

Grundlagenermittlung für eine zukunftsweisende Verfahrensführung mittels Schnellentcarbonisierungsreaktor zur zentralen Enthärtung 2024

Projektergebnisse zum Angebot 10163/2024/27248

Juli 2024

Wasserzweckverband Ostangeln

Thomas Asmussen



Bearbeitung

IWW Analytik und Service GmbH

Moritzstraße 26
45476 Mülheim an der Ruhr
www.iww-online.de

Stefan Hahn (Projektleiter)
Telefon: 0208 40303-233
s.hahn@iww-online.de

Wasserzweckverband Ostangeln
Thomas Asmussen
Holmlück 2
24972 Steinbergkirche

Telefon: 0160 8007547
thomas.asmussen@wzv-ostangeln.de

Bearbeitungszeitraum: Juni 2024 bis Juli 2024

Zur besseren Lesbarkeit werden Berufsbezeichnungen nicht geschlechtsspezifisch unterschieden.
Es sind immer alle Geschlechter gleichberechtigt angesprochen.

[IWWGrundlagenermittlung SEC-Reaktor 2024.docx](#)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Hintergrund	1
2	Allgemeine Aspekte der Enthärtung von Trinkwasser	1
2.1	Generelle Anmerkungen zur Wasserhärte	1
2.2	Dezentrale Enthärtung	2
2.3	Zentrale Enthärtung	3
2.4	Hygienische Aspekte	5
2.5	Wirtschaftliche Aspekte der zentralen Enthärtung	6
3	Verfahrenstechnik eines Schnellentcarbonisierungsreaktors zur Enthärtung und Entcarbonisierung	7
3.1	Grundlagen des Fällungsverfahrens	7
3.2	Verfahrensbeschreibung	9
3.3	Verschiedene Betriebsweisen bei der Schnellentcarbonisierung	13
3.4	Anmerkungen zur Qualität der eingesetzten Kalkmilch	14
3.5	Trübstofffiltration nach der Enthärtung und Entcarbonisierung	16
3.6	Anfallende Reststoffe beim Betrieb eines Schnellentcarbonisierungsreaktors	17
4	Zukünftige Randbedingungen sowie Roh- und Trinkwasserqualität	18
4.1	Zukünftige Aufbereitungsleistung	18
4.2	Aktuelle Rohwasserbeschaffenheit	19
4.3	Aufbereitungsziele (Trinkwasserbeschaffenheit)	20
5	Verfahrenskonzept und Platzbedarf	22
5.1	Verfahrenskonzept	22
5.2	Platzbedarf	25
6	Grobe Kostenschätzung	26
7	Fazit	29
8	Anhang	30

1 Einleitung und Hintergrund

Der Wasserzweckverband Ostangeln plant den Neubau eines Wasserwerks. In diesem Zusammenhang wurde IWW mit einer Grundlagenermittlung beauftragt, welche sich mit der Fragestellung beschäftigen sollte, ob der Einsatz eines Schnellentcarbonisierungsreaktors zur Enthärtung des Trinkwassers möglich und sinnvoll ist.

2 Allgemeine Aspekte der Enthärtung von Trinkwasser

2.1 Generelle Anmerkungen zur Wasserhärte

Als Härte (Gesamthärte) des Wassers bezeichnet man die Summe der im Wasser gelösten Erdalkalitionen (Calcium und Magnesium). Sie wird angegeben in mmol/l bzw. °dH (veraltete Einheit), wobei 1 °dH etwa 0,18 mmol/l entspricht.

Die Einteilung der Wasserhärte erfolgt in drei Härtebereiche, die im Waschmittelgesetz § 9 (2) festgelegt sind (Tabelle 1).

Tabelle 1: Festlegung der Härtebereiche nach dem Waschmittelgesetz

Härtebereich	Härte (mmol/l)	Härte (°dH)
weich	< 1,5	< 8,4
mittel	1,5 - 2,5	8,4 - 14
hart	> 2,5	> 14

Die Trinkwasserverordnung enthält keine Aussagen zur Härte des Wassers. Prinzipiell ist die Härte kein Qualitätsmerkmal, wenn es um den menschlichen Genuss geht. Hier ist die Aufnahme von Calcium und Magnesium eher erwünscht, obwohl der menschliche Bedarf an diesen Metallen in der Regel über die Aufnahme aus Lebensmitteln ausreichend gedeckt wird (Schweinsberg und Schweizer, 1998).

Die Härtebildner gelangen durch die Auflösung von Calcium- und Magnesiummineralien (vor allem Calcit und Dolomit) in das Wasser. Das relativ geringe Lösungsvermögen von chemisch reinem Wasser wird in der Natur durch Säuren erhöht. Die im natürlichen System wichtigste Säure ist die Kohlensäure, die aus der freien Atmosphäre und vor allem aus der Bodenluft stammt, wo sie infolge biologischer Umsetzungen entsteht.

Der Säuregehalt (primär Kohlensäuregehalt) eines Wassers und der Gehalt an calcium- und magnesiumhaltigen Mineralien im Boden bestimmen zusammen mit der Verweilzeit des Wassers im Grundwasserleiter die Härte des Wassers.

Das von den Wasserversorgungsunternehmen gelieferte Trinkwasser wird im Wesentlichen für zwei Verwendungszwecke eingesetzt. Zum einen dient es als Lebensmittel, zum anderen, weitaus größeren Teil als Brauchwasser für die verschiedensten Aufgaben.

Die Härte führt zur Bildung von Calciumcarbonatablagerungen (Kalkstein) bei Erwärmung des Wassers, zu Kalkseifenrändern an Badezimmereinrichtungen und Armaturen und hat Auswirkungen auf die Einsatzmenge von Wasch- und Reinigungsmitteln. Mit den gestiegenen Ansprüchen der Verbraucher hat sich auch der Wunsch nach weicherem Wasser weiterverbreitet. Dieser Wunsch wird verstärkt, wenn neben dem härteren Wasser, z. B. vom gleichen oder von einem in der Nähe gelegenen Unternehmen auch ein vergleichsweise weiches Wasser verteilt wird.

Mit einer hohen Härte sind in der Regel eine hohe Säurekapazität und ein eher niedriger pH-Wert des Trinkwassers verbunden. In vielen Fällen gibt es deshalb bei Vorliegen einer hohen Härte Einschränkungen im Hinblick auf die geeigneten Rohrleitungsmaterialien, da z. B. verzinkter Stahl oder Kupfer aufgrund eines erhöhten Metalllösevermögens des Wassers als Installationsmaterial nicht geeignet sind.

2.2 Dezentrale Enthärtung

Die beim Gebrauch eines harten Wassers auftretenden Kalkablagerungen und andere Nachteile der Wasserhärte, wie z. B. erhöhter Waschmittelverbrauch, haben viele Verbraucher veranlasst, eine Wasserenthärtung durch Anschaffung eines entsprechenden Gerätes selbst in die Hand zu nehmen, da eine zentrale Enthärtung in Deutschland nicht die Regel darstellt.

Für die dezentrale Enthärtung kommen fast ausschließlich Anlagen nach dem Ionenaustauscherprinzip (Natriumaustauscher) zum Einsatz.

Daneben existieren im Handel eine Reihe sogenannter physikalischer Enthärter, deren Wirksamkeit jedoch von Fachleuten vielfach angezweifelt wird. Einige Geräte sind nach DVGW-Prüfungen allerdings dafür geeignet, die Bildung von Ablagerungen bei der Warmwasserbereitung (vor allem in Warmwasser-Kreislaufleitungen) zu verringern. Diese werden in der Regel als Kalkschutzgeräte bezeichnet.

Die Ionenaustauscher haben eine Reihe von Nachteilen:

- Schwer kontrollierbare Abwasserbelastungen durch die zur Regeneration im Überschuss notwendige Kochsalzlösung.
- Hygienische Probleme durch oft ungenügende Wartung (Verkeimung des Austauschharzes).
- Erhöhung des Natriumgehaltes des Trinkwassers.
- Korrosionsprobleme durch starke Veränderung der Calcitsättigung.
- Ökonomisch nachteilig im Vergleich zur zentralen Enthärtung.

Auch wenn insbesondere die Geräte mit DVGW-Prüfzeichen heute technisch so ausgereift sind, dass ein sicherer Betrieb bei regelmäßiger fachmännischer Wartung grundsätzlich möglich ist, so ist die zentrale Enthärtung die ökonomisch und ökologisch günstigere Alternative.

2.3 Zentrale Enthärtung

Zur Härte, ab der eine zentrale Enthärtung sinnvoll sein könnte, steht im entsprechenden DVGW-Arbeitsblatt W 235-1 folgendes:

"Die Möglichkeit einer zentralen Enthärtung sollte vor allem dann geprüft werden, wenn die Härte des Trinkwassers über 3,5 mmol/l (19,6 °dH) beträgt. Liegt die Härte unter 2,0 mmol/l (11,2 °dH), wird eine Enthärtung im Allgemeinen als nicht sinnvoll erachtet. Zusammen mit der Härte sollte aber auch die in einem Kochtest stattfindende Calciumcarbonatabscheidung (siehe Anhang B) bzw. die rechnerische Calcitabscheidekapazität z. B. bei 90 °C (siehe Anhang C) betrachtet werden. Als kritische Übergangsschwelle, ab der eine Enthärtung zur Vermeidung von Verkalkungsproblemen im Warmwasserbereich in Erwägung gezogen werden sollte, wird hier eine Calcitabscheidekapazität bei 90 °C von 70 mg/l angesetzt."

