

Versuch 2 – Flockung

1. Einleitung [1 - 3]

In der Wasseraufbereitung wird die Flockung vor allem zur Entfernung von Trübstoffen eingesetzt. Diese Aufgabe ist nicht nur aus ästhetischen Gründen geboten, sondern man entfernt mit Hilfe der Flockung auch die an Schwebstoffen haftenden Verunreinigungen (organische Stoffe, Spurenmetalle), die mikrobiologischen Verunreinigungen (Bakterien, Viren, Protozoen) und in Verbindung mit Fällungsprozessen, gelöste organische und anorganische Wasserinhaltsstoffe.

In Oberflächenwässern sind praktisch immer Trüb- und Feststoffe enthalten, die über entsprechende Partikelabscheideverfahren weitgehend so abgetrennt werden müssen, dass die geforderte Trinkwasserqualität erreicht wird. Kolloidale Feststoffe werden in der Verfahrensstufe Flockung mittels eines chemischen Prozesses zu abtrennbaren Flocken aggregiert. Die Feststoffabtrennung erfolgt typischerweise mit den Techniken der Sedimentation, Filtration oder Flotation. In Abb. 1 sind die typischen Prozessstufen zur Aufbereitung trübstoffhaltiger Oberflächenwässer und Grundwässer dargestellt.

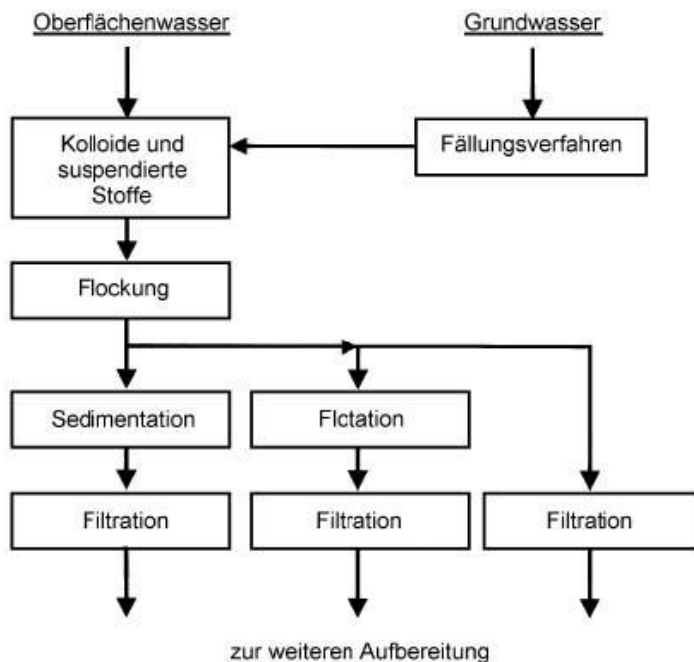


Abb. 1: Schema zur Anordnung der Verfahrensstufen bei der Feststoffentfernung

Bei geringen Feststoffgehalten, wie bei See- oder Talsperrenwasser, reicht die alleinige Filtration (als Schnell- oder Langsamfiltration) mit oder ohne vorherige Flockung (auch „direkte Filtration“, „Flocken- oder Flockungsfiltration“) in der Regel aus. Bei höheren Feststoffgehalten wird häufig die Sedimentation als Grobreinigung eingefügt, während die Flotation nicht sehr verbreitet ist, aber bei spezifisch leichten Trübstoffen und Flocken (Algen, Huminstoffen) Vorteile aufweisen kann.

Betrachtet man die Größenverhältnisse von Wasserinhaltsstoffen, dann muss man von einem Bereich von ca. 8 Größenordnungen ausgehen, der bei $0,1 \text{ nm}$ beginnt und bei 10 mm endet (Abb. 2). Bei den partikulären Stoffen wird zwischen den **kolloidalen** ($1 \text{ nm} \leq d_p \leq 1 \mu\text{m}$) und **suspendierten** ($1 \mu\text{m} \leq d_p \leq 1 \text{ mm}$) Partikeln unterschieden.

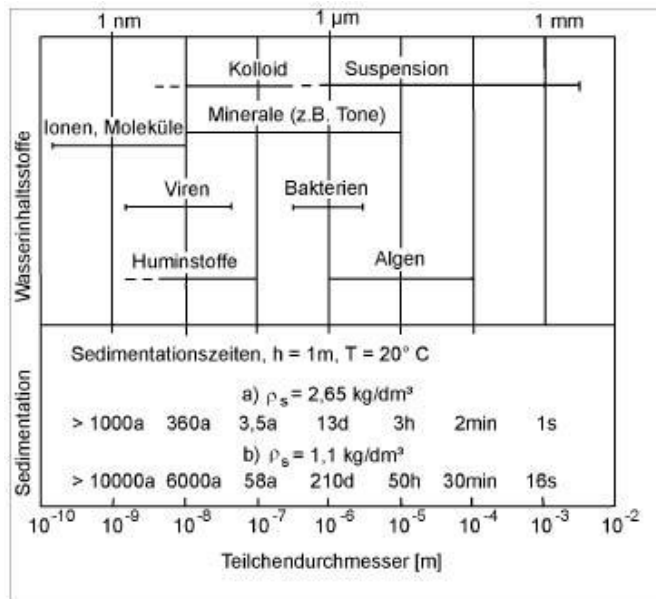


Abb. 2: Einteilung der Wasserinhaltsstoffe nach ihrer Größe [4]

Die Sedimentationszeiten für den Weg von 1 m bei zwei Feststoffdichten sind ebenfalls in Abb. 2 dargestellt. Teilchen mit Durchmessern $d_p < 30 \mu\text{m}$ lassen sich unter der Maßgabe technischer sinnvoller Aufenthaltszeiten nicht absetzen.

