

Thomas Kommer

**Verfahrensentwicklung zur
Schwermetallabscheidung durch selektive
Fällung und Selektivionenaustauscher**

Diplomarbeit

BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei www.GRIN.com hochladen
und kostenlos publizieren



Diplomarbeit

Verfahrensentwicklung zur Schwermetallabscheidung durch selektive Fällung und Selektivionenaustauscher

von

Thomas Kommer

Prüfer

Prof. Dr.-Ing. Manfred Raff

Dr.-Ing. Peter Börgardts

Villingen- Schwenningen, den 25.02.2008



Thema der Diplomarbeit:

Verfahrensentwicklung zur Schwermetallabscheidung durch selektive Fällung und Selektivionenaustauscher

Verfasser: Thomas Kommer

1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Manfred Raff

2. Betreuer: Dr.-Ing. Peter Börgardts

Semester: Wintersemester 2007/08

Kurzfassung: Als Prozessmedium benutztes Wasser ist oft so stark belastet, dass es nicht ohne Behandlung eingeleitet werden darf. Das Ziel dieser Diplomarbeit besteht darin, durch Versuche herauszufinden, ob die geforderten extrem niedrigen Abwassergrenzwerte einiger Staaten eingehalten werden können. Dies soll durch eine Kopplung bestimmter Verfahren erreicht werden. Diese Grenzwerte sind mit den aktuellen Verfahren teilweise nicht einzuhalten. Der Schwerpunkt wird dabei auf zwei Verfahren gelegt: Auf der Sulfidfällung sowie auf dem Ionenaustausch mit Selektivaustauschern.

Die Fällung von Schwermetall-Ionen ist ein einfaches Verfahren, das häufig praktiziert wird. Sie wird normalerweise in Form der Hydroxidfällung angewandt. Die Fällung mit Sulfiden hat den Vorteil, dass erheblich geringere Restkonzentrationen möglich sind. Als Ionenaustausch wird der Austausch von Ionen zwischen einer Lösung und den funktionellen Gruppen eines Adsorbens bezeichnet. Diese funktionellen Gruppen befinden sich im so genannten Austauscherharz.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe der Sulfidfällung sowie des Selektivionenaustausches die vorgeschriebenen Grenzwerte bei optimaler Anpassung an die jeweiligen Bedingungen problemlos eingehalten werden können. Beide Verfahren besitzen Vor- und Nachteile. Eine mögliche Eignung der Verfahren muss im Labormaßstab untersucht werden. Dabei hängt vor allem der wirtschaftliche Aspekt stark von der jeweiligen Wasserzusammensetzung ab.

Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit kann festgehalten werden, dass das Verfahren des Ionenaustausches etwa um Faktor zwei günstiger ist. Die Schlammuntersorgungskosten und Chemikalienkosten machen dabei den Großteil der Betriebskosten der Sulfidfällung aus.

Schlüsselwörter:

Grenzwerte, Sulfidfällung, Selektivionenaustausch, Schwermetall-Ionen, Restkonzentration, funktionelle Gruppen, Wirtschaftlichkeit, Betriebskosten



Title of Diploma Thesis:

Process development for separation of heavy metals by the use of selective separation and selective ion exchanger

Author: Thomas Kommer

1. Examiner: Prof. Dr.-Ing. Manfred Raff

2. Examiner: Dr.-Ing. Peter Börgardts

Semester: Wintersemester 2007/08

Abstract: Water used as process medium often is loaded in such a way that it can't be discharged without being treated before. The ambition of this diploma thesis is to ascertain the possibility to keep the extremely low limits from several countries for charging waste water by carrying out experiments. This ought to be achieved through the combination of several processes. By using actual processes these charging limits can't be kept in all parts. The main focus is based on two processes: The separation using sulfides and the ion exchange through selective exchangers.

The separation from heavy metals is an often used and very simple process. Normally it's used in form of separation through hydroxides. The advantage of using the separation with sulfides is that you can reach considerable lower charging concentrations. The replacement from ions between a liquid and the functional groups of an adsorbent is named as ion exchange. These functional groups are located in the so called resin.

The results show that you can keep the required charging limits without problems by using the separation with sulfides and the selective ion exchange in an optimal adaption. Both processes have their advantages and disadvantages. A possible qualification of these processes has to be carried out in experiments. First of all, the financial aspect strongly depends on the consistence of the treated water.