Neben diesen Kriterien spielen auch die folgenden eine Rolle:

- Wenn in einem Versorgungsgebiet zwei unterschiedliche Wässer verteilt werden, deren Mischung zu kalklösendem Wasser führt, kann dies Korrosionsprobleme hervorrufen, die auf andere Art und Weise als durch Härteangleichung nicht beseitigt werden können.
- Die Härte und die Säurekapazität bis pH 4,3 sind so hoch, dass die Basekapazität auch für ein im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befindliches Wasser hoch ist, so dass weder

verzinkter Stahl noch Kupfer als Werkstoffe für die Hausinstallation empfohlen werden können.

Die Entscheidung, ob zentral enthärtet werden soll oder nicht, wird jedoch nicht allein vom Faktor Härte bestimmt. In diesen Entscheidungsprozess müssen außerdem einbezogen werden:

- Die korrosionschemischen Auswirkungen der Enthärtung auf die im Trinkwasserverteilungsnetz des Wasserversorgungsunternehmens und in der Hausinstallation der Verbraucher vorhandenen Rohrwerkstoffe;
- Investitions- und Betriebskosten sowie die damit ggf. verbundene Preiserhöhung für den Verbraucher;
- Anforderungen an die Qualifikation des Personals;
- die umweltgerechte Entsorgung der bei einer Enthärtung anfallenden Reststoffe.

Als **Vor-** und **Nachteile** der zentralen Enthärtung sind zu nennen:

- V 1. Kalkablagerungen in Warmwassergeräten und Leitungen werden bei enthärtetem Wasser vermieden oder verringert.
- V 2. Der pH-Wert des Wassers wird durch die Enthärtung angehoben, wodurch sich der Übergang unerwünschter Stoffe aus Rohrleitungsmaterialien in das Trinkwasser verringert.
- V 3. In Versorgungsgebieten können Wässer unterschiedlicher Härte einander angeglichen werden.
- V 4. Eine zentrale Enthärtung ist umweltfreundlicher als eine dezentrale Enthärtung oder als eine Härtestabilisierung mittels Polyphosphat (nur dezentral zulässig) und vermeidet die hygienischen Risiken von ungenügend gewarteten dezentralen Einrichtungen.
- V 5. Eine zentrale Enthärtung ist sowohl für den einzelnen Haushalt als auch unter Betrachtung volkswirtschaftlicher Aspekte kostengünstiger.
- V 6. Die Lebensdauer von Geräten und Armaturen im Warmwasserbereich kann sich erhöhen.

- V 7. Durch eine Enthärtung vermindert sich der Eintrag von Salzen, Phosphaten, Tensiden und anderen Inhaltsstoffen von Wasch- und Reinigungsmitteln sowie von Schwermetallen aus Rohrleitungsmaterialien in das Abwasser.
Ebenso kann Energie bei der Warmwasserbereitung eingespart werden.
- V/N. Das Trinkwasser wird teurer; es ergibt sich aber u. a. durch den verminderten Wasch- und Spülmittelverbrauch in der Bilanz in aller Regel eine finanzielle Entlastung des Verbrauchers (sofern der Verbraucher ein ausgeprägtes Umweltbewusstsein hat und sein Verhalten der neuen Wasserqualität anpasst)
- N 1. Der Aufwand für die technischen Einrichtungen und für den Betrieb der Anlagen zur zentralen Enthärtung ist im Vergleich zu gängigen Prozessen der Wasseraufbereitung höher.
- N 2. Eine Anlage zur zentralen Enthärtung stellt höhere Ansprüche an die Qualifikation des Personals und die Ausstattung für Wartung und Betrieb des Wasserwerkes.
- N 3. Es wird das gesamte Trinkwasser und nicht nur der für den speziellen Zweck benötigte Anteil enthärtet.

2.4 Hygienische Aspekte

Aus primär korrosionschemischen Gründen forderte bereits die Trinkwasserverordnung vom 05.12.1990 für Wasser nach einer Enthärtung einen Mindestgehalt an Erdalkalitionen (Härte) im aufbereiteten Wasser von $1,5 \text{ mol/m}^3$ sowie eine Säurekapazität ($K_{S4,3}$) von $\geq 1,5 \text{ mol/m}^3$. Dieser Forderung ist seit der TrinkwV 2001 entfallen, da diese sich primär auf die hygienisch relevanten Wasserinhaltsstoffe beschränkt und keine Anforderungen an eine Mineralisierung von Trinkwasser aus hygienischer Sicht stellt. In der zum Teil auch widersprüchlichen internationalen Literatur (WHO-Umfeld) zu diesen Aspekten wird empfohlen, die Magnesiumkonzentration nicht unter 10 mg/l und die Calciumkonzentration nicht unter 30 mg/l zu senken. Auch eine Säurekapazität von $1,5 \text{ mmol/l}$, mindestens aber 1 mmol/l sollte möglichst nicht unterschritten werden.

Da mit höheren Wassertemperaturen die Löslichkeit von Calciumcarbonat sinkt, liegt es nahe, die Temperaturen im Warmwasserbereich nicht unnötig hochzuhalten. Diese früher zur Verminderung von Kesselsteinbildung empfohlene Begrenzung der Wassertemperatur von Warmwassergeräten und insbesondere von Warmwasserspeichergeräten auf unter 60 °C leistet allerdings dem Wachstum des Erregers der „Legionella Pneumonia“ (Legionärskrankheit) Vorschub. Dieses Bakterium (*Legionella pneumophila*) wird durch das Einatmen von Aerosolen übertragen, die im normalen Lebensbereich des Menschen bei

bestimmten Betriebsbedingungen in größeren Warmwasserbereitungsanlagen entstehen. Die Infektion mit diesem Bakterium kann bei geschwächten Menschen zum Tode führen (Lange 2005).

Das Temperaturoptimum für die Vermehrung dieses Bakteriums liegt bei 46 °C, so dass bei langfristiger Begrenzung der Wassertemperatur auf unter 60 °C das Legionellenwachstum begünstigt wird.

Die Einstellung einer dauerhaft hohen Kesseltemperatur von über 60 °C wird den Betreibern leichter fallen, wenn kein oder nur wenig Kalkstein im System ausfällt. Seit der TrinkwV 2011 wurde ein Schwerpunkt auf die Überwachung von Warmwassersystemen gelegt, um die Gefahr der Legionellen-Infektion zu senken. Es ist durchaus möglich, dass Betreiber über die Verkalkung von Warmwassersystemen klagen, wenn Sie eine deutlich höhere Speichertemperatur realisieren müssen.

2.5 Wirtschaftliche Aspekte der zentralen Enthärtung

Die Errichtung und der Betrieb einer zentralen Enthärtungsanlage ist mit Investitions- und Betriebskosten verbunden, die letztlich über den Wasserpreis auf den Verbraucher umgelegt werden. Vor dem Hintergrund der politischen Durchsetzung ist nicht zuletzt der Kostenaspekt von entscheidender Bedeutung, der am konkreten Beispiel einer mittelgroßen Stadt am Niederrhein in einer Studie des IWW diskutiert wurde (Merkel, 1998).

Eine großzügige Abschätzung des zur Finanzierung notwendigen höheren Wasserpreises ergab zusätzlich 13 Cent/m³ Trinkwasser für den Verbraucher durch die Verringerung der Härte von über 21 °dH auf 12 °dH, d. h. um ca. 9 °dH. Ein 4-Personen-Haushalt mit einem Pro-Kopf-Verbrauch von 0,135 m³/d wird nach diesen Untersuchungen zum damaligen Zeitpunkt pro Jahr mit einem Mehrpreis von etwa 25,- € belastet, spart aber in den Bereichen

- Warmwasserbereitung
- Waschen
- Spülen
- Putzen und Reinigen
- Körperpflege

etwa 125,- € pro Jahr durch Einsparung von Energie und Chemikalien sowie vermindertem Wartungs- und Reparaturaufwand. Durch eine zentrale Enthärtung und Entcarbonisierung des

Trinkwassers spart ein 4-Personen-Haushalt damit im Mittel im Jahr etwa 100,- € (0,5 €/m³), je nach den Aktivitäten im Haushalt. Zeit- und Komfortgewinne sind dabei nicht quantifiziert. Gerade die Zeit für die Beseitigung von störenden Ablagerungen und das insgesamt bessere Erscheinungsbild von Edelstahl, Chrom- und Keramikoberflächen spielen für den Privatverbraucher jedoch oft die wesentliche Rolle.

Wird in einem Haushalt eine Anlage zur dezentralen Enthärtung des gesamten Wassers (vergl. Kapitel 2.2) außer Betrieb genommen, so vermindern sich allein die Betriebskosten für Chemikalien, Regenerationswasser und Wartung (Wartungsvertrag!) der Anlage um ca. 200 €/a. Zusätzliche Kapitalkosten würden nochmals mit etwa 120 €/a zu Buche schlagen. Weitere Zahlen zu den Aufbereitungskosten und dem Einsparpotential bieten die Veröffentlichungen von Ruhland (2004) und Hillenbrand (2004). Sie zeigen ebenfalls, dass das Einsparpotential beim Verbraucher bei der Verringerung der Härte um ca. 12 °dH bei ca. 0,50 - 0,55 €/m³ Trinkwasser liegt.