Das Ziel der Flockung besteht darin unerwünschte Wasserinhaltsstoffe, die stabil im Wasser verteilt sind, durch den Einsatz von Chemikalien, so weitgehend wie möglich, zu größeren Aggregaten zusammenzulagern. Dadurch wird die Entfernung von:

- kolloidalen und suspendierten Verunreinigungen (Trübungen),
- gelösten organischen Stoffen (DOC)
- anorganischen Spurenmetallen und Phosphat sowie
- zugesetzten Flockungsmitteln bei Minimierung von Aufsalzung und Schlammanfall

ermöglicht.

Mit dem **Trübungswert** wird das Phänomen der Trübung quantitativ erfasst. Das Ziel der Trübungsmessung ist es, Aussagen über den Gehalt an streuenden Partikeln zu erhalten (Feststoffkonzentration). Dies kann durch zwei grundsätzlich verschiedene photometrische Messmethoden erreicht werden: die Bestimmung des Lichtverlusts des transmittierten Strahls (Streukoeffizient) und die Messung der Intensität des seitlichen Streulichts (Streuintensität). Der Streukoeffizient entspricht der Gesamtheit des Streulichts, das dem einfallenden Strahl entzogen wurde, während die Streuintensität angibt, wie viel Streulicht unter einem bestimmten Winkel abgelenkt wird. Die Messung der Streuintensität gestattet die Erfassung kleiner Konzentrationen, während die Transmissionsmessung den hohen Konzentrationen vorbehalten ist. Zur praktischen Interpretation des Trübungswerts werden die Trübungsmessgeräte mit einer Standardsuspension [meist Formazin ($\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_2$)] kalibriert. Die Anzeige erfolgt somit nicht in Form der gemessenen Lichtintensität, sondern als Konzentration der Kalibriersuspension. Bei der Messung einer beliebigen Suspension bedeutet also die Anzeige, dass die betreffende Flüssigkeit die gleiche Lichtstreuung verursacht wie die Standardsuspension der angezeigten Konzentration. Der **FNU-Wert** („Formazine Nephelometric Units“) stellt die gebräuchlichste Einheit in der Wasseraufbereitung zur quantitativen

Beschreibung des Trübungswertes dar. Er wird gemäß der Norm *ISO 7027* bestimmt. Folgende wissenschaftliche und technische Begriffe werden in Verbindung mit Flockungs-verfahren verwendet:

Koagulation

Flockungsmechanismus, bei dem die elektrischen Abstoßungskräfte zwischen den Teilchen aufgehoben werden und eine Zusammenlagerung stattfinden kann.

Flocculation

Flockungsmechanismus, der auf die Verknüpfung von Teilchen durch langkettige Moleküle (Polymere) beruht.

Entstabilisierung

Vorgang, der feinverteilte, stabil dispergierte Feststoffe erst flockungsfähig macht.

Flockungsmittel

Sind primär für die Entstabilisierung verantwortlich (Aluminium- und Eisen(III)-salze).

Flockungshilfsmittel

Dienen der verbesserten Flockenbildung (höhermolekulare organische Stoffe).

Fällung

Ausscheidung unlöslicher Stoffe aus einer Lösung, wobei kristalline oder amorphe, gelartige und voluminöse Produkte entstehen.

Mitfällung

Flockungsmechanismus, bei dem voluminöse Oxidhydrate des Aluminium- und Eisen(III)-ions ausfallen, die disperse Feststoffe einschließen und gelöste Stoffe adsorbieren.

1.1 Grundlagen der Flockung

Aufgrund der van-der-Waals-Kräfte haben im Wasser dispergierte Partikel an sich das Bestreben, sich zusammenzulagern. Diesem Bestreben wirkt häufig eine elektrostatische Abstoßung entgegen, da kolloidalen Stoffen oft eine negative elektrische Ladung der Grenzfläche zum Wasser gemeinsam ist. Diesen elektrostatischen Kräften, die eine Oberflächenladung von Trübstoffen verursachen, können folgende vier Mechanismen zugrunde liegen:

- Dissoziation/Protonierung an der Grenzfläche Oxid/Wasser
- Ionenadsorption
- Ionensubstitution im Gitter bei Tonmineralen
- Adsorption grenzflächenaktiver, ionischer Stoffe (Tenside, Huminstoffe, Alginat, etc.)

In Oberflächenwässern liegen immer negativ geladene Teilchen vor, deren Oberflächenladung vom umgebenden Milieu durch eine Anreicherung positiver Ionen in Oberflächennähe ausgeglichen wird. Als Folge der Brownschen Molekularbewegung werden die Gegenionen nicht an der Oberfläche festgelegt, sondern halten sich, statistisch verteilt, in der Nähe des Kolloids auf. Hieraus resultiert die Ausbildung der so genannten diffusen elektrischen Doppelschicht. Die durch die elektrostatische Abstoßung „erscheinende“ bzw. messbare potentielle Energie wird als *Zetapotential* bezeichnet.

Neben den elektrostatischen Abstoßungskräften gibt es anziehende Kräfte zwischen den Partikeln. Diese van-der-Waals-Kräfte beruhen auf nicht voll

