz-Kreislauferkrankungen gegenüber der Kontrollgruppe hervorrief. Zur Berücksichtigung besonders empfindlicher Subpopulationen wurde von der WHO ein Sicherheitsfaktor von 10 verwendet.

In der alten TrinkwV von 1990 war ein Grenzwert von 1000 µg/l angegeben.

Ökotoxikologische Bewertungskriterien

Datenblatt Geringfügigkeitsschwelle Blei

Substanzname	Blei
CAS-Nr.	7439-92-1
Geringfügigkeitsschwellenwert (µg/L)	10
Maßgebliche Basis für den Vorschlag	? TrinkwV ? Analog TrinkwV x Ökotoxizität x Hintergrundwert x 2
Grenzwert der TrinkwV (µg/L)	10
Analog TrinkwV vorgeschlagener Wert - Humantoxikologisch begründeter Wert - Ästhetisch begründeter Wert - Minimierungswert	
Ökotoxikologische Kriterien (µg/L): EU-QZ PNEC (UBA) LAWA ZV MPC Sonstige	3,4 (UBA, 2000) 13 (Crommentuijn et al., 1997)
Hintergrundwert (µg/L)	5 (s. Tab. 2.2-2)

Erläuterung

Ökotoxikologische Kriterien führen zu einer Geringfügigkeitsschwelle, die niedriger liegt als der Grenzwert der Trinkwasserverordnung und ebenfalls niedriger als der Hintergrundwert. Deshalb ist der Hintergrundwert ausschlaggebend für die Festlegung der Geringfügigkeitsschwelle.

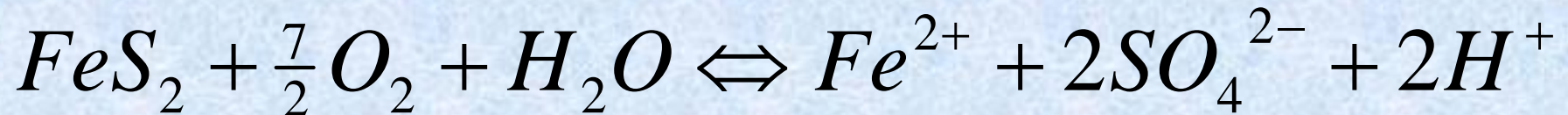
Humantoxikologische Bewertungskriterien

Um ausreichende Fristen zur Sanierung der in alten Wohnhäusern verlegten Blei-Leitungen zu gewähren, gilt für eine Übergangsfrist bis 2003 ein Grenzwert von 40 µg/L, bis 2013 von 25 µg/L. Für Grundwasser als Rohwasser für die Trinkwasserversorgung hat die toxikologische Begründung des Wertes von 10 µg/L jedoch volle Gültigkeit.

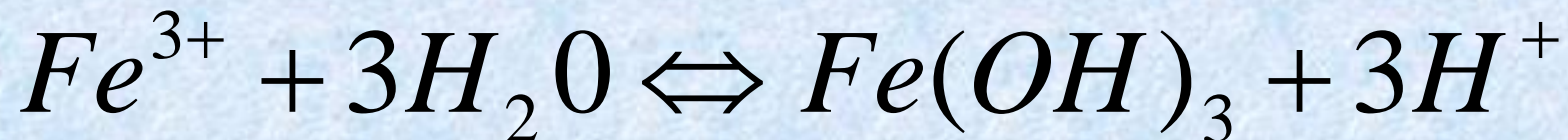
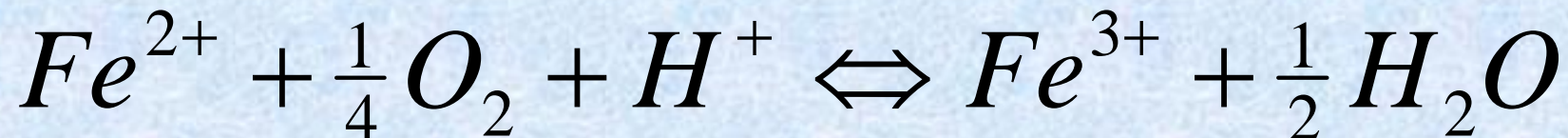
Verwitterung sulfidischer Erze

- Buntmetallsulfide: Metall- und Sulfidion,
- Bildung: anoxisches, stark reduzierendes Milieu,
- Sulfid: Wertigkeitsstufe – 2,
- Sauerstoff: Bildung Schwefelverbindungen höherer Oxidationsstufen.