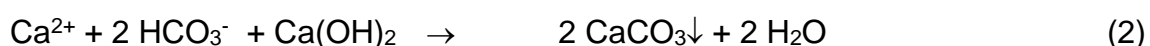
3 Verfahrenstechnik eines Schnellentcarbonisierungsreaktors zur Enthärtung und Entcarbonisierung

3.1 Grundlagen des Fällungsverfahrens

Bei den Fällungsverfahren wird Calciumcarbonat durch künstliche Verschiebung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts in den kalkabscheidenden Bereich ausgefällt. Diese Verschiebung erfolgt bei der Trinkwasseraufbereitung fast immer durch Zugabe von Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) oder seltener von Natronlauge (NaOH). Man spricht dann von chemischer Enthärtung und Entcarbonisierung.

Chemische Enthärtung und Entcarbonisierung mit Ca(OH)₂ oder NaOH

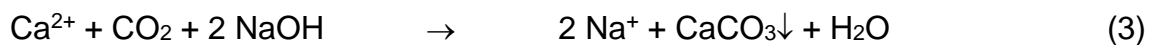
Beim Einsatz von Calciumhydroxid wird das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht zweifach gestört: Zum einen, indem die Calciumionenkonzentration erhöht und zum anderen, indem Kohlensäure und Hydrogencarbonationen in Carbonationen umgewandelt werden. In vereinfachter Darstellung laufen bei der Enthärtung mit Calciumhydroxid folgende Reaktionen ab:



Mit Calciumhydroxid werden zur Entfernung von einem Mol ursprünglich im Wasser vorhandenem Calcium 2 Mol Hydrogencarbonat benötigt. Bei den in der Trinkwasseraufbereitung üblichen pH-Werten nach der Enthärtung und Entcarbonisierung von bis zu pH 10,3 bleibt die Magnesiumkonzentration im Trinkwasser nahezu unverändert, da eine Fällung von Magnesium in nennenswertem Ausmaß erst bei einem pH-Wert über pH 10,5 als Magnesiumhydroxid stattfindet.

Möchte man aus korrosionschemischen Gründen die Hydrogencarbonatkonzentration nicht zu weit absenken, aber dennoch eine bestimmte Härte im Trinkwasser erreichen, kann Natronlauge als Base eingesetzt werden.

In vereinfachter Darstellung laufen dabei folgende Reaktionen ab:



Hier wird zur Entfernung von 1 Mol ursprünglich im Wasser vorhandenem Calcium nur 1 Mol Hydrogencarbonat gebraucht. Weiterhin wird beim Einsatz von Natronlauge Kohlenstoffdioxid mit Calcium aus dem Wasser ebenfalls als Calciumcarbonat gefällt. Insgesamt wird im Vergleich zur Enthärtung und Entcarbonisierung mit Calciumhydroxid bei gleicher Verringerung der Härte weniger als die Hälfte der Hydrogencarbonationen entfernt. Allerdings verbleibt Natrium im Trinkwasser, dessen Konzentration dann ansteigt. Bei gleicher Verringerung der Säurekapazität kann die Härte mit Natronlauge deshalb deutlich weiter verringert werden. Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass die Säurekapazität wesentlich weniger weit verringert wird als bei der Enthärtung mit Calciumhydroxid. Dies ist aus korrosionschemischer Sicht erwünscht, die Neigung zur Bildung von Kalkablagerungen geht aber auch genau deshalb nicht so stark zurück. Zum Vergleich der Auswirkungen bzgl. der Kalkablagerungen wird deshalb in der Regel das Calcitabscheidepotential bei einer Wassertemperatur von 90 °C ($D_{c, 90}$) entsprechender Wässer berechnet und anschließend miteinander verglichen.

Setzt man beide Chemikalien gemeinsam ein, kann bei einer angestrebten Rest-Säurekapazität die verbleibende Härte in Grenzen variiert werden.

Das Calciumhydroxid wird je nach Zusammensetzung des Rohwassers zu unterschiedlichen Anteilen für die Reaktionen nach (1) und (2) verbraucht. Entsprechend der gewünschten

Verringerung der Säurekapazität kann aus (5) der spezifische Calciumhydroxidbedarf bestimmt werden. Die Säure- bzw. Basekapazität bis pH 8,2 im Ablauf der Enthärtungs- und Entcarbonisierungsanlage muss hierbei zuvor abgeschätzt oder berechnet werden. Für eine näherungsweise Berechnung kann der Wert $K_{B,8,2}(ab)$ vernachlässigt werden.

$$m(\text{Ca}(\text{OH})_2) = (K_{B,8,2}(zu) - K_{B,8,2}(ab) + (K_{S,4,3}(zu) - K_{S,4,3}(ab))/2) \cdot 74 \quad (5)$$

mit

$$m(\text{Ca}(\text{OH})_2) = \text{Calciumhydroxidbedarf in g/m}^3$$

$$K_{B,8,2} = \text{Basekapazität bis pH 8,2 in mol/m}^3 \text{ (bei pH-Werten über 8,2 wird } K_{B,8,2} \text{ durch } -K_{S,8,2} \text{ ersetzt)}$$

$$K_{S,4,3} = \text{Säurekapazität bis pH 4,3 in mol/m}^3$$

Wird Natronlauge eingesetzt, so ist bei gleicher Verringerung der Säure- und Basekapazität der spezifische Verbrauch an OH⁻-Ionen gleich. Der Natronlaugebedarf ergibt sich dann aus (5) und (6):

$$m(\text{NaOH}) = m(\text{Ca}(\text{OH})_2) \cdot 1,08 \quad (6)$$

Die bei den Reaktionen nach (1), (2), (3) und (4) entstehende spezifische Calciumcarbonatmenge kann in g/m³ mit (7) berechnet werden:

$$m(\text{CaCO}_3) = (K_{B,8,2}(zu) - K_{B,8,2}(ab) + K_{S,4,3}(zu) - K_{S,4,3}(ab)) \cdot 100 \quad (7)$$

3.2 Verfahrensbeschreibung

Das Rohwasser wird beim Eintritt in die Enthärtungs- und Entcarbonisierungsanlage mit einer geeigneten Base, meist Calciumhydroxid in Form von Kalkmilch, vermischt. In der eigentlichen Enthärtungs- und Entcarbonisierungsstufe findet der durch die Gleichungen (1) - (4) beschriebene Fällungsprozess statt. Für eine schnelle und möglichst vollständige Reaktion ist eine schnelle und homogene Mischung der Reaktanden, ein schnelles Lösen der Kalkhydratpartikel und, da ein Kristallisations- bzw. Fällungsprozess vorliegt, das Vorhandensein einer möglichst großen aktiven Oberfläche aus dem Reaktionsprodukt zur Fällungsbeschleunigung bzw. zum Kristallwachstum wichtig.

Bei dem Fällungsverfahren zur Enthärtung und Entcarbonisierung ist das Wasser im Ablauf der Enthärtungsstufe noch durch ungelöstes Calciumcarbonat und ggf. nicht umgesetztes Kalkhydrat getrübt, da bei der Schnellentcarbonisierung mit Kalkmilch immer ein Teil des

Calciumcarbonats spontan im Rohwasser oder an Kalkhydratpartikeln, nicht aber an den Pellets ausfällt. Weiterhin enthält das Wasser häufig noch unlösliche Bestandteile aus der Kalkmilch sowie Eisen, Mangan und ggf. Ammonium aus dem Rohwasser, weshalb der Enthärtungs- und Entcarbonisierungsstufe in aller Regel eine Filteranlage nachgeschaltet sein muss. Im Ablauf von Schnellentcarbonisierungsanlagen, die mit Natronlauge als Base betrieben werden, sind die Trübungen in der Regel zwar unter den Grenzwerten der TrinkwV und es werden auch Werte unter 0,2 FNU erreicht, bislang ist aber nur eine Anlage bekannt, bei der auf eine Sicherheitsfiltration verzichtet wurde.

Bei der Schnellentcarbonisierung (Wirbelschichtverfahren) wird das Rohwasser gemeinsam mit der Kalkmilch und/oder der Natronlauge in das untere Ende eines sich nach oben erweiternden, ganz oder abschnittsweise konischen Reaktors eingeleitet (**Abbildung 1**).