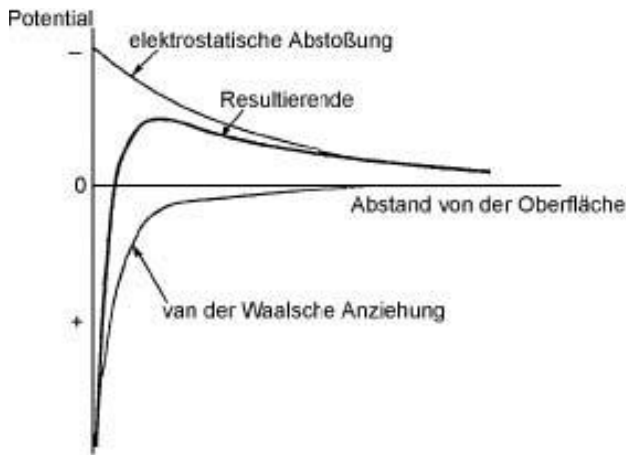


Abb. 3: Darstellung der Kolloidoberflächen-Kräfte

kompenzierten Ladungs- und Potentialeffekten oder ungleich verteilten Ladungen im Mikraufbau der Materie. In Abb. 3 ist die Anziehung und Abstoßung zwischen gleichgeladenen Teilchen schematisch dargestellt. In großer Entfernung von der Partikeloberfläche überwiegt die, vorwiegend durch elektrostatische Wechselwirkungen verursachte, Abstoßung. Wenn Partikel koagulieren, müssen sie in den Bereich dominierender van-der-Waals-Kraft gelangen. Ziel der Entstabilisierung ist es, die Abstoßungskräfte so zu verringern, dass sie in den Bereich der dominierenden Anziehungskraft gelangen.

Die wichtigsten anorganischen Flockungsmittel in der Trinkwasseraufbereitung sind die Salze des dreiwertigen Eisen- und Aluminiumions, die in verschiedenen Formen erhältlich sind. Die entsprechenden Metallkationen lagern wegen ihrer hohen Ladung sechs Wassermoleküle unter Bildung von Hexaquo-Komplexen an. Diese Komplexe sind nur in einem stark sauren Medium stabil (*Al*: $pH = 3-4$, *Fe*: $pH = 1-2$). Mit steigenden pH-Werten geben die Hexaquo-komplexe stufenweise Protonen ab, bis bei mittleren pH-Werten (*Al* $pH = 6$, *Fe* $pH = 5$) die unlöslichen Neutralverbindungen $Me(OH)_3$ als voluminöse Niederschläge in Flockenform ausfallen. Die Löslichkeit der Hydroxide ist so gering, dass die Metalle im pH-Wert-Optimum weitgehend entfernt werden können. Mit Wiederauflösungen ist erst bei höheren pH-Werten (*Al*: $pH = 7,5$, *Fe*: $pH = 10$) zu rechnen [5].

Bei den organischen Flockungsmitteln handelt es sich immer um geradkettige, wasserlösliche Polymere mit Molmassen im Bereich von $10^4 - 10^7$ g/mol [6]. Handelsübliche Produkte besitzen einen Moleküldurchmesser in Lösung von ca. $0,1 - 1 \mu m$. Synthetische Polymere werden in der Wasseraufbereitung weitgehend als Flockungshilfsmittel eingesetzt. Entsprechend ihrer Ladung unterscheidet man nichtionische, kationische und anionische Polymere. Neutrale Polyacrylamide sowie die anionischen Polyacrylsäuren stellen die wichtigsten Produktklassen, die in der Trinkwasseraufbereitung zugelassen sind, dar. Daneben werden vor allem im Trinkwasserbereich reine oder abgewandelte Naturprodukte, wie Stärke oder Alginate, eingesetzt. Es können vier Flockungsmechanismen unterschieden werden:

I. Entstabilisierung durch Elektrolyte (Gegenionen):

Die Verringerung der elektrostatischen Abstoßungskräfte wird durch eine Kompression der diffusen

Doppelschicht ermöglicht. Je höher die Konzentration und die Ladung der Gegenionen ist, desto kleiner wird die Reichweite der elektrostatischen Abstoßung. Ab einer bestimmten Konzentration des Elektrolyten entfällt die Energiebarriere. Die Partikel können sich soweit nähern, dass die Flockung eintritt.

II. Adsorption-Ladungsneutralisation

Die Adsorption positiver Ionen bewirkt eine Veränderung der Oberflächenladung. Diese Form der Koagulation wird vor allem durch die stark positiv geladenen Hydroxokomplexe der mehrwertigen Metallionen (Fe, Al) erreicht. Infolge eines Umladungseffektes durch Überdosierung ist eine Restabilisierung möglich.

III. Flocculation (Adsorption-Brückenbildung)

Durch Brückenbildung zwischen den Partikeln wird eine Entstabilisierung erreicht. Sehr langkettige Polymermoleküle adsorbieren auf zwei Partikeloberflächen, wodurch diese miteinander vernetzt werden. Es gibt eine optimale Polymerkonzentration, unterhalb der die Vernetzung mangels Polymermolekülen, oberhalb der sie mangels freier Adsorptionsplätze an den Teilchen unvollständig bleibt.

IV. Mitfällung (Einschlussflockung)

Die bei mittleren pH-Werten ausfallenden Eisen- bzw. Aluminiumhydroxide schließen andere disperse Feststoffe in die entstehenden Flocken ein. Diese Art der Flockung ermöglicht die Entfernung aller Arten von Kolloiden, weil deren Eigenschaften keinen Einfluss auf die Flockung haben. Eine Restabilisierung durch Überdosierung kann nicht auftreten.

Bei schneller Einmischung der Flockungsmittel ist die Entstabilisierung der Kolloide und Suspensionen ein schneller Vorgang. Die Geschwindigkeit der Flockenbildung wird in entstabilisierten Dispersionen durch den langsameren Partikeltransport bestimmt (Kollision). Während die Diffusion im Bereich kolloidaler Partikel $d_p < 1 \mu\text{m}$ dominiert, gewinnt die Konvektion bei größeren Partikeln immer mehr an Bedeutung. Ein größerer Energieeintrag bewirkt eine höhere Flockenbildungsgeschwindigkeit. Die maximal erreichbare Flockengröße nimmt jedoch mit steigendem Energieeintrag wegen der auftretenden Scherkräfte, die auf die Flocken einwirken (Flockenzerstörung), ab. In der Praxis wird diesem Effekt durch das Betreiben mehrstufiger Flockungsreaktoren mit fallenden Schergradienten (Energieeintrag) Rechnung getragen.