Considering the profitability you can assume that the use of ion exchangers is cheaper about twice times. The costs of the sludge disposal and the chemicals represent the better part of the running costs of the separation with sulfides.

Keywords: charging limits, separation using sulfides, selective ion exchange, heavy metal ions, ending concentration, functional groups, profitability, running costs

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe.

Die verwendeten Literaturquellen sind im Literaturverzeichnis vollständig zitiert.

Villingen- Schwenningen, den 18. September 2009

Adresse: Thomas Kommer, Oberes Ried 40
72336 Balingen

Unterschrift:

Danksagung

Mein großes Anliegen ist es, mich an dieser Stelle recht herzlich bei allen zu bedanken, die in irgend einer Form beim Verlauf meiner Diplomarbeit mitgewirkt haben. Der Firma Eisenmann Anlagenbau GmbH & Co. KG gilt mein besonderer Dank für die Möglichkeit der Durchführung und für die Bereitstellung eines entsprechenden Arbeitsplatzes sowie des notwendigen Equipments.

Einen speziellen Dank möchte ich Frau Susanne Besserer aussprechen, die immer ein offenes Ohr für mich hatte und mir bei praktischen Fragen und Problemen stets mit Rat und Tat im Labor zur Seite stand. Gerade auch im Bereich der Analytik hat sie mir mit großer Geduld Hinweise gegeben und mir dadurch zu Beginn meiner Arbeit viel Mühe erspart.

Meinem Industriebetreuer, Herrn Dr.-Ing. Peter Börgardts, möchte ich einen besonderen Dank für die Bereitstellung von Fachliteratur und für die Hilfe bei der Planung der einzelnen Schritte der Arbeit aussprechen. Vor allem möchte ich mich bei ihm auch für die Unterstützung in theoretischen Fragen und der damit verbundenen Inanspruchnahme von wertvoller Zeit bedanken.

Auch will ich es nicht versäumen, Herrn Ulrich Beutler für die tatkräftige Mithilfe in mechanischen Angelegenheiten zu danken.

Alle Mitarbeitenden der Abteilungen Umwelttechnik und Entwicklung haben mich während der gesamten Zeit freundlich aufgenommen und als Kollegen eingegliedert. Dies wird mir stets in guter Erinnerung bleiben.

Meinem betreuenden Professor, Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Raff, gilt nicht zuletzt meine Anerkennung und mein Dank für die Betreuung im Abschlussemester und die Korrektur dieser Diplomarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Nomenklatur	II
Fachtermini	III
1 Problemstellung	1
1.1 Grenzwerte	1
1.2 Schwermetalle	3
1.3 Komplexbildner	4
2 Grundlagen	5
2.1 Verfahren zur Schwermetallentfernung	5
2.2 Vorbehandlung in der Metall verarbeitenden Industrie	8
3 Schwermetallfällung	11
3.1 Prinzip der Neutralisation	11
3.2 Prinzip der Fällung	12
3.2.1 Löslichkeitsprodukt und optimaler pH-Wert	13
3.2.2 Fällung und Flockung	14
3.3 Hydroxidfällung	16
3.3.1 Chemikalien für die Neutralisation mit der Hydroxidfällung	20
3.3.2 Komplexbildner	22
3.4 Sulfidfällung	22
3.5 Vergleich der Hydroxid- mit der Sulfidfällung	24
4 Ionenaustausch	26
4.1 Prinzip des Ionenaustausches	26
4.2 Grundlagen Ionenaustauscher	27
4.2.1 Harzmatrix	28
4.2.2 Ionenaustauschaktive Gruppen	29
4.2.3 Chelatbildende Kationenaustauscher	30
4.2.4 Dissoziationsverhalten von Iminodiessigsäure-Austauschern	32
4.3 Theorie Ionenaustausch	33
4.3.1 Gleichgewicht	33
4.3.2 Kinetik	34
4.3.3 Durchbruchverhalten	35