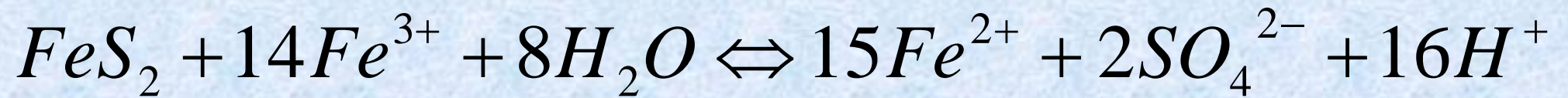
Sulfidoxidation



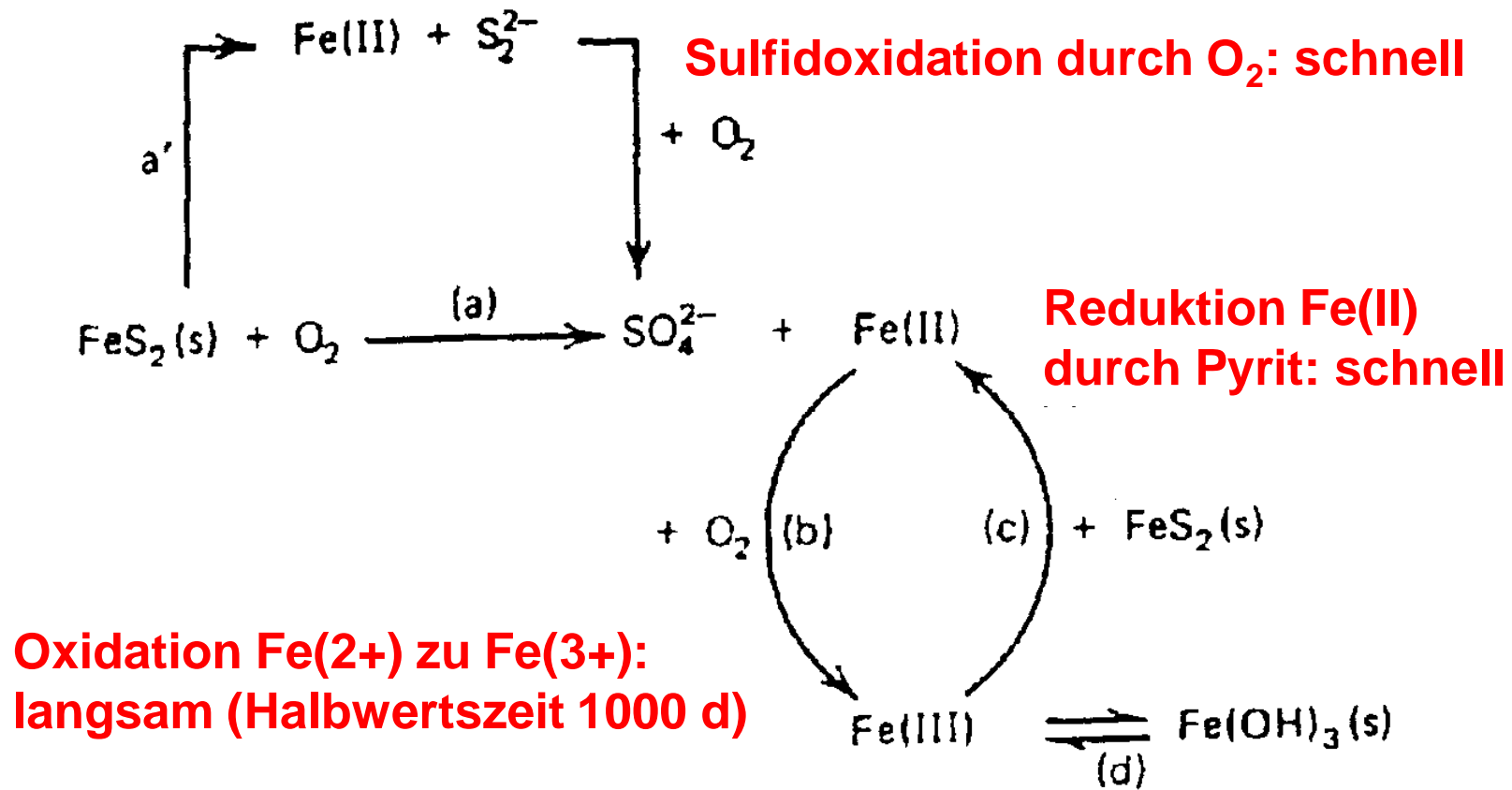
Dieser Redoxprozess führt zu gelöstem Eisen(II)-, Sulfat- und H^+ -Ionen im Wasser. Steht genügend Sauerstoff zur Verfügung, kommt es zur Oxidation der $Fe(II)$ -Ionen und zur Fällung von amorphen Eisenhydroxiden, was zu einer weiteren Zunahme der Protonen führt:



weitere Pyritoxidation durch Fe^{3+}



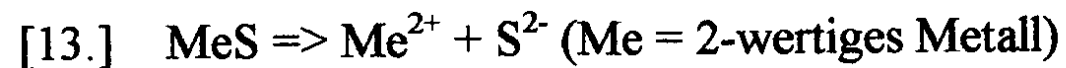
Kinetik der Pyritoxidation (STUMM & MORGAN)



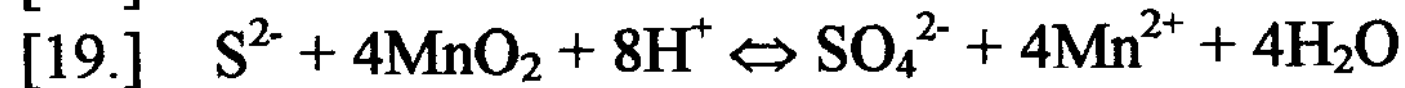
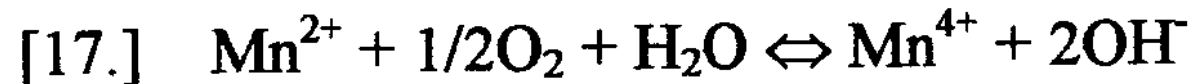
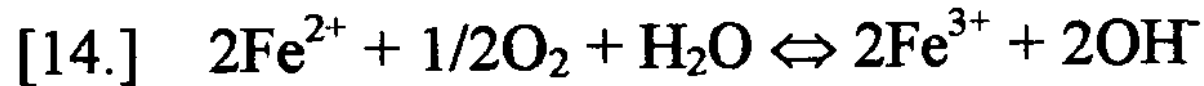
Löslichkeitsprodukte

Buntmetallsulfid	Löslichkeitsprodukt	mol^x/l^x
Greenockit	$[\text{Cd}^{2+}] \times [\text{S}^{2-}]$	$3,6 \times 10^{-29} (18^\circ \text{C})$
Chalkosin	$[\text{Cu}^+]^2 \times [\text{S}^{2-}]$	$2,0 \times 10^{-47} (18^\circ \text{C})$
Covellin	$[\text{Cu}^{2+}] \times [\text{S}^{2-}]$	$8,5 \times 10^{-45} (18^\circ \text{C})$
Millerit	$[\text{Ni}^{2+}] \times [\text{S}^{2-}]$	$1,4 \times 10^{-24} (18^\circ \text{C})$
Galenit	$[\text{Pb}^{2+}] \times [\text{S}^{2-}]$	$3,4 \times 10^{-28} (18^\circ \text{C})$
Spalerit	$[\text{Zn}^{2+}] \times [\text{S}^{2-}]$	$1,2 \times 10^{-23} (18^\circ \text{C})$
Zinnober	$[\text{Hg}^{2+}] \times [\text{S}^{2-}]$	$4,0 \times 10^{-58} (18^\circ \text{C})$

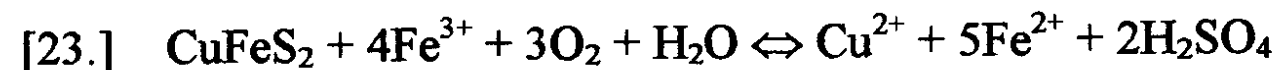
Die Buntmetallsulfide dissoziieren entsprechend ihrem Löslichkeitsprodukt:



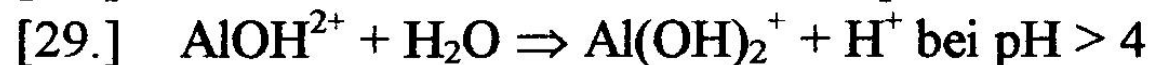
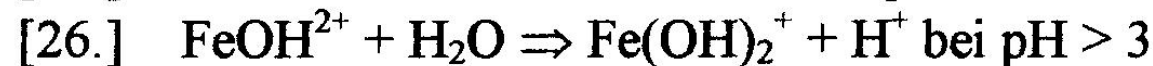
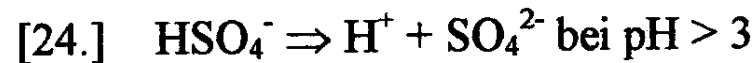
Im aeroben Milieu kommt es zur Oxidation des Sulfidions und damit zur Störung des chemischen Gleichgewichts, so dass weitere Metallsulfide dissoziieren (KELLY & TUOVIEN, 1988). So können trotz geringer Löslichkeiten große Mengen an Buntmetallen freigesetzt werden. Die direkte Sulfidoxidation verläuft sehr langsam, kann jedoch bei Anwesenheit von 3-wertigem Eisen oder 4-wertigem Mangan erheblich beschleunigt werden.



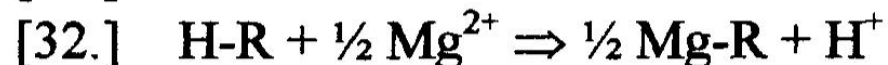
METHA & MURR (1982) beschreiben die Oxidation von Chalkopyrit durch Eisen(III):



Bei den meisten der zuvor genannten Reaktionen werden Protonen freigesetzt. Weitere Möglichkeiten der Protonenfreisetzung beschreiben ABEL, WERNER & LUCKNER (1998):



R: organisches Molekül



Katalyse durch Mikroorganismen (z.B. Thiobacillus ferrooxidans – pH 2,5 bis 3,5)

KELLY & TUOVINEN (1988) beschreiben die durch Bakterien bedingte Oxidation von Buntmetallsulfiden:

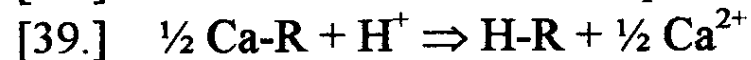
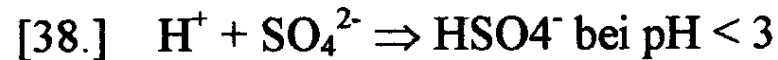