1.2 Verfahrenstechnik der Flockung

Die Tab. 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Stufen des Flockungsprozesses vor der Feststoffabtrennung.

Tab. 1: Verfahrenstechnische Stufen des Flockungsprozesses

Verfahrensschritt	Aufgabe
Dosierung und Mischung	gleichmäßige Verteilung der Flockungschemikalien
Entstabilisierung	Entstabilisierung von Trübstoffen und Kolloiden
Aggregation zu Mikrofloccen	schnelle Aggregation zu Mikrofloccen bei hohem Schergradienten
Aggregation zu Makrofloccen	Aggregation zu abtrennbaren Floccen

Im ersten Schritt wird der relativ geringe Volumenstrom einer Dosierlösung im Rohwasserstrom verteilt. Eine gute und schnelle Einmischung ist von wesentlicher Bedeutung für den gesamten Flockungserfolg [7]. Die Entstabilisierung verläuft schnell und wird in einem Mischungsreaktor mit hoher Turbulenz durchgeführt. Die Grundtypen dieser Reaktoren sind Rohre, Rührkammern und Turbulenzonen.

Die wichtigsten Reaktortypen zur Floccenbildung sind in Tab. 2 aufgeführt. Ziel dieses Arbeitsschritts ist es, in kurzer Zeit mit geringem Aufwand gut abscheidbare Floccen zu produzieren.

Tab. 2: Merkmale verschiedener Reaktortypen zur Floccenbildung

Grundtyp	Details
Rührbecken	<ul style="list-style-type: none"> • Verweilzeiten von 2 – 40 min • Schergefälle von 10 – 100 s⁻¹ • zwei und mehr Becken in Reihe mit fallendem Schergefälle • Anpassung an Durchsatz und Rohwasser
statische Systeme	<ul style="list-style-type: none"> • durchströmte Kammern mit hydraulisch wirksamen Einbauten • durchflussabhängige Systeme • Fließgeschwindigkeit 0,1 – 0,2 m · s⁻¹ • einfacher Bau
Rohre	<ul style="list-style-type: none"> • schnelle Floccenbildung bei Rohrlängen von mehr als 20 m • Begrenzung des Durchsatzes nach oben und unten
Schlamm-schwebeschicht	<ul style="list-style-type: none"> • Kombination mit Sedimentation • aufwärts strömendes Wasser • Floccenbildung in der Schwebeschicht • lange Aufenthaltszeiten

Schlammkontaktverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Rückführung von abgetrennten Flocken in die Mikro-flockung

Am Ende der Flockungsverfahren werden die entstandenen Makroflocken vom Wasser mit Hilfe der Verfahren Sedimentation und Filtration abgetrennt. Prinzipiell werden der Sedimentation, zum Erreichen der Trinkwasserqualität, noch Schnellfilter nachgeschaltet. Die Filtration ist als direkter Abtrennschritt auf die Rohwässer (Wasser aus Seen und Talsperren) beschränkt, die nach der Flockenbildung relativ wenige Schwebstoffe aufweisen.

Die Sedimentationsverfahren sind die verbreitetste Form der Flockenabtrennung und lassen sich nach ihren Verfahrensprinzipien in folgende Gruppen einteilen:

- horizontal durchströmte Absetzbecken,
- Verfahren mit Schlammrückführung,
- aufwärts durchströmte Absetzbecken mit Schlamm-schwebeschichten,
- aufwärts durchströmte Absetzbecken mit besonderen Einbauten.

Die klassische Flockungs- und Sedimentationsanlage ist zusammen mit den wichtigsten Dimensionierungsparametern in Abb. 4 dargestellt.

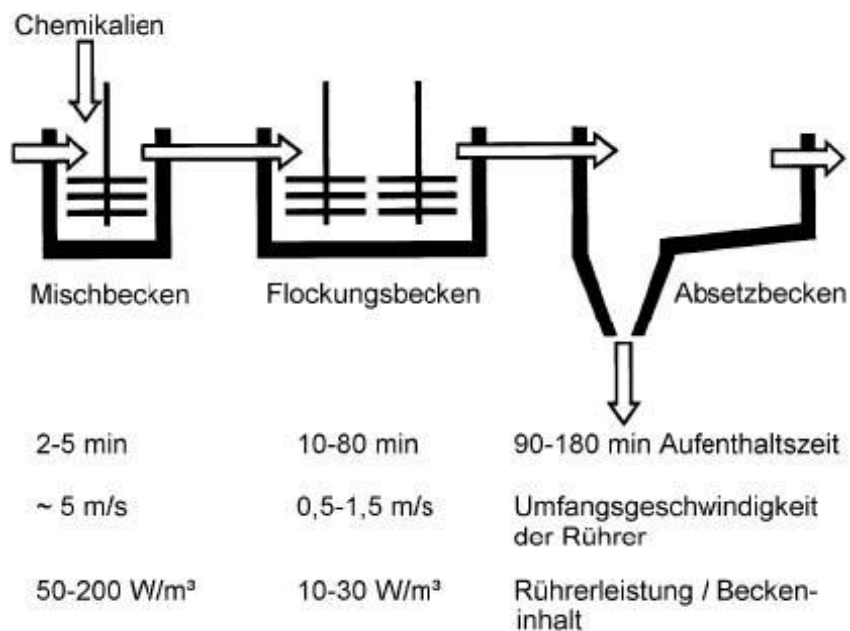


Abb. 4: klassische Flockungs- und Sedimentationsanlage mit Dimensionierungsdaten

Moderne Flockungs- und Sedimentationsverfahren werden in Turbo-Circulatoren, Pulsatoren und

Reaktivatoren unter Anwendung von Schlammschwebeschichtenverfahren mit innerer Schlammrückführung durchgeführt.