4.4	Auswahl des Harzes	37
4.5	Ionenaustauschverfahren.....	37
4.5.1	Einzelne Verfahrensschritte	38
4.5.2	Bauarten von Ionenaustauschkolonnen	39
4.5.3	Schaltungsmöglichkeiten von Austauschern	41
5	Versuchsdurchführung.....	43
5.1	Sulfidfällung.....	43
5.1.1	Metalclean-B	43
5.1.2	Praestol®	45
5.1.3	Versuchsablauf	46
5.2	Ionenaustausch.....	48
5.2.1	Verwendete Harze	48
5.2.1.1	Carbion® H	48
5.2.1.2	LEWATIT® MonoPlus TP 207	49
5.2.2	Vorberechnungen und Versuchsplanung	54
5.2.3	Versuchsaufbau	56
5.2.4	Vorbehandlung.....	58
5.2.5	Wasserzusammensetzung	59
5.3	Analysenverfahren	60
5.3.1	Theorie der Atomemissionsspektrometrie (AES)	60
5.3.2	Vorgehensweise bei der Analyse	60
6	Auswertung und Diskussion Versuche Sulfidfällung	62
6.1	Versuchsreihe 1 bis 3: Parameterbestimmung.....	62
6.2	Versuchsreihe 4 bis 7: Parameteroptimierung	65
6.3	Versuchsreihe 8 bis 10: Komplextiertes Abwasser	69
6.4	Versuchsreihe 11 bis 14: Abwasser aus Vorbehandlungsanlage.....	72
6.5	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	74
7	Auswertung und Diskussion Versuche Ionenaustausch.....	75
7.1	Vorversuche 1 und 2: Harzeignung	75
7.1.1	Berechnung der Harzkapazität am Beispiel von Versuch V1A.....	77
7.1.2	Ergebnisse Versuch V1.....	79
7.1.3	Ergebnisse Versuch V2.....	82
7.2	Vorversuch V3: Optimierung der Parameter	84

7.2.1	Ergebnis Versuch V3A.....	86
7.2.2	Ergebnis Versuch V3B.....	87
7.2.3	Ergebnis Versuch V3C.....	88
7.2.4	Ergebnis Versuch V3D.....	89
7.2.5	Ergebnis Versuch V3E.....	89
7.2.6	Ergebnis Versuch V3A-2.....	91
7.2.7	Ergebnis Versuch V3F.....	92
7.3	Zusammenfassung der Ergebnisse von V1 und V3.....	93
7.4	Vorversuch V4: Praxisnahes Abwasser.....	97
7.5	Versuch 5: Test auf Komplexbildner.....	100
7.6	Versuch V6: Abwasser mit hoher Schwermetall-Konzentration.....	102
7.7	Versuch V7: Abwasser mit geringerer Schwermetall-Konzentration.....	106
7.8	Versuch V8: Komplextiertes Abwasser.....	108
7.9	Versuch V9: Abwasser aus Vorbehandlungsanlage.....	109
7.10	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse.....	111
8	Wirtschaftliche Betrachtung der beiden Verfahren.....	112
8.1	Anlagenbeispiel.....	112
8.1.1	Verfahrensschema Sulfidfällung.....	112
8.1.2	Verfahrensschema Ionenaustausch.....	113
8.2	Kalkulation der Betriebskosten.....	114
8.2.1	Sulfidfällung.....	114
8.2.2	Ionenaustausch.....	117
8.2.3	Kostenvergleich der beiden Verfahren.....	121
9	Fazit und Ausblick.....	123
	Literaturverzeichnis.....	IV
	Verzeichnis der Abbildungen.....	V
	Verzeichnis der Tabellen.....	VI
	Anhang: Messergebnisse Versuche Ionenaustausch.....	VII-XXI

Nomenklatur

Formelzeichen:

A	m^2	Fläche
c	g/l	Konzentration in der Lösung
\bar{c}	g/l	Konzentration in der Harzphase
\bar{c}^*	g/l	Gleichgewichtskonzentration in der Harzphase
D_{eff}	m^2/s	effektiver Diffusionskoeffizient
h	m	Höhe
K	mol/l	Dissoziationskonstante
K_L	l/mg	Langmuir-Konstante
L	mol/l	Löslichkeitsprodukt
M	g/mol	molare Masse
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/h	Fracht
n	kmol	Stoffmenge
\dot{n}	$g/(m^2s)$	normierter Stoffstrom
P	mol^2/l^2	Ionenprodukt
q	g/l	Harzbeladung
Q	g/l_{Harz}	Kapazität
r	m	Radius
t	s	Zeit
v	m/h	Geschwindigkeit
V	m^3	Volumen
\dot{V}	m^3/h	Volumenstrom
z	m	Axialkoordinate im Filter

griechische Symbole:

α	-	Trennfaktor
β_{eff}	m/s	effektiver Stoffübergangskoeffizient
δ	m	Filmdicke des Nernst-Films

Indizes:

DS	Durchsatz
eff	effektiv
erw	erwartet
GG	Gleichgewicht
H	Harz
i, j	Komponente i, j
K	Kolonne
mas	Masse
max	maximaler Wert
P	Partikel
spez	spezifisch
vol	Volumen
W	Wasser
0	Nullpunkt

Abkürzungen:

BV	Bettvolumen
Ca(OH) ₂	Calciumhydroxid (Kalkmilch)
DBK	Durchbruchskurve
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
FHM	Flockungshilfsmittel
HCl	Salzsäure
MTZ	Mass Transfer Zone
NaOH	Natronlauge
NTA	Nitrilotriessigsäure
OH	Hydroxid
SM	Schwermetall
SM(OH) ₂	Schwermetallhydroxid

Fachtermini

- Affinität:** Triebkraft einer chemischen Reaktion. Das Bestreben von Ionen, Atomen oder Atomgruppen, eine Bindung einzugehen
- Basizität:** Maß für die Fähigkeit einer chemischen Verbindung, Protonen aufzunehmen bzw. die Basenstärke einer Lösung (Hydroxidionen-Konzentration)
- Bettvolumen:** Relative Maßeinheit bezogen auf das Volumen des eingesetzten Ionenaustauschers
- Dissoziation:** Angeregter oder selbstständig ablaufender Vorgang der Zerlegung eines Moleküls in zwei oder mehrere einfachere Moleküle, Atome oder Ionen
- Koagulation:** Zusammenklumpen und Ausfällen von gelösten oder suspendierten Teilchen
- Konditionierung:** Gezielte Überführung des Ionenaustauschers in eine definierte chemische Zustandsform im Anschluss an die Regeneration
- Kolloid:** Kleine Festkörper, die innerhalb eines Mediums fein verteilt vorliegen. Die Teilchen dieser so genannten kolloid-dispersen Phase weisen in der Regel Größenordnungen von 1 bis 1000 nm auf
- Ligand:** Atom oder Molekül, welches über eine Bindung an ein zentrales Metall-Ion gebunden ist. Liganden wirken als Lewis-Basen (mindestens ein freies Elektronenpaar)
- Regeneration:** Maßnahme um Ionenaustauscher in einen für die Beladung geeigneten Zustand zu bringen
- Selektivität:** Unterschiedliche Präferenz eines Austauschers für unterschiedliche Ionen, die auf verschiedenartige Wechselwirkungen zwischen dem Harz und den Ionen zurückzuführen ist

1 Problemstellung

Das Ziel dieser Diplomarbeit besteht darin, durch Laborversuche herauszufinden, ob die neuerdings geforderten extrem niedrigen Abwassergrenzwerte einiger osteuropäischer Staaten zur Einleitung von Abwässern durch eine Kopplung bestimmter Behandlungsverfahren eingehalten werden können. Dabei ist zu erwähnen, dass der Schwerpunkt auf zwei mögliche Verfahren gelegt wurde: Sulfidfällung sowie der Selektionenaustausch (siehe Kap. 2.1).

Weiterhin soll untersucht werden, welches Verfahren wirtschaftlich am sinnvollsten eingesetzt werden kann. Daher wird die Arbeit mit einer entsprechenden Kostenrechnung (siehe Kapitel 8) abgeschlossen.

In diesem ersten Kapitel soll nun zuerst auf die Problematik der vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Grenzwerte bei der Einleitung von Abwässern eingegangen werden. Daneben soll ein Überblick über die zu entfernenden Schwermetalle gegeben werden.

1.1 Grenzwerte

Das als Prozess- oder Arbeitsmedium benutzte Wasser ist in seiner Zusammensetzung oft so verändert, dass es nicht ohne entsprechende Behandlung in den Naturkreislauf zurück gelangen darf. Die in gelöster Form oder als ungelöste Schwebstoffe vorhandenen Fremdkörper müssen je nach Problematik entfernt oder unschädlich gemacht werden.