Pufferbereiche

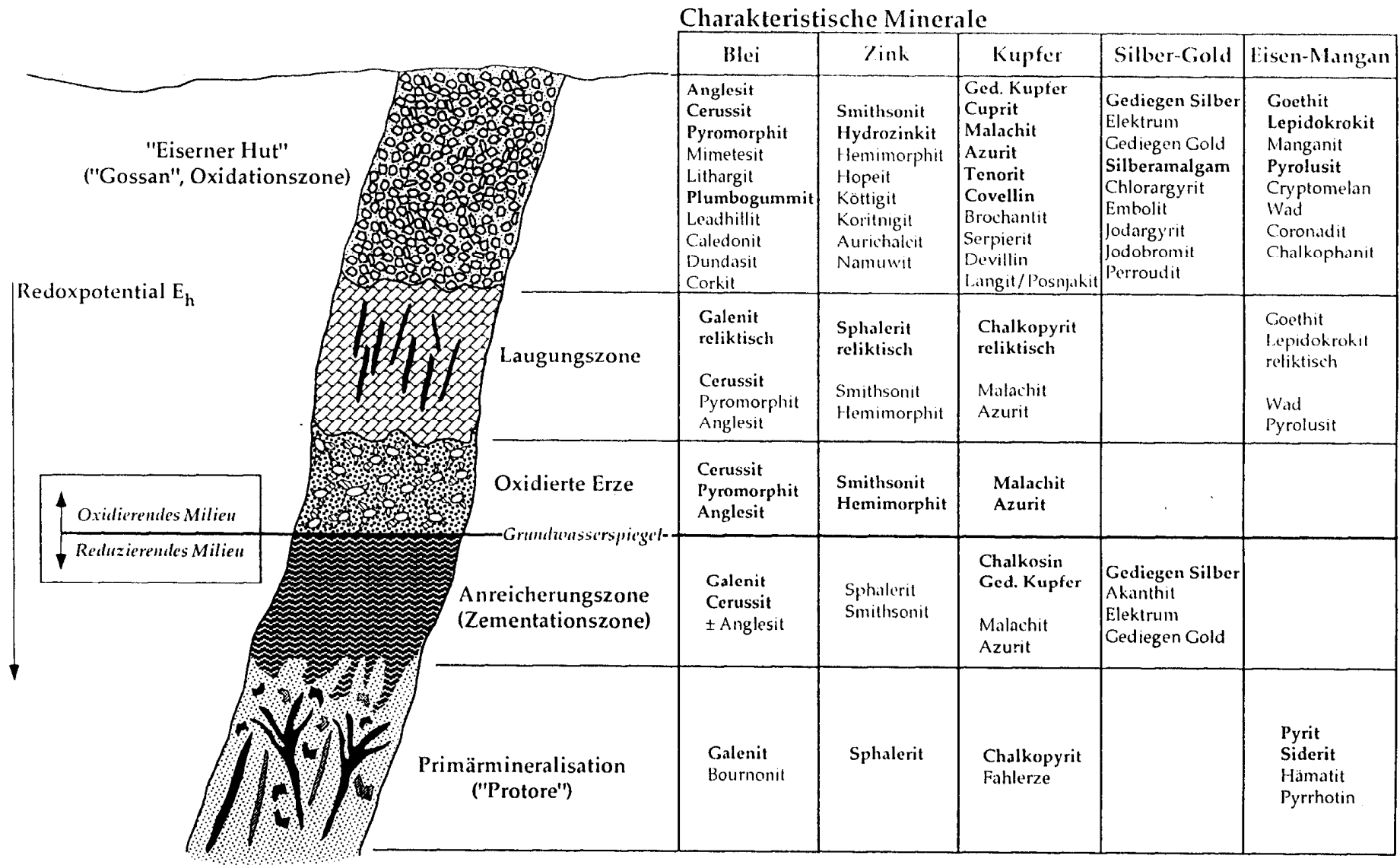
Pufferbereich	pH-Werte	Puffersubstanz	Pufferreaktion
Calciumcarbonat	8,6 - 6,2	Kalk (CaCO_3)	$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \Rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$
Silikat	6,2 - 5,0	primäre Silikate (Feldspäte, Glimmer u. a.)	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{H}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Austauscher	5,0 - 4,2	Silikatische Rest- minerale (sekund. Tonminerale)	$n(\text{AlOOH} + 0,5\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}) \Rightarrow [\text{Al}(\text{OH})_{3,5}^{0,5-}]_n + 0,5n\text{H}_2\text{O}$