1.3 Flockung – Wasserqualität und Rückstände

Eine effiziente Flockung mit Flockenabtrennung ist die Voraussetzung zur Minimierung der Trübung und des Partikelgehaltes eines Wassers. Die mikrobiologischen Belastungen (Bakterien, Viren, Protozoen) lassen sich in einer Flockungsstufe oft gut einbinden bzw. abtrennen. Die Wirkungsgrade liegen so hoch, dass die Restbelastung auf unter 1 % sinkt. Die Wirksamkeit und Sicherheit der Desinfektionsstufe wird dadurch (Protozoenentfernung!!) erheblich verbessert.

Von den **gelösten, anorganischen Wasserinhaltsstoffen** wird Phosphat sehr gut entfernt, wenn die Metalldosierung ausreicht. Es werden Rest-Phosphor-Konzentrationen von ca. 10 µg/L erreicht. Die Phosphatfällung wird in der Abwasserreinigung zur Bekämpfung der Gewässereutrophierung eingesetzt. Eine Reihe weiterer anorganischer Spurenstoffe, insbesondere Schwermetalle und Radionuklide, sind mit einer Flockung recht gut entfernbare.

Hier ist ein besonderes Augenmerk auf die Al-Salze zu richten, weil der pH-Wert-Bereich einer optimalen Fällung des Al-Hydroxids recht eng ist und die Löslichkeit von Al(OH)₃ deutlich höher ist als die von Fe(OH)₃. Mit einer optimierten Flockung und Flockenabtrennung liegen die Restaluminiumgehalte jedoch typischerweise unter 0,1 mg/l, während der Trinkwassergrenzwert 0,2mg/l beträgt [5, 8].

Bei den **gelösten, organischen Stoffen** ist die Flockung eines der verbreitetsten Verfahren zur Entfernung der Humin- und Fulvinsäuren. Hierbei sind die Polyhydroxokomplexe der Metalle besonders wirksam, was dazu führt, dass das Optimum für die Entfernung der gelösten organischen Stoffe (DOC) meistens bei etwas tieferen pH-Werten liegt, entsprechend dem Stabilitätsbereich für die Hydrolyseprodukte.

Das Optimum für die Trübungselimination deckt sich nicht mit der besten Entfernung der organischen Substanz. Auch der Restgehalt an Flockungsmitteln ist erhöht, falls der pH-Wert für die organischen Stoffe optimiert wird. In der Regel beinhalten die Flockungsanlagen zur Huminstoffentfernung eine pH-Wert-Anhebung nach der Flockenabtrennung (aber vor der Filtration), um den geforderten Restgehalt für das Metallion einzuhalten. Neben der Farbentfernung durch die Flockung wirkt sich die verringerte organische Belastung des Wassers besonders günstig auf nachgeschaltete Verfahrensstufen der Oxidation/Desinfektion mit Chlor und Ozon (geringere Zehrung mit weniger Nebenprodukten) und die Aktivkohleadsorption aus.

Die günstigen Bedingungen für eine gezielte DOC-Entfernung sind nach bisherigen Erfahrungen:

- pH-Wert-Bereich bei ca. 5 - 6,5 (Al³⁺) bzw. ca. 4 - 6 (Fe³⁺),
- bezogene Dosiermengen von ca. 0,25 - 1 mg Al³⁺/mg DOC bzw. 0,5 bis 2 mg Fe³⁺/mg DOC.

Die DOC-Entfernungsgrade hängen von der Molekulargewichtsverteilung und dem Charakter der Huminstoffe ab und liegen damit in einem weiten Bereich von 10 bis zu 90 %, häufig bei 30 - 70 %.

Der Anfall an Schlamm aus den Abtrennverfahren wird durch die im Rohwasser vorliegenden dispersen Feststoffe, den Zusatz an Eisen- oder Aluminiumionen und die aus Fällungsreaktionen gebildeten Produkte bestimmt. Für eine Massenbilanz kann zum Rohwasserfeststoffgehalt die doppelte Menge an dosierten Eisenionen bzw. die dreifache Menge an Aluminiumionen addiert werden. Die Flockungsschlämme sind aufgrund der geringen Stoffdichte der entstandenen Hydroxide durch einen geringen Feststoffgehalt (ca. 0,2 – 2%) gekennzeichnet. Die polymeren

Flockungshilfsmittel können die Schlammkonzentration merklich erhöhen. Nach Absetz- und Filtrationsverfahren werden in der Regel Schlammeindicker eingesetzt, bevor die weitere Behandlung zu deponiefähigen Feststoffen erfolgt.

Mit Hilfe einer an die wechselnde Rohwasserqualität optimierten Flockungstechnik, kann der Schlammanfall auf das notwendige Maß reduziert werden [9, 10]. Auch die Vorozonung zur Mikroflokkung sowie die Verwendung verbesserter Flockungsmittel (vorhydrolysierte Metall-salze) führt zu geringerem Schlammanfall. Der Schlamm enthält naturgemäß alle in der Flockung entfernten Wasserinhaltsstoffe in konzentrierter Form. Das Auftreten und der Gehalt an toxischer Spurenstoffen bestimmen wesentlich den weiteren Verbleib des Schlammes mit.

2. Zielstellung

Entfernung von suspendierten, anorganischen Wasserinhaltsstoffen mittels Flockungsmittel und Flockungshilfsmittel!

3. Aufgabenstellung

Ermitteln Sie die optimalen Flockungsbedingungen [Flockungsmittelkonzentration c_{Al} , Konzentration an Flockungshilfsmittel c_{FHM} , Konzentration an kationischen, hochmolekularen Polyelektrolyt c_{KHP} sowie die Sedimentationsdauer t_{Sed}] für die Entfernung einer SiO_2 -Suspension aus Trinkwasser mit Hilfe des primären Flockungsmittels Aluminiumsulfat $[Al_2(SO_4)_3]$ und des Flockungshilfsmittels Polyacrylamid (PRAESTOL 2515) sowie dem kationischen, hochmolekularen Polyelektrolyt (PRAESTOL 644 BC)!