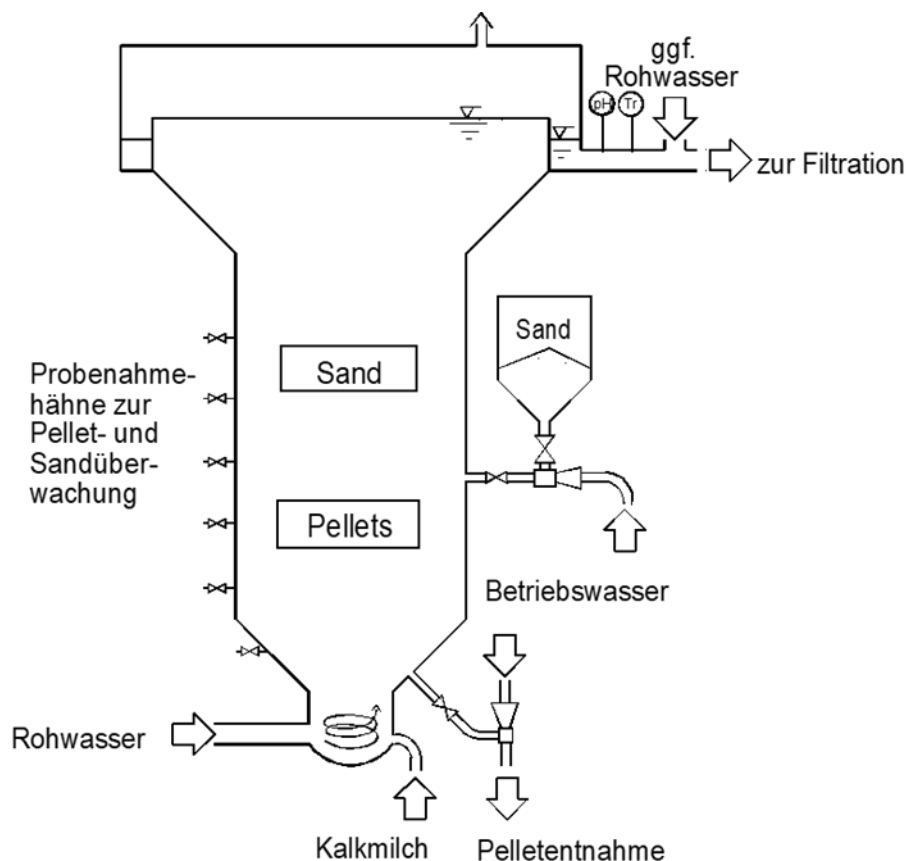


Abbildung 1: Prinzipskizze eines Schnellentcarbonisierungsreaktors

In dem Reaktor befindet sich bei der Inbetriebnahme in der Regel feiner Impfsand mit einer Körnung zwischen 0,2 und 0,4 bis 0,6 mm, der durch die Aufstiegs geschwindigkeit des Wassers von 50 bis 120 m/h in Schwebelage gehalten wird. Das Calciumcarbonat fällt bevorzugt an der Sandoberfläche aus. Es entsteht eine Kalksteinschicht, an der dann die weitere Kristallisationsreaktion stattfindet. Der oberste Teil des Reaktors dient als Klärzone. Je nach

Reaktorkonstruktion und Betriebsbedingungen liegt der optimale Durchmesser der Pellets zwischen 0,9 mm und 1,5 mm. Mit wesentlich über 1,5 mm steigendem mittlerem Korndurchmesser verschlechtert sich die CaCO_3 -Abscheideleistung des Reaktors. Sind durch die Fällungsreaktion zu viele und/oder zu große Pellets im Reaktor entstanden, werden sie teilweise oder vollständig entfernt und Impfsand (Quarzsand oder Kalksteinsand) wird ergänzt. Das auf den Reaktordurchsatz bezogene, notwendige spezifische Schwebebettvolumen liegt bei $0,02 - 0,08 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{h})$. Da das Schwebebett aufrechterhalten werden muss, ist abhängig von der Reaktorkonstruktion und der Pelletgröße eine Verringerung des Durchsatzes nur bis auf minimal ca. 40 % der Nennlast möglich. Die ReaktorbaufORMen variieren bzgl. der Strömungsführung bei der Einmischung (zentral-vertikal oder tangential/horizontal) und im Aufstrom (konisch, zylindrisch oder konisch-zylindrisch) erheblich. Ebenso gibt es hydraulisch offene (Überlaufrinne) und geschlossene (Ablaufmulden) Reaktoren.

Anders als bei der Langsamentcarbonisierung gibt es bei der Schnellentcarbonisierung eine Reihe von Randbedingungen bzgl. der Rohwasserqualität, die beachtet werden müssen, denn hier wird die Kristallisation an den Pellets leichter durch Fremdstoffe gestört als die Fällung und Kristallisation im Rahmen der Langsamentcarbonisierung. In der Literatur werden für folgende Rohwasserparameter Einsatzgrenzen genannt, bei deren Überschreitung mit deutlichen Störungen der Pelletbildung gerechnet werden muss:

- Temperatur: $8 \text{ °C} < T < 30 \text{ °C}$
- Schwebstoffe: $< 30 \text{ mg/l}$

Weitere Parameter aus DVGW W 235-1 (auch für weitere Verfahren) sind in **Tabelle 2** zusammengestellt.

Tabelle 2: Anforderung der Enthärtungsverfahren an das Rohwasser (DVGW W 235-1, 2010)

Bewertungskriterien		Verfahren			
		Fällungsverfahren SEC	LEC	Ionenaustausch- verfahren ^a	Membranverfahren NF/UF
Rohwasser- seitige Anfor- derungen ^b	Fe ²⁺	< 6 mg/l	–	< 0,1 mg/l	< 0,05 mg/l ^c
	Fe ³⁺	< 8 mg/l	–	< 0,1 mg/l	< 0,05 mg/l ^d
	Mn ²⁺	< 2 mg/l	–	< 0,1 mg/l	< 0,02 mg/l ^{c,d}
	PO ₄ ³⁻	< 0,2 mg/l	–	< 1 mg/l	–
	Trübung,	< 30 FNU	–	< 5 FNU	< 1 FNU
	TOC bzw. DOC	< 5 mg/l	–	< 3 mg/l	–
	Al ³⁺	–	–	möglichst gering	möglichst gering ^d
	Sr ²⁺	–	–	–	möglichst gering ^d
	Ba ²⁺	–	–	–	möglichst gering ^d
	Silikate	–	–	–	möglichst gering ^d
	K _{S4,3}	> 3 mmol/l (mit Ca(OH) ₂) < 5 mmol/l (mit NaOH)	–	–	–
	K _{S4,3} /Ca ²⁺	> 1,5 (mit Ca(OH) ₂) > 1,0 (mit NaOH)	–	–	–
	SDI	–	–	–	< 3

^a hier: schwach saure Kationenaustauscher, die mit einem stark basischen Anionenaustauscher kombiniert und als Mischbett betrieben werden (in der Literatur als CARIX^{®1}-Prozess bezeichnet, bei dem die Ionenaustauscherharze mit Kohlensäure besonders effizient regeneriert werden)

^b Für die SEC sind nur grobe Anhaltswerte möglich. Bei erhöhten Konzentrationen über 50 % der genannten Richtwerte sind Pilotversuche zwingend erforderlich, insbesondere wenn mehrere Faktoren zusammenkommen.

^c Sauerstoffreies Wasser kann mit vergleichsweise höherer Konzentration an Eisen(II), Mangan(II) und DOC aufbereitet werden.

^d Wenn das Wasser diesen verfahrenstypischen Anforderungen nicht entspricht, muss eine Voraufbereitung zur Entfernung dieser Stoffe erfolgen, oder es müssen zur Vorbeugung einer Membranverblockung (Scaling) Kristallisationsinhibitoren (Antiscalants), eingesetzt werden. Die Parameter Strontium bzw. Barium sind diesbezüglich zumindest dann als kritisch anzusehen, wenn im Konzentrat des zu behandelnden Wasser die Löslichkeit für Bariumsulfat bzw. Strontiumcarbonat überschritten ist.

Deutliches Anzeichen für eine Beeinträchtigung der Kristallisationsreaktion ist die Entstehung von weichen Pellets und das Auftreten von sehr hohen Trübungen im Reaktorablauf bei optimalen Betriebsbedingungen hinsichtlich Kalkmilchlösegeschwindigkeit, Kalkmilcheinmischung, Pelletdurchmesser und Aufstromgeschwindigkeit. Das den Reaktor verlassende Wasser ist dann häufig sehr stark calcitabscheidend und kann mehrere 100 g/m³ abfiltrierbare Stoffe enthalten. Im ungünstigsten Fall findet keine Pelletbildung mehr statt. Die genauen Zusammenhänge zwischen den aufgeführten Rohwasserparametern und dem Auftreten von Störungen sind nicht in allen Einzelheiten bekannt. Hohe Konzentrationen an zweiwertigen Ionen wie Eisen, Mangan, Blei oder Nickel werden bis zu bestimmten Anteilen in das Kristallgitter des Calciumcarbonates eingebaut: Wird der Anteil dieser Ionen zu hoch, ist das Gitter instabil und es werden keine Pellets gebildet. Erhöhte Konzentrationen an hochmolekularen organischen Wasserinhaltsstoffen verlangsamen oder unterbinden das Kristallwachstum und stören so die Schnellentcarbonisierung. Können die Einflüsse der oben

genannten Rohwasserparameter nicht sicher eingeschätzt werden, müssen immer Vorversuche im halbtechnischen Maßstab durchgeführt werden.

3.3 Verschiedene Betriebsweisen bei der Schnellentcarbonisierung

Es bieten sich bei der Aufbereitung zwei Verfahrensvarianten an, nämlich die Vollstromteilentcarbonisierung und die Teilstromvollentcarbonisierung. Bei der Vollstromteilentcarbonisierung wird der gesamte Wasserstrom enthärtet und entcarbonisiert und dann filtriert. Die angestrebte Säurekapazität oder Härte im Anlagenablauf wird durch eine zum Rohwasserstrom proportionale Chemikaliendosierung oder ggf. durch die Regelung auf einen bestimmten pH-Wert oder eine bestimmte Leitfähigkeit im Anlagenablauf erreicht. Bei der Teilstromvollentcarbonisierung wird ein Teilstrom des Rohwassers meist bis auf die technisch erreichbare minimale Säurekapazität bzw. die minimal erreichbare Härte entcarbonisiert. Die gewünschte Säurekapazität im Trinkwasser wird durch Zugabe von nicht-entcarbonisiertem Wasser nach der Entcarbonisierung in einem bestimmten Verhältnis erreicht. Das nicht-entcarbonisierte Wasser darf nur dann nach der Filtration zugemischt werden, wenn im Trinkwasser die Grenzwerte der TrinkwV und die allgemein anerkannten Regeln der Technik eingehalten werden. Andernfalls muss die Zumischung vor der Filtration erfolgen, damit im Filter noch weitere ggf. notwendige Aufbereitungsprozesse wie z. B. die Enteisung ablaufen können.