Aluminium	4,2 - 3,8	Al-Hydroxide, Tonminerale	$\text{AlOOH} + 3\text{H}^+ \Rightarrow \text{Al}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$
Aluminium -Eisen	4,2 - 3,0	Tonminerale, Al-Hydroxide, Fe-Oxide	s. oben / s. unten
Eisen	< 3,0	Fe-Oxide	$\text{FeOOH} + 3\text{H}^+ \Rightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$

Weitere Pufferreaktionen

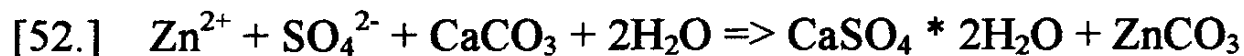
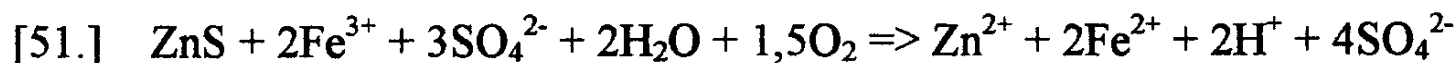
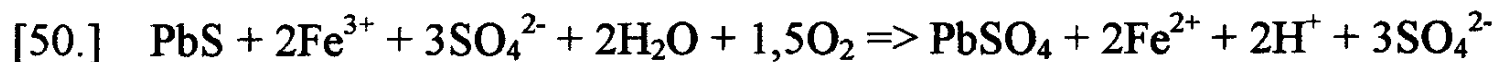
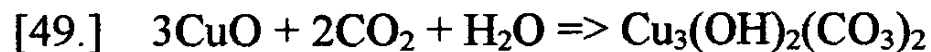
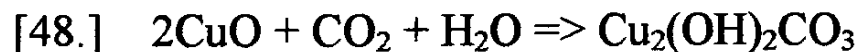
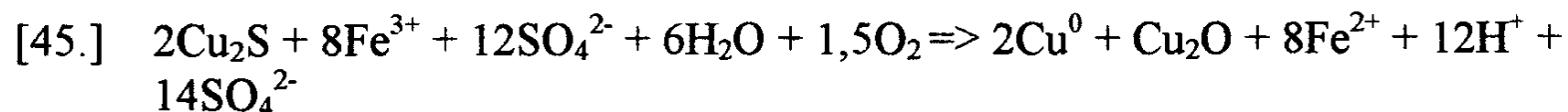
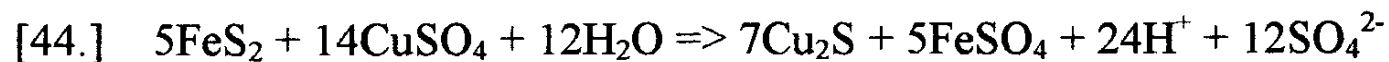
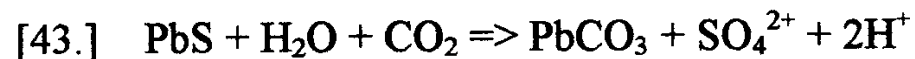
Weitere Pufferreaktionen beschreiben ABEL, WERNER & LUCKNER (1998):