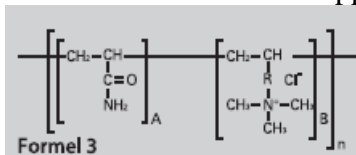
4. Geräte

- Reihenrührwerk,
- Trübungsphotometer,
- Bechergläser,
- Maßkolben.

5. Chemikalien

- *Stammlösung I:* AEROSIL 200 (SiO_2 -Suspension, $c = 10$ g/L)
- *Stammlösung II:* 5 %-ige Aluminiumsulfatlösung $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O, \cong 4,05$ g/L $Al^{3+}]$,
- *Stammlösung III:* 1,0 g/L PRAESTOL 644 BC-Lösung, kationisches hochmolekulares Polyelektrolyt (KHP)

PRAESTOL 644 BC: Copolymer aus Acrylamid mit steigenden Anteilen eines kationischen Co-Monomers. weist kationische Gruppen auf (in wässriger Lösung positiv geladen).



- *Stammlösung IV:* 0,5 g/L PRAESTOL 2515-Lösung, Flockungshilfsmittel (FHM)

6. Versuchsdurchführung

Zunächst werden 850 mL Leitungswasser in jedem Becherglas (Flockungsreaktor) vorgelegt und 50 mL der AEROSIL-Stammlösung zugegeben. Während des Ansetzens der zu flockenden Suspensionen sind diese mittels Reihenrührwerk ständig zu rühren (200 U/min). Nach einer Rührzeit von ca. 5 min sind die Suspensionen zur weiteren Versuchsdurchführung geeignet.

6.1 *Ermittlung der Mindestdosiermenge an primären Flockungsmittel* [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$]

- Dosierung von $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- entsprechend Tab. 3 werden verschiedene Mengen der Stammlösung II in 20 mL Bechergläser gegeben,
- die Zugabemenge bezieht sich auf die Al^{3+} -Konzentration,

Tab. 3: Herstellung der $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ -Lösungen

Becherglas-Nr.	1	2	3	4	5
Stammlösung II [mL]	0	0,7	1,5	5	20
Dosiermenge $\beta(\text{Al}^{3+})$ [mg/L]	0	3	7	22	88

- danach werden die Bechergläser mit destilliertem Wasser auf jeweils 20 mL aufgefüllt und gleichzeitig (!) zu den Rohwasserproben gegeben,
 - o *Rührphase 1*: Hydrolyse, $N = 200 \text{ min}^{-1}$; Dauer 2 min,
 - o *Rührphase 2*: Flockenwachstum, $N = 50 \text{ min}^{-1}$; Dauer 10 min,
 - o *Sedimentation der Flocken*: $N = 0 \text{ min}^{-1}$; Dauer 5 bzw. 20 min,
- Entnahme der Proben des behandelten Wassers mit Hilfe einer Pipette (Eintauchtiefe 7 cm, 500 mL-Marke),
- Bestimmung der Trübung und des pH-Wertes.

6.2 *Ermittlung der Abhängigkeit des Flockungseffektes von der Flockungshilfsmittelkonzentration (FHM)*

- fünf Bechergläser werden mit 900 mL Suspension (850 mL Leitungswasser und 50 mL Stammlösung I) gefüllt,
- in die Ansätze 1 – 3 wird jeweils die optimale Menge der Stammlösung II, welche mittels Versuch 6.1 ermittelt wurde, zugesetzt,
- nach 1 min intensiven Rührens ($N = 200 \text{ min}^{-1}$), werden die in Tab. 4 angegebenen Mengen an Flockungshilfsmittel gleichzeitig zugegeben und 1 min gerührt ($N = 200 \text{ min}^{-1}$),

Tab. 4: Herstellung der $Al_2(SO_4)_3$ - und FHM-Lösungen

Becherglas-Nr.	1	2	3	4	5
Stammlösung II [mL]				0	0
Dosiermenge $\beta(Al^{3+})$ [mg/L]				0	0
Stammlösung IV [mL]	0,5	1	2	0	1
Dosiermenge FHM [mg/L]	0,25	0,5	1	0	0,5

- danach werden die jeweiligen Bechergläser (Flockungsmittel und FHM) mit destilliertem Wasser auf jeweils 20 mL aufgefüllt und in folgender Reihenfolge (!) zu den Rohwasserproben gegeben,

- o *Rührphase 1*: Hydrolyse; **Zugabe $Al_2(SO_4)_3$ -Lsg.**; $N = 200 \text{ min}^{-1}$; Dauer 1 min,

- o *Rührphase 2*: **Zugabe FHM**; $N = 200 \text{ min}^{-1}$; Dauer 1 min,

- o *Rührphase 3*: Flockenwachstum, $N = 50 \text{ min}^{-1}$; Dauer 10 min,

- o *Sedimentation der Flocken*: $N = 0 \text{ min}^{-1}$; Dauer 5 min,

- Entnahme der Proben des behandelten Wassers mit Hilfe einer Pipette (Eintauchtiefe 7 cm, 500 mL-Marke),

- Bestimmung der Trübung.