Die Teilstromvollentcarbonisierung ist vorteilhaft bzgl. der Anlagengröße und des Verhaltens des Mischwassers bei der Filtration. Die Enthärtungs- und Entcarbonisierungsanlagen können bei der Teilstromvollentcarbonisierung für einen geringeren Volumenstrom ausgelegt werden. Weiterhin ist nach dem Verschnitt des sehr weichen Wassers mit dem harten Rohwasser der pH-Wert im Mischwasser immer niedriger als im Wasser nach einer Vollstromteilentcarbonisierung auf die gleiche Rest-Säurekapazität. Da dann auch der Sättigungsindex wesentlich niedriger ist, fällt im nachgeschalteten Filter und in den Rohrleitungen weit weniger Calciumcarbonat aus. Es ist jedoch zusätzlich eine Verhältnisregelung für beide Volumenströme und eine Mischvorrichtung nötig. Durch eine Kombination der beiden Fahrweisen kann bei der Schnellentcarbonisierung die hydraulische Bandbreite deutlich erweitert werden, wenn z. B. bei geringen Durchsätzen eine Vollstromteilentcarbonisierung und bei hohen Durchsätzen eine Teilstromvollentcarbonisierung betrieben wird.

Je nach Rohwasserqualität und Anforderungen an das Trinkwasser wird das Wasser vor der Filtration belüftet. Der pH-Wert wird – falls erforderlich – vor der Filtration durch die Dosierung von Kohlenstoffdioxid oder ggf. einer Mineralsäure wie Salz- oder Schwefelsäure auf den pH-

Wert der Calcitsättigung eingestellt. Dies ist in der Regel immer dann erforderlich, wenn kein Rohwasser zugemischt werden kann bzw. wenn dessen CO_2 -Konzentration zu gering ist. Bei Bedarf kann die Filtration durch den Einsatz von Flockungs- oder Flockungshilfsmitteln optimiert werden. Die optimale Verfahrensweise hängt von der jeweiligen Rohwasserzusammensetzung und den sonstigen Anforderungen an die Aufbereitung ab und muss für jeden Einzelfall geprüft werden.

3.4 Anmerkungen zur Qualität der eingesetzten Kalkmilch

Da in den meisten Fällen mit Calciumhydroxid enthärtet wird, ist dessen Bereitstellung in dosierfähiger Form, sei es als Kalkmilch oder als Kalkwasser, ein wichtiger Aspekt bei der Enthärtung und Entcarbonisierung. Die verschiedenen Möglichkeiten der Kalkmilchbereitung sind in Tabelle 3 dargestellt.

Aus den Lagersilos oder Zwischenbehältern wird die Kalkmilch mit geeigneten Kreiselpumpen (Ringleitung + Regelventil + Volumenstrommessung), Membrankolbenpumpen, Exzentrerschneckenpumpen (am häufigsten eingesetzt) oder Schlauchpumpen dem Rohwasser vor oder in den Entcarbonisierungsanlagen zudosiert.

Ausführliche Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen der Kalkmilchqualität und den Vorgängen in Schnellentcarbonisierungsreaktoren zeigen, dass die Lösegeschwindigkeit der Kalkhydratpartikel, die vor allem von ihrer Korngröße abhängt, einen sehr großen Einfluss auf die Trübung und die Calcitabscheidekapazität im Reaktorablauf hat. Zeitgleich oder durch diese Ergebnisse initiiert wurden von verschiedenen Kalkproduzenten oder Institutionen Verfahren entwickelt oder optimiert, mit denen Kalkmilchsorten mit sehr hoher Lösegeschwindigkeit hergestellt werden können.

Tabelle 3: Vergleich verschieden hergestellter Kalkmilchsorten

Bezeichnung	Kalkmilch (schnelllöslich)	Kalkmilch (aus Kalkhydrat-löseanlage)	Kalkmilch (aus herkömmlicher Löschanlage)
Herstellungsart	spezielle Nasslösungsverfahren spezielle Nachbehandlungsverfahren	Lösen von trocken gelöschtem Kalkhydrat	Löschen von Branntkalk und Verdünnen auf Gebrauchskonzentration
Herstellungsort	vorwiegend Kalkwerk vor Ort-Herstellung ab ca. 750 t/a (als $\text{Ca}(\text{OH})_2$) wirtschaftlich	Wasserwerk	Wasserwerk
Feststoffkonzentration	ca. 18 -24 %ig bei Anlieferung	2-10 %	2 - 10 %
Vorteile	hohe Reaktivität kurze Auflösezeit einfache Bevorratung und Dosierung bei Lieferung	preiswerteres Produkt deutlich geringere Transportkosten	preiswerteres Produkt deutlich geringere Transportkosten eigene Optimierung des Löschvorganges möglich
Nachteile	relativ hoher Preis bei Anlieferung hohe Transportkosten bei Eigenproduktion: sehr hohe Investitions- und Betriebskosten aufwändiger Betrieb	geringere Reaktivität längere Lösezeiten hohe Investitions- und Betriebskosten	meist geringere Reaktivität meist längere Lösezeiten hohe Investitions- und Betriebskosten aufwendiger Betrieb

Die Erfahrungen zeigen, dass bei der Kalkmilchbereitung im Wasserwerk durch

- die Verwendung von sehr reinen, reaktionsfreudigen Branntkalken,
- eine optimale Temperaturführung beim Löschvorgang und
- den Einsatz von kohlendioxid- und hydrogencarbonatfreiem sowie möglichst sulfatarmem Lös- und möglichst auch Lösewasser

sehr hohe Lösegeschwindigkeiten bzw. kurze Lösezeiten erreicht werden können. Erfahrungsdaten zur Abhängigkeit der Trübung im Reaktorablauf von der Lösezeit der Kalkhydratpartikel ($t(90) = 90\%$ vollständig aufgelöst) sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Einfluss der Lösezeit auf die Trübung im Reaktorablauf

Kalkmilch	t(90)	Trübung	Anteil der Abscheidung des Calcits im Reaktor	Kosten
herkömmlich (aus Kalkhydrat)	10-30 s	40-100 TE/F	ca. 88 %	100 %
schnelllöslich	1,9-2,4 s	5-20 TE/F	ca. 97 %	150 -250 %

Bei Nutzung aller Optimierungsmöglichkeiten der Kalklöschung sind Lösezeiten unter 1 s möglich (t_{90}).

Mit geringen Trübungen erhöhen sich die Filterlaufvolumina deutlich und auch die Verkalkungsneigung der Ablaufleitungen sinkt in der Regel stark. Die Wartung wird insgesamt stark vereinfacht. Die Produkt- bzw. Produktionskosten sind allerdings höher als bei herkömmlich hergestellter Kalkmilch.

Die dosierfertig angelieferte, schnelllösliche Kalkmilch erfreut sich vor allem in kleineren und mittleren Wasserwerken großer Beliebtheit, da die gesamte Kalkmilchbereitung entfällt. Allerdings muss dieser Service mit einem gegenüber Kalkhydrat deutlich erhöhten Produktpreis bezahlt werden und ist ab einer bestimmten Distanz zwischen Wasserwerk und Kalkmilchlieferant nicht mehr wirtschaftlich.

Ist nur ein weniger schnell lösliches Kalkhydrat verfügbar, können die Nachteile meist durch eine größere Filterfläche der Nachfilterstufe und durch die Stabilisierung des Filterzulaufs mittels Dosierung von CO_2 oder Mineralsäure (Schwefelsäure / Salzsäure) weitgehend kompensiert werden. Durch Selektion von sehr gutem Roh-Kalkstein, Optimierung der Herstellungsverfahren und bessere Sichtung sind in den vergangenen Jahren besondere Kalkhydratqualitäten entwickelt worden, die gegenüber den Produkten von vor 10 bis 15 Jahren eine erhebliche Erleichterung des Reaktorbetriebs mit sich bringen.

3.5 Trübstofffiltration nach der Enthärtung und Entcarbonisierung

Zur Trübstoffabtrennung nach dem Schnellentcarbonisierungsreaktor werden die herkömmlichen Tiefenfilter mit Einschicht- oder Mehrschichtfilteraufbau eingesetzt. Die Filtergeschwindigkeiten bei der einfachen Filtration nach Schnellentcarbonisierungsanlagen liegen meist bei maximal ca. 8 m/h, da die Trübstoffe sehr fein sind und relativ leicht

durchbrechen. Wird das Wasser direkt nach dem Reaktor in stark kalkabscheidendem Zustand filtriert, besteht die große Gefahr, dass sich auf dem Filtermaterial Calcit abscheidet und dass damit auf die Dauer der wirksame Korndurchmesser zu- und die Filtratgüte abnimmt. Aus diesen Gründen ist es zumindest bei der Schnellentcarbonisierung von Vorteil, eine Teilstromvollentcarbonisierung durchzuführen und vor der Filtration das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht durch Verschnitt mit Rohwasser einzustellen (falls möglich). Die Filterlaufvolumina konnten durch zunehmenden Einsatz von feineren Filtermaterialien von 200 bis $300 \text{ m}^3/\text{m}^2$ auf 600 bis $800 \text{ m}^3/\text{m}^2$ bei hoher Filtratqualität gesteigert werden (Tabelle 5).