Die wichtigsten gesetzlichen Grundlagen in der Bundesrepublik Deutschland für den Schutz von Grund- und Oberflächengewässern bilden das Wasserhaushaltsgesetz (WHG), die ihm zugeordnete Abwasserverordnung (AbwV) mit branchenspezifischen Anhängen sowie das Abwasserabgabengesetz (AbwAG).

Das Wasserhaushaltsgesetz wurde nach der 1996 erfolgten grundlegenden Überarbeitung und mehreren punktuellen Änderungen bzw. Ergänzungen 2002 nochmals neu gefasst. Diese Neufassung dient im Wesentlichen der Umsetzung einer EU-Richtlinie zur Schaffung eines gemeinsamen Ordnungsrahmens für Maßnahmen im Bereich der Wasserpolitik.

Gemäß des WHG sind Abwässer, die gefährliche Stoffe enthalten, vor der Ableitung nach dem Stand der Technik zu reinigen. Dafür werden die gefährlichen Stoffe in Wassergefährdungsklassen (WGK) eingeteilt: Lösemittelhaltige Lacke entsprechen z.B. WGK 2 (wassergefährdend), wasserbasierende Lacke WGK 1 (schwach wassergefährdend).

Ergänzt wird das WHG durch die Abwasserverordnung mit Verwaltungsvorschriften für 57 Branchen, in denen die Grenzwerte für bestimmte Stoffe und Parameter festgelegt sind. Dabei ist der Anhang 40 (Metallbearbeitung/Metallverarbeitung) für einen besonders breiten Anwenderkreis von Interesse. Er umfasst 12 verschiedene Herkunftsbereiche.

Die Problematik der Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte besteht nun konkret darin, dass einige osteuropäische Staaten seit ein paar Jahren sehr niedrige Grenzwerte vorschreiben, die teilweise um einen beträchtlichen Faktor unter den Werten aus dem Anhang 40 liegen. Diese Grenzwerte sind daher teilweise mit den momentan vorhandenen Verfahren nicht einzuhalten.

In Tabelle 1-1 sind Grenzwerte für die Einleitung einiger Schwermetalle des Anhang 40 mit den Grenzwerten einiger osteuropäischer Staaten zusammengestellt.

Tabelle 1-1: Vergleich der Grenzwerte einiger Schwermetalle des Anhang 40 mit den Grenzwerten bestimmter osteuropäischer Staaten (starke Abweichungen sind fett) [nach 1,2]

Element	Einheit	Anhang 40 Direkt- einleitung in Vorfluter	Tschechische Republik Einleitung in Vorfluter	Polen Einleitung in Vorfluter	Russland Einleitung in Vorfluter
Aluminium Al ²⁺	mg/l	3	2	2	1,12
Blei Pb ²⁺	mg/l	0,5	0,5	0,1	0,35
Cadmium Cd ²⁺	mg/l	0,2	0,1	0,1	0,05
Eisen Fe ²⁺	mg/l	3	2	2	2
Kupfer Cu ²⁺	mg/l	0,5	0,5	0,2	0,1
Nickel Ni ²⁺	mg/l	0,5	0,5	1	0,1
Zink Zn ²⁺	mg/l	2	2	1	0,05
Zinn Sn ²⁺	mg/l	2	2	1	0,1

Da die russischen Grenzwerte die niedrigsten sind, werden diese in der weiteren Arbeit als Richtgröße definiert.

Zu den Tabellenwerten ist noch zu sagen, dass sie von Region zu Region abweichen können und diese somit nur Durchschnittswerte aus konkreten Anwendungsfällen darstellen. Außerdem können sich die Werte jederzeit durch neue Vorschriften ändern.

Es ist zudem erwähnenswert, dass die jeweiligen Gesetzgeber oft willkürlich und ohne technisches Verständnis vorgehen, somit fehlt auch das in Betracht ziehen der technischen Realisierbarkeit beim Festlegen der jeweiligen Grenzwerte. Diese Willkür ist in der obigen Tabelle am Beispiel von Russland besonders gut nachvollziehbar.