6.3 Ermittlung der Mindestdosiermenge eines kationischen hochmolekularen Polyelektrolyten (KHP)

- fünf Bechergläser werden mit 900 mL Suspension (850 mL Leitungswasser und 50 mL Stammlösung I) gefüllt,

- Dosierung der KHP- Lösung

- entsprechend Tab. 5 werden verschiedene Mengen der Stammlösung III in 20 mL Bechergläser gegeben,

- die Zugabemenge bezieht sich auf die KHP - Konzentration,

Tab. 5: Herstellung der KHP-Lösungen

Becherglas-Nr.	1	2	3	4	5
Stammlösung III [mL]	0	1	7	14	20
Dosiermenge $c(KHP)$ [mg/L]	0	1,1	7,6	15,2	21,7

- danach werden die Bechergläser mit destilliertem Wasser auf jeweils 20 mL aufgefüllt und gleichzeitig (!) zu den Rohwasserproben gegeben,

- o *Rührphase 1*: Hydrolyse, $N = 200 \text{ min}^{-1}$; Dauer 2 min,

- o *Rührphase 2*: Flockenwachstum, $N = 50 \text{ min}^{-1}$; Dauer 10 min,

- o *Sedimentation der Flocken*: $N = 0 \text{ min}^{-1}$; Dauer 5 min,

- Entnahme der Proben des behandelten Wassers mit Hilfe einer Pipette (Eintauchtiefe 7 cm, 500 mL-Marke),
- Bestimmung der Trübung.

7. Auswertung

7.1 Ermittlung des optimalen Al - Flockungsmitteldosis und der optimalen Sedimentationsdauer

Die Trübung der nicht mit Flockungsmittel (FHM) behandelten Probe wird mit FNU_0 bezeichnet und entspricht 100%, für die übrigen Proben wird das Verhältnis FNU/FNU_0 [%] berechnet, die zu ermittelnde Werte sind in Tab. 6 zusammengefasst.

Tab. 6: Messwerttabelle zur Ermittlung der optimalen Flockungsmitteldosis

Probe-Nr.	Al ₂ (SO ₄) ₃ -Konz. [mg/L]	Sedimentation 5 min		Sedimentation 20 min		pH-Wert
		Trübung FNU	FNU/FNU ₀ [%]	Trübung FNU	FNU/FNU ₀ [%]	
1	0					
2	3					
3	7					
4	22					
5	88					

1. Welche optimale Flockungsmitteldosis (c_{FM}) haben Sie ermittelt?
2. Wie groß ist bei dieser Dosis die Differenz der Trübung nach 5 min und 20 min Sedimentationsdauer (t_{Sed})?
3. Erklären Sie die Wirkungsweise des Flockungsmittels in Abhängigkeit von seiner Konzentration!
4. Stellen Sie die gefundenen Abhängigkeiten der Trübungswertes (FNU/FNU_0) in Abhängigkeit der Flockungsmittelkonzentration (c_{Al}) für die verschiedenen Sedimentationszeiten ($t_{Sed} = 5$ min u. 20 min) graphisch dar (siehe Abb. 5)!

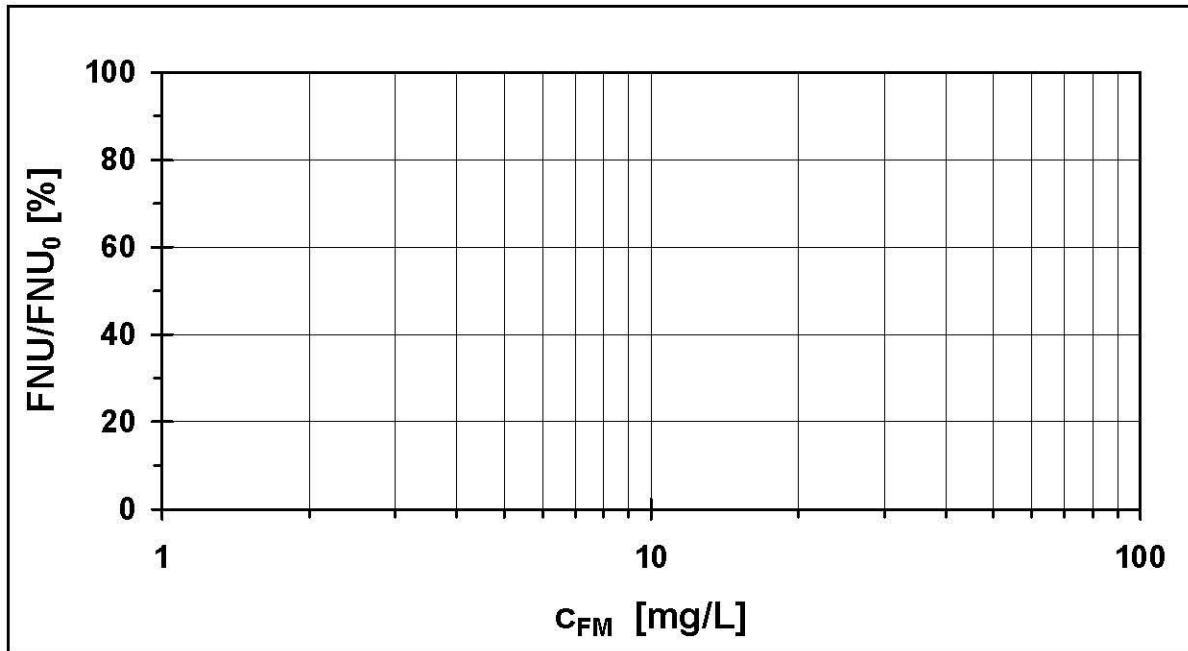


Abb. 5: Abhängigkeit des Flockungseffektes von der Flockungsmitteldosis

7.2 Ermittlung des Einflusses eines Flockungshilfsmittels

Die zu bestimmenden Werte sind in Tab. 7 einzutragen.