Tabelle 5: Filtration nach Schnellentcarbonisierungsreaktoren (Erfahrungsdaten IWW)

Filteraufbau	Flockungshilfsmittel	Filterlaufvolumina
Filterkohle 1,4 - 2,5 mm	nein	ca. $300 \text{ m}^3/\text{m}^2$
Sand 0,71 - 1,25 mm	ja (Druckfilter)	bis $2000 \text{ m}^3/\text{m}^2$
Filterkohle 0,6 - 1,6 mm Sand 0,4 - 0,8 mm	nein	ca. $700 \text{ m}^3/\text{m}^2$

An verschiedenen Aufbereitungsanlagen wird vor den Filteranlagen Flockungs- oder Flockungshilfsmittel dosiert, wodurch dann Filtergeschwindigkeiten von 15 bis 20 m/h realisiert werden können, ohne dass ein Trübungsdurchbruch auftritt. Bei optimaler Dosiermenge werden Filterlaufvolumina von bis zu $2000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ erreicht, in der Regel liegen die Filterlaufvolumina bei etwa $1400 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Der Einsatz von Flockungshilfsmitteln ermöglicht eine Halbierung der notwendigen Filterfläche und eine Verringerung des Schlammwasseranfalls um 50 % und mehr. Der dann auftretende Filterwiderstand von bis zu 1 bar kann jedoch nur in Druckfilteranlagen überwunden werden.

3.6 Anfallende Reststoffe beim Betrieb eines Schnellentcarbonisierungsreaktors

Bei der Schnellentcarbonisierung fällt Calciumcarbonat, ggf. verunreinigt mit Eisen- und Manganverbindungen überwiegend in Form von Pellets bzw. als Nassschlamm an. Die Spülwässer werden meist einer Sedimentation unterzogen und das Klarwasser nach Abtrennung der Feststoffe in den nächstgelegenen Vorfluter abgeleitet oder versickert. Die Schlämme können je nach örtlicher Situation verschiedenen Verwertungswegen zugeführt

werden. So ist z. B. in Abhängigkeit vom Gehalt an Calciumcarbonat und Verunreinigungen der Einsatz als Rückstandskalk aus der Aufbereitung von Trinkwasser nach der Düngemittelverordnung zulässig. Dieser Verwertungsweg steht auch für die Pellets offen, sofern sie bestimmte Anforderungen erfüllen, die in der Düngemittelverordnung festgelegt sind.

4 Zukünftige Randbedingungen sowie Roh- und Trinkwasserqualität

4.1 Zukünftige Aufbereitungsleistung

Die Aufbereitungsleistung wurde in Absprache mit dem Auftraggeber auf folgende Werte festgelegt:

Jahresabgabe Trinkwasser:	0,55 Mio m ³ /a (Zeitraum 2020-2023)
Tagesabgabemenge, mittel:	1611 m ³ /d
Tagesabgabemenge, Winter:	1050 m ³ /d
Tagesabgabemenge, Sommer:	2800 m ³ /d

Ausgehend von einer zukünftigen **20-stündigen** Aufbereitung ergeben sich daraus folgende stündliche Aufbereitungsleistungen:

Stundenmenge, Winter:	53 m ³ /h
Stundenmenge, Sommer:	140 m ³ /h

Bemerkung: Die hier zugrunde gelegten Stundenmengen für den Winter- und Sommerbetrieb werden als Grundlage für die weiteren Berechnungen verwendet.

4.2 Aktuelle Rohwasserbeschaffenheit

Die Rohwasserbeschaffenheit für die Berechnungen zur Enthärtung und Entcarbonisierung mittels SEC-Reaktor wurde aus den drei vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Rohwasseranalysen (Probenahmedatum: 10.02.2021) der Brunnen 2, 4 und 5 entnommen. Die wichtigsten Analysedaten sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Wesentliche Parameter für die Rohwässer der Brunnen 2, 4 und 5

	Einheit	Grenzwerte der TrinkwV	Brunnen 2	Brunnen 4	Brunnen 5	Rohwasseranforderungen für Schnell-entcarbonisierung (nach DVGW W 235-1, 2010)
Spalte	1	2	3	4	5	6
Temperatur	°C		9,2	9,1	9,4	
pH-Wert	-	6,5-9,5	7,53	7,63	7,55	
pH-Wert (berechnet)	-		6,91	7,37	7,32	
Leitfähigkeit	µS/cm	2500	600	606	643	
Basekapazität bis pH 8,2	mmol/l		0,63	0,46	0,63	
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/l		5,77	5,81	5,97	> 3 mmol/l (mit Ca(OH) ₂) / > 5 mmol/l (mit NaOH)
Sulfat	mg/l	240	6,3	6,7	5,2	
Chlorid	mg/l	250	22	22	32	
Natrium	mg/l	200	21	19	35	
Kalium	mg/l		3,8	3,9	4,1	
Magnesium	mg/l		13	14	14	
Calcium	mg/l		91	94	89	
Nitrat	mg/l	50	< 1	< 1	< 1	
Eisen	mg/l	0,2	2,7	3,0	2,6	< 6
Mangan	mg/l	0,05	0,33	0,29	0,25	< 2
Ammonium	mg/l	0,5	0,44	0,50	0,45	
Nitrit	mg/l	0,1	< 0,02	< 0,02	< 0,02	
Sauerstoff	mg/l		1,0	1,0	0,8	
Gesamthärte	°dH		15,7	16,2	15,6	
Karbonathärte (einf. ber.)	°dH		16,2	16,3	16,7	
Calcitabscheidekapazität	mg/l CaCO ₃		-15,0	-27,0	-17,0	
Phosphat	mg/l		-	-	-	< 0,2
DOC	mg/l		2,0	2,0	2,1	< 5
Ks _{4,3} /Ca ²⁺	-		2,5	2,5	2,7	> 1,5 mmol/l (mit Ca(OH) ₂) / > 1,0 mmol/l (mit NaOH)

Die Rohwässer der einzelnen Brunnen enthalten zwischen 2,6 mg/l und 3,0 mg/l Eisen sowie zwischen 0,29 mg/l und 0,33 mg/l Mangan. Die Ammonium-Konzentration liegt zwischen 0,44 mg/l und 0,50 mg/l. Es handelt sich um typisch reduzierte Grundwässer. Die Härte liegt in den Einzelrohwassern bei durchschnittlich 2,8 mmol/l (15,6 °dH bis 16,2 °dH) und ist somit gemäß Wasch- und Reinigungsmittelgesetz (WRMG) dem Härtebereich „hart“ zuzuordnen. Die Rohwässer sind mit einer Säurekapazität bis pH 4,3 zwischen 5,77 mmol/l und 5,97 mmol/l sehr gut gepuffert und die Nitrat-Konzentration liegt unterhalb der Bestimmungsgrenze. Die DOC-Konzentration liegt bei ca. 2,0 mg/l. Die Sulfat- und die Chlorid-Konzentrationen sind mit

22 mg/l bis 32 mg/l bzw. 5,2 mg/l bis 6,7 mg/l in einem niedrigen Bereich einzuordnen. Bei einer Fällungsenthärtung mit Kalkmilch werden bei solchen Wässern die korrosionschemischen Eigenschaften in der Regel nur geringfügig negativ verändert.

Ein eventuelles Auftreten organischer Spurenstoffe oder anderer bisher unbekannter Einflüsse auf der Rohwasserseite wurde nicht überprüft. Dies müsste bei Fortführung der Überlegungen zur zentralen Enthärtung mittels eines speziellen Rohwassergutachtens erfolgen, das auch mögliche Gefährdungen im Umfeld berücksichtigt.

Anhand von Tabelle 6 ist zu sehen, dass die grundlegenden Anforderungen an das Rohwasser für den Betrieb eines Schnellentcarbonisierungsreaktors in den Rohwässern der Brunnen 2, 4 und 5 gegeben sind. Die Anforderung der Trübung von < 30 FNU (siehe Tabelle 2) konnte auf Basis der vorliegenden Analysedaten der Rohwässer nicht evaluiert werden. IWW geht jedoch auf Basis anderer in Zusammenhang stehenden Analyseergebnisse (Eisen-Konzentration und Sauerstoff-Konzentration) davon aus, dass die Trübung deutlich unterhalb von 30 FNU in den Rohwässern liegt (schätzungsweise im Bereich $< 0,1$ FNU und 5 FNU).

Bemerkung: Da es sich zunächst um eine Grundlagenstudie handelt, wurde auf die sonst übliche Auswertung der Analysedaten der Einzelbrunnen mindestens über einen Zeitraum von 10 Jahren zurück und eine Bewertung der Beschaffenheitsentwicklung in jedem Brunnen aufgrund des zunächst orientierenden Charakters der Studie verzichtet.