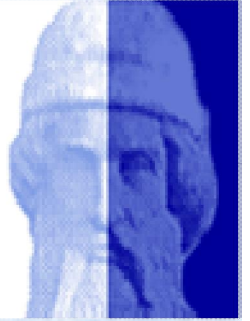


Stockwerksgliederung



Im Bereich des „Eisernen Hutes“ kommt es durch geochemische Reaktionen zur Ausfällung typischer Hutminerale. Beispiele sind (SCHNEIDER, 1996):





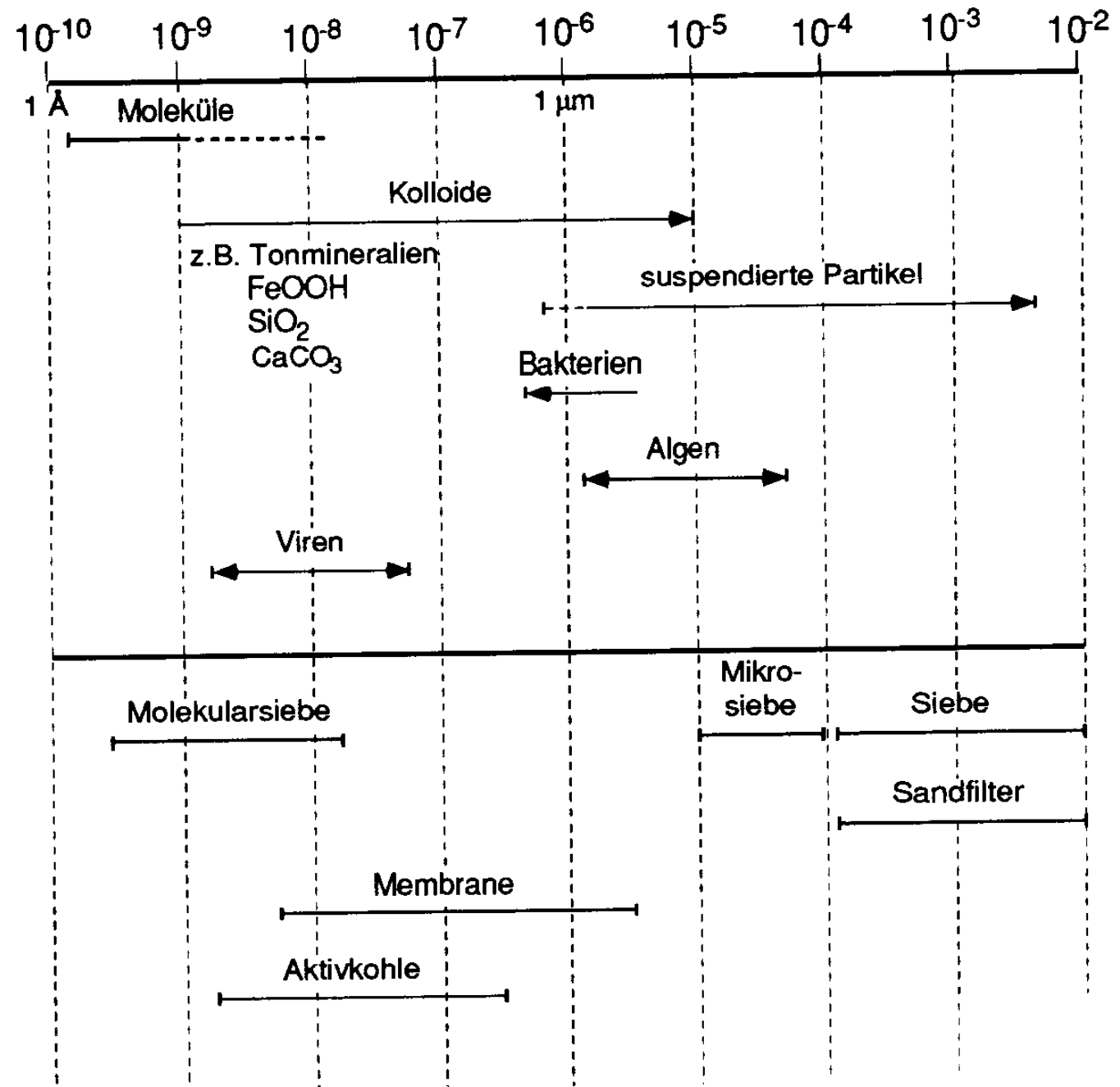
Fällung und Lösung

SS 2009

Prof. Dr.-habil. Georg Wieber

Durchmesser [m]

a) Partikel



Weitere Löslichkeitsprodukte

Tabelle 4.1 Löslichkeitsprodukte (tabellarisch dargestellt als $pK (= -\log K)$ für 25 °C).

Halogenide			Karbonate*		
PbCl ₂	4,8	(d.h. 10 ^{-4,8})	CaCO ₃	8,3	(Calcit)
BaF ₂	5,8		BaCO ₃	8,3	
CuCl	6,7		FeCO ₃	10,7	
AgCl	9,7		MgCO ₃	6,5	
CaF ₂	10,4				
Sulfate			Sulfide		
BaSO ₄	10,0		PbS	27,5	
CaSO ₄	4,5		HgS	53,3	
PbSO ₄	7,8		ZnS	24,7	
SrSO ₄	6,5				
			Phosphate		
			Ca ₅ (PO ₄) ₃ F	60,4	(Fluorapatit)

* Die Löslichkeit ist abhängig von pH und H₂CO₃-Konzentration

Beispiel



$$\text{Löslichkeitsprodukt : } K_{Ba_4SO_4} = a_{Ba^{2+}} * a_{SO_4^{2-}} = 10^{-10} \text{ mol}^2 / \text{l}^2$$

Frage:

Wie hoch sind die Ba- bzw. Sulfat-Konzentrationen in mol/l, mol(eq)/l bzw. mg/l bei Sättigung?

Beispiel



$$\text{Löslichkeitsprodukt : } K_{Ca_4SO_4} = a_{Ca^{2+}} * a_{SO_4^{2-}} = 10^{-4,5} \text{ mol}^2 / \text{l}^2$$

Frage:

Wie hoch sind die Ca- bzw. Sulfat-Konzentrationen in mol/l, mol(eq)/l bzw. mg/l bei Sättigung?

Frage.

Wir mischen nun eine gesättigte BaSO_4 -Lösung ($\text{SI}=0$) mit einer untersättigten CaSO_4 -Lösung zu gleichen Teilen. Das bedeutet, dass nun die selbe Menge Salz im doppelten Volumen Wasser ist!

Wie sind nun die einzelnen Aktivitäten von:

Ba^{2+} : ?

Ca^{2+} : ?

SO_4^{2-} : ?

Lösung:

$$a_{Ba^{2+}} = 0,5 * 10^{-5}$$

$$a_{Ca^{2+}} = 0,5 * 10^{-3}$$

$$a_{SO_4^{2-}} = 0,5 * 10^{-5} + 0,5 * 10^{-3} = 0,505 * 10^{-3}$$

Frage:

Wie sind die Sättigungsverhältnisse gegenüber Baryt und CaSO₄?

Sättigungsverhältnisse Baryt

$$a_{Ba^{2+}} * a_{SO_4^{2-}} = 0,5 * 10^{-5} * 0,505 * 10^{-3} = 2,5 * 10^{-09}$$