Tab.: 7 Messwerttabelle zur Ermittlung der optimalen Flockungshilfsmitteldosis

Probe - Nr.	FHM-Konz. [mg/L]	Sedimentation nach 5 min	
		Trübung FNU	FNU/FNU ₀ [%]
1	0,5		
2	1,0		
3	2,0		
4	0		
5	1		

1. Erklären Sie die Wirkungsweise des Flockungshilfsmittels!
2. Welche optimale Flockungshilfsmitteldosis haben Sie ermittelt?
3. Geben Sie zusammenfassend die ermittelten Optimalbedingungen (c_{Al} , c_{FHM} und $t_{Sed.}$) zur $Al_2(SO_4)_3$ - Flockung der SiO_2 -Suspensionen an!

7.3 Ermittlung der optimalen KHP-Konzentration

Die Trübung der nicht mit KHP behandelten Probe wird mit FNU_0 bezeichnet und entspricht 100%, für die übrigen Proben wird das Verhältnis FNU/FNU_0 [%] berechnet, die zu ermittelnde Werte sind in Tab. 8 zusammengefasst.

Tab. 8: Messwerttabelle der Ermittlung der KHP – Konzentration

Probe-Nr.	KHP-Konz. [mg/L]	Sedimentation 5 min	
		Trübung FNU	FNU/FNU_0 [%]
1	0		
2	1,1		
3	7,6		
4	15,2		
5	21,7		

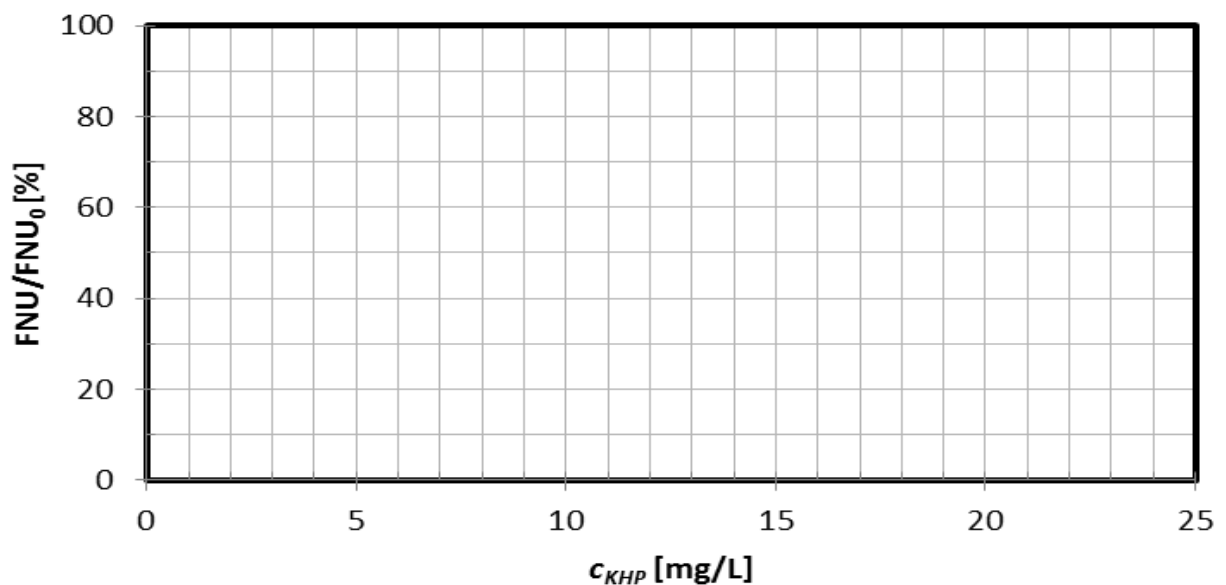


Abb. 6: Abhängigkeit des Flockungseffektes von der KHP-Dosis

1. Stellen Sie die gefundenen Abhängigkeiten der Trübungswertes (FNU/FNU_0) in Abhängigkeit der Konzentration an KHP dar (siehe Abb. 6).

2. Welche optimale KHP - Flockungsmitteldosis (c_{KHP}) haben Sie ermittelt?
3. Erklären Sie die Wirkungsweise des KHP in Abhängigkeit von seiner Konzentration. Nennen Sie die Wirkungsmechanismen eines kationischen hochmolekularen Polyelktrolyts.

8. Literatur

- [1] Gimbel, R.; Jekel, M.; Ließfeld, R.: Wasseraufbereitung – Grundlagen und Verfahren, Oldenbourg Industrierlag München-Wien, 2004, 63 – 94
- [2] Walther, H. J.; Winkler, F.: Wasserbehandlung durch Flockungsprozesse, Akademie-Verlag, Berlin, 1981
- [3] Winkler, F.; Worch, E.: Verfahrenscheme und Umweltschutz, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1989, 113 - 122
- [4] DVGW-Merkblatt W 217: Die Flockung in der Wasseraufbereitung – Grundlagen, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser GmbH, Bonn, 1987
- [5] Jekel, M.: Aluminiumsalze als Flockungsmittel. in „Trinkwasser aus Talsperren“, ATT, Oldenbourg-Verlag, München, 1991
- [6] Eisenlauer, J., Horn, D.: Flockungskemikalien: organische Stoffe. DVGW-Schriften-reihe Wasser Bd. 42, 1984, 59-72
- [7] Klute, R.: Rapid Mixing in Coagulation Flocculation Processes-Design Criteria, in: Chemical Water and Wastewater Treatment, Schriftenreihe Verein Wasser Boden Luft 62, G. Fischer-Verlag, Stuttgart, 1985, 53-65
- [8] DVGW-Arbeitsblatt W 220: Entfernung und Einsatz von Aluminium in der Wasseraufbereitung, (1994), Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser GmbH, Bonn
- [9] DVGW-Merkblatt W 218: Flockungstestverfahren (1998), Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser GmbH, Bonn
- [10] Jekel, M., Gimbel, R.: Optimal dosing of coagulants and flocculants. Berichte aus dem IWW-Institut, Band 10, Mülheim, 1994