4.3 Aufbereitungsziele (Trinkwasserbeschaffenheit)

Folgende Aufbereitungsziele wurden von IWW für die Studie festgelegt bzw. in Tabelle 7 berechnet:

- Enthärtung bis in den Härtebereich weich $\rightarrow 8$ °dH
- Verringerung der Härte um mindestens 1 mmol/l bzw. 5,6 °dH (damit der technische Aufwand einer Enthärtung annähernd gerechtfertigt ist) \rightarrow ca. **1,39 mmol/l bzw. 7,8 °dH**
- Säurekapazität bis pH 4,3 $\geq 2,0$ mmol/l und Calciumkonzentration $\geq 0,5$ mmol/l bzw. 20 mg/l im Trinkwasser (korrosionschemische Gründe) \rightarrow ca. **$K_{S4,3} = 3,0$ mmol/l und Calciumkonzentration = 35 mg/l**
- Trinkwasserqualität entsprechend der Trinkwasserverordnung \rightarrow **eingehalten**

Für die hier grundlegende Studie wurde zunächst eine Rohwasserbeschaffenheit aus den Mittelwerten der Rohwasseranalysen der Brunnen 2, 4 und 5 berechnet und in Tabelle 7 dargestellt. Auf dieser Basis wurden Berechnungen zur Beschaffenheit eines Wassers am Ablauf eines Schnellentcarbonisierungsreaktors mit Kalkmilchzugabe sowie die Trinkwasserbeschaffenheit nach CO₂-Zugabe durchgeführt. Häufig wird CO₂ am Ablauf eines Reaktors zur pH-Wert Regulierung und der damit einhergehenden Einstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts verwendet. Für die hier durchgeführte Studie wird von einer CO₂-Zugabe ausgegangen.

Rechnerisch wurde von einer Kalkmilchzugabe ausgegangen, bei der eine typische pH-Wert Anhebung für den Betrieb eines Schnellentcarbonisierungsreaktors erfolgt (ca. pH 8,5). Im Trinkwasser wurde rechnerisch so viel CO₂ dosiert, bis ein pH-Wert von ca. pH 7,7 vorlag, um der Trinkwasserverordnung sicher zu entsprechen (Grenzwert Calcitlösekapazität: 5 mg/l oder pH-Wert: 7,7).

Bemerkung: Laut IWW vorliegenden Analysen liegen die Rohwässer der Brunnen bereits deutlich im calcitabscheidenden Bereich. Beim Betrieb eines Schnellentcarbonisierungsreaktors kann das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Trinkwassers zukünftig relativ genau eingestellt werden.

Tabelle 7: Durchschnittliche Rohwasserqualität und zu erwartende Trinkwasserqualität bei Ca(OH)₂- und CO₂-Zugabe

Parameter		Rohwasser	Ablauf Entcarbonisierung	Reinwasser
Bewertungstemperatur	[°C]	9,233	11,400	11,400
Sauerstoff [O ₂]	[mg/l]	0,933	0,933	0,933
pH _{tb} (pH-Wert bei Bewertungstemperatur)		7,571	8,504	7,729
m-Wert (KS4,3)	[mmol/l]	5,796	2,995	2,995
p-Wert (-KB8,2)	[mmol/l]	-0,381	0,048	-0,129
c(DIC)	[mg/l]	74,191	35,404	37,532
Ionenstärke	[mmol/l]	9,339	5,293	5,331
Gesamthärte	[°dH]	15,841	8,000	8,000
Karbonathärte	[°dH]	15,841	8,000	8,000
Calcium [Ca ²⁺]	[mg/l]	91,167	35,049	35,049
Magnesium [Mg ²⁺]	[mg/l]	13,467	13,467	13,467
Natrium [Na ⁺]	[mg/l]	24,900	24,900	24,900
Kalium [K ⁺]	[mg/l]	3,920	3,920	3,920
Ammonium [NH ₄ ⁺]	[mg/l]	0,000	0,000	0,000
Eisen-II [Fe ²⁺]	[mg/l]	0,000	0,000	0,000
Mangan-II [Mn ²⁺]	[mg/l]	0,000	0,000	0,000
Chlorid [Cl ⁻]	[mg/l]	25,467	25,467	25,467
Nitrat [NO ₃ ⁻]	[mg/l]	0,000	0,000	0,000
Sulfat [SO ₄ ²⁻]	[mg/l]	6,067	6,067	6,067
Orthophosphat [PO ₄ ³⁻]	[mg/l]	0,100	-	-
Gelöster org. Kohlenstoff [DOC]	[mg/l]	2,000	2,000	2,000
Calcitsättigungsdaten bei Bewertungstemperatur				
pH _{Ctb} (Calcitsättigung durch Calcit)		7,309	7,921	7,811
Delta-pH		0,262	0,583	-0,082
S _i (Sättigungsindex Calcit)		0,352	0,650	-0,100
D _c (Calcitlöse-/Abscheidekapazität)	[mg/l]	-28,163	-11,418	2,590
zugehörige Kohlensäure	[mg/l]	17,790	1,019	5,011
überschüssige Kohlensäure	[mg/l]	0,000	0,000	1,302
freie Kohlensäure	[mg/l]	17,790	1,019	6,313
Korrosionsquotienten (DIN EN 12502)				
S1 (Korrosionsquotient)	<0,5	0,150	0,299	0,288

5 Verfahrenskonzept und Platzbedarf

5.1 Verfahrenskonzept

Im Nachfolgenden wird auf die Fragestellung eingegangen, ob bei der vorliegenden Rohwasserqualität zunächst eine Enteisung, Entmanganung und Nitrifizierung durchgeführt werden muss, bevor das Rohwasser in einem Schnellentcarbonisierungsreaktor enthärtet werden kann. Legt man die Daten aus Tabelle 2 (Anforderung der Enthärtungsverfahren an das Rohwasser (DVGW W 235-1, 2021) zugrunde, kann als erster Schritt der Aufbereitung die Schnellentcarbonisierung durchgeführt werden. In der anschließenden Trübstofffiltration werden dann die Oxidationsprozesse durchgeführt bzw. beendet. Bei der Schnellentcarbonisierung selbst werden bis zu 60 % des Eisens und 80 % des Mangans durch

Mitfällungsprozesse aus dem Rohwasser entfernt (hierbei handelt es sich nicht nur um theoretische Werte, sondern auch von IWW untersuchte Praxiswerte).

Die zweite wesentliche Fragestellung lautet, ob zukünftig ein Reaktor ausreicht um eine gleichbleibende Trinkwasserqualität sowohl im Sommerbetrieb (max. 140 m³/h, bei 20 Stunden Aufbereitung) als auch im Winterbetrieb (53 m³/h, bei 20 Stunden Aufbereitung) sicherzustellen. Hierbei stellt sich ebenfalls die Frage der Vollstrom- oder Teilstromentcarbonisierung. Ausgehend von der in Kapitel 4.3 festgelegten zukünftigen Trinkwasserqualität werden die folgenden Überlegungen getätigt:

Um die Trinkwasserqualität im Sommerbetrieb zu erreichen, kann entweder eine Vollstromaufbereitung (140 m³/h) oder Teilstromaufbereitung erfolgen. Bei der Teilstromaufbereitung haben erste Berechnungen ergeben, dass ca. 110 m³/h des Rohwassers im Schnellentcarbonisierungsreaktor aufbereitet und anschließend mit den restlichen 30 m³/h Rohwasser gemischt werden müssen (vor den Trübstofffiltern), um die Trinkwasserqualität zu erreichen.

Beim Winterbetrieb liegt die maximale Aufbereitungsleistung bei 53 m³/h und somit deutlich unterhalb der Teilstromaufbereitung im Sommerbetrieb. Da gewisse Volumenströme (Geschwindigkeiten) eingehalten werden sollten, um die Schnellentcarbonisierung in einem Reaktor optimal ablaufen zu lassen, liegt die Schwankungsbreite des Volumenstroms aus Sicht von IWW deutlich zu hoch.

Aus Sicht von IWW sprechen die folgenden Aspekte für den zukünftigen Betrieb von **zwei** Reaktoren:

- Gleichbleibende Trinkwasserqualität in den Sommer- und Wintermonaten
- Durchführung von Revisionsarbeiten in den Wintermonaten bei gleichbleibender Trinkwasserqualität
- Schaffung von Redundanzen

Die folgenden Nachteile für einen Betrieb von **zwei** Reaktoren sind zu beachten:

- Höhere Investitionskosten
- Höhere Betriebskosten
- Höherer Wartungsaufwand

Eine weitere Betrachtung ist der Einsatz von Kalkmilch und / oder Natronlauge. Anhand der bereits zuvor getätigten Überlegungen, können generell beide Stoffe für die hier vorliegenden Rohwasserqualitäten verwendet werden. Neben dem teureren Preis der Natronlauge ist ebenfalls zu beachten, dass die Schnellentcarbonisierung mit Natronlauge in aller Regel mit

enteisemtem und entmangantem Wasser durchgeführt wird. Aufgrund der wesentlich geringeren Kalksteinbildung im Prozess kann der Eisenanteil die Pelletbildung sehr viel stärker stören. Weiterhin wird hier meist eine starke Intensivbelüftung vorgeschaltet, damit die Rest-Säurekapazität nicht zu hoch wird. Eine solche leistungsfähige Belüftungsanlage ist jedoch beim Betrieb mit stark eisenhaltigem Wasser sehr störungsanfällig. Alle IWW bekannten Anlagen zur Schnellentcarbonisierung mit Natronlauge werden weitestgehend mit eisenfreiem Wasser betrieben.

Somit könnte als erste grobe Übersicht die neue Verfahrensführung wie folgt aussehen:

- Rohwasserförderung aus den Brunnen 2, 4 und 5
- Schnellentcarbonisierung in **zwei** Reaktoren mit Kalkmilch aus eigener Herstellung (Kalkhydrat-Lösestation)
- CO₂-Dosierung direkt in den Reaktorablauf (noch im Reaktor integriert) → Hiermit wird die Fällungsreaktion gestoppt und die Verkalkung der nachfolgenden Leitungen, Apparaten und Armaturen unterbunden
- Anreicherung mit Luftsauerstoff mittels Oxidator oder Lanze und statischem Mischer
- Verteilung des noch trüben Reaktorablaufs auf die schätzungsweise mindestens **zwei** parallel (zwecks Versorgungssicherheit und Redundanzen besser **vier** Filter) zu betreibenden Mehrschichtfilter
- Filtration über Mehrschichtfilter → Trübstoffentfernung, Restenteisenung und Entmanganung, Nitrifikation (Die Versauerung bei der Nitrifikation senkt den pH-Wert weiter ab, so dass einer Verkalkung des Filters entgegengewirkt wird)
- Speicherung und Verteilung des Trinkwassers

Abbildung 2 zeigt ein mögliches Verfahrensschema für eine zukünftige Wasseraufbereitungsanlage.