[1]

1.2 Schwermetalle

Mit der Bezeichnung Schwermetalle wird willkürlich eine Gruppe von Metallen zusammengefasst. Zu den Schwermetallen werden üblicherweise unter anderem die Edelmetalle sowie Bismut, Eisen, Kupfer, Blei, Zink, Zinn, Nickel, Cadmium, Chrom, Quecksilber und Uran gerechnet.

Schwermetalle werden in vielen Bereichen, zumeist aber in der Metallveredelung und in der Oberflächenbehandlung verwendet. Dadurch erhalten die ausgewählten Materialien spezielle Eigenschaften. In Tabelle 1-2 soll ein Überblick über die häufigsten Verbindungen einiger in unserem Anwendungsfall wichtiger Schwermetalle in wässriger Lösung und dem jeweiligen Milieu gegeben werden.

Tabelle 1-2: Auftretungsformen der jeweiligen Metalle in entsprechendem Milieu [nach 3]

Metall	Ionenform	saures Milieu	alkalisches Milieu
Blei	Pb^{2+}	$Pb(H_2O)_4^{2+}$	$PbCO_3$
		$PbSO_4$	$PbHCO_3^+$
			$PbOH^+$
Cadmium	Cd^{2+}	$CdSO_4$	$CdCl^+$
		$CdCl^-$	$CdHCO_3$
Kupfer	Cu^{2+}	$Cu(H_2O)_6^{2+}$	$CuCO_3$
			$Cu(OH)_2$
Nickel	Ni^{2+}	$NiSO_4$	$NiCO_3$
		$NiHCO_3^+$	
Zink	Zn^{2+}	$ZnSO_4$	$Zn(OH)_2$
		$ZnHPO_4$	$ZnCO_3$

Durch den sehr langsamen Abbau von Schwermetallen in der Natur sind Verunreinigungen auch noch nach Jahrzehnten feststellbar. Somit stellt das Eindringen von Schwermetallen ins Grundwasser ein großes Problem dar.

Manche Schwermetalle sind in kleinen Mengen lebensnotwendig für den Menschen, sie werden dann als Spurenelemente bezeichnet (z.B. Eisen). Viele Schwermetalle sind jedoch für den menschlichen Organismus gesundheitsschädlich oder wirken toxisch, da sie nicht abgebaut werden können und sich somit im Laufe der Zeit immer mehr im Körper anreichern.

[4]

1.3 Komplexbildner

In der weiteren Ausführung tritt häufig der Begriff der Komplexbildner auf, deshalb soll hier kurz auf dieses Thema eingegangen werden. Ein Komplex ist eine Struktur, bei der ein Zentralatom (meist ein Metall-Ion), das in seiner Elektronenkonfiguration Lücken aufweist, von einem oder mehreren Molekülen oder Ionen (den Liganden) umgeben ist, die jeweils mindestens ein freies Elektronenpaar für die Bindung zur Verfügung stellen. Dieser Bindungstyp unterscheidet sich von den anderen Formen der chemischen Bindung (kovalente Bindung, Ionenbindung, Metallbindung). In Abbildung 1-1 ist beispielhaft ein oktaedrischer (Koordinationszahl 6) Cobaltkomplex dargestellt:

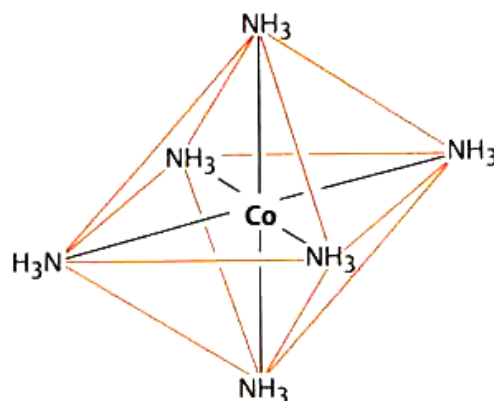


Abbildung 1-1: Oktaedrischer $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ -Komplex [3]

In der Metall verarbeitenden Industrie ist hauptsächlich mit folgenden Komplexbildnern zu rechnen:

Cyanide, Polyphosphate, Ammoniak, Nitritotriessigsäure (NTA), Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA; siehe Kap. 4.2.3) und Quadrol. [2, 3]