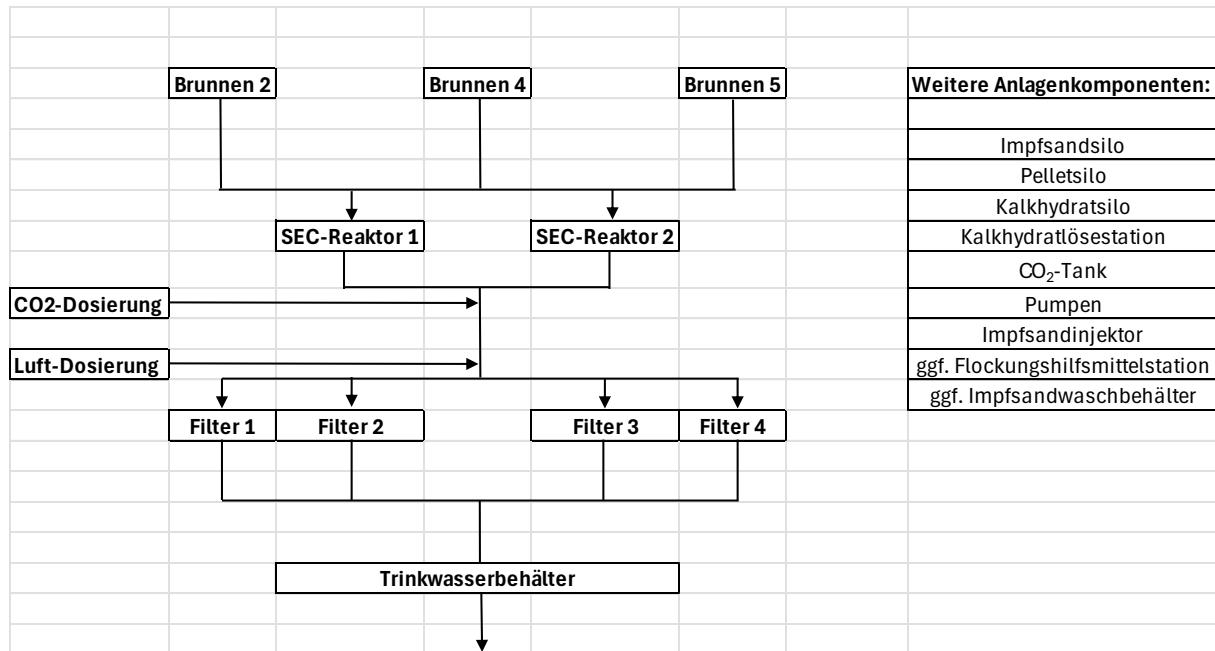


Abbildung 2: Verfahrensschema zukünftige Wasseraufbereitungsanlage

5.2 Platzbedarf

Ausgehend von den IWW bekannten Rohmischwässern der Brunnen 2, 4 und 5, der festgelegten Trinkwasserqualität, einer maximalen Aufbereitung von 140 m³/h (Sommerbetrieb, maximale Aufbereitungsleistung) sowie einer Vollstrom-Entcarbonisierung ergibt sich folgende grobe Dimensionierung des Reaktors:

Tabelle 8: Übersichtsrechnung Dimensionierung Schnellentcarbonisierungsreaktor

	Einheit	Wert	Wert
Anzahl Reaktor	-	1	2
max., Aufbereitungsleistung	m ³ /h	140	70
Gesamthöhe	m	9,8	8,8
Reaktorvolumen	m ³	22	8,5
Durchmesser Mischtopf	m	0,5	0,3
Durchmesser Reaktionszone	m	1,5	1,0
Durchmesser Beruhigungszone	m	2,5	1,6

Neben dem Platzbedarf der Schnellentcarbonisierungsreaktoren kommen im Idealfall **vier** Trübstofffilter hinzu. Ausgehend von einem Volumenstrom von ca. 50 m³/h je Filter Aufbereitungsleistung und einer typischen Filtrationsgeschwindigkeit für Trübstofffilter von etwa 6 m/h ergibt sich eine Fläche je Filter von ca. 8,3 m². Falls als Trübstofffilter Druckfilter

verwendet werden sollen, resultiert daraus ein Durchmesser je Filter von ca. 3,5 m. In Tabelle 9 sind die wesentlichen Dimensionierungsparameter der Trübstofffilter enthalten.

Tabelle 9: Wesentliche Dimensionierungsparameter der Trübstofffilter

	Einheit	Wert
Filterstufen	-	1
Anzahl Filter	-	4
Filterfläche je Filter	m ²	8,3
Durchmesser je Filter	m	3,5
Zyl. Mantelhöhe je Filter	m	3,0
max. Volumenstrom je Filter	m ³ /h	50
max. Filtergeschwindigkeit je Filter	m/h	6,0

Neben dem Platzbedarf für die Schnellentcarbonisierungsreaktoren und den Filtern, müssen weitere Flächen für die folgenden Anlagenkomponenten eingeplant werden:

- Impfsandsilo
- Pelletsilo
- Kalkhydratsilo
- Kalkhydratlösestation
- CO₂-Tank
- Pumpen
- Impfsandinjektor
- Ggf. Flockungshilfsmittelstation
- Ggf. Impfsandwaschbehälter

Die meisten IWW bekannten Betreiber von Schnellentcarbonisierungsanlagen verfügen über einen separaten Gebäudeteil für alle Anlagenkomponenten. Des Weiteren muss im Außenbereich des Wasserwerks die Möglichkeit zur Anlieferung der Verbrauchsstoffe und zur Abholung der Pellets gegeben sein.

6 Grobe Kostenschätzung

Bei den in dieser Studie genannten Kosten handelt es sich um eine grobe Kostenschätzung. Basierend auf Gutachten von IWW, für die teilweise Kosten durch Ingenieurbüros ermittelt worden waren, sowie auf Basis von Informationen aus Fachliteratur wurden die Investitions- und Betriebskosten nach bestem Wissen für die spezifischen Randbedingungen des Wasserwerks berechnet. Einige Eingangswerte der Berechnung wurden geschätzt. Aus Sicht

von IWW ist die Genauigkeit dieser Informationen zum jetzigen Zeitpunkt (Grundlagenermittlung) ausreichend, um einen ersten Überblick zu den Größenordnungen der Investitions- und Betriebskosten zu erhalten.

Bei den Investitionskosten wurden nur die Verfahrenstechnik, E-Technik sowie Ingenieurleistungen / Planungskosten berücksichtigt, welche im direkten Zusammenhang mit einem Schnellentcarbonisierungsreaktor stehen. Da das Wasserwerk neu gebaut werden soll, wurden bei diesen Berechnungen die Gebäudekosten und Filterkosten sowie alle weiteren aufbereitungsrelevanten Anlagenkomponenten nicht mitberücksichtigt. Im Wesentlichen beinhaltet die folgende Investitionskostenberechnung die folgenden Punkte:

- Zwei Schnellentcarbonisierungsreaktoren
- Impfsandsilo
- Pelletsilo
- Kalkhydratsilo
- Kalkhydratlösestation
- CO₂-Dosierung
- CO₂-Tank
- Pumpen, Rohrleitungen, Armaturen, Messtechnik

Des Weiteren wurden zur Ermittlung der Investitionskosten folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- Kosten-Verhältnis von E-Technik zu Verfahrenstechnik: 1:2
- Ingenieurleistungen / Planungskosten: 15 % der gesamten Kosten (Verfahrenstechnik und Elektrotechnik)
- Abschreibungsdauer: 20 Jahre

Die Betriebskosten wurden aus den Eingangsdaten (spezifischer Chemikalien- und Strombedarf, Personalkosten, etc.) berechnet. Folgende Betriebskosten wurden berücksichtigt:

- Chemikalienkosten: Kalkhydrat, Natronlauge, Impfsand (Spezialsand für SEC-Enthärtung)
- Entsorgung: Pelletentsorgung
- Förderkosten: Stromverbrauch für die Förderung des Mehrverbrauchs → 35 Cent/kWh (Nettopreis)

7 Fazit

Die Enthärtung mittels Schnellentcarbonisierungsreaktor ist grundsätzlich möglich. Ablagerungsproblematiken beim Endverbraucher werden so sehr wahrscheinlich deutlich verringert. Ob jedoch die anfallenden Mehrkosten die Enthärtung auf 8°dH rechtfertigen, muss durch den Wasserversorger individuell geprüft werden. Häufig kann eine direkte Umfrage bei den Endverbrauchern hilfreich sein.

IWW Analytik und Service GmbH

Mülheim an der Ruhr, den 29.08.2024

i.V.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'S. Hahn', is written over a horizontal line.

stellv. Bereichsleitung

8 Anhang

Tabelle 11: Detaillierte Kostenberechnungstabelle

Schnellentcarbonisierungsreaktor mit Kalkmilch		
Zielgröße	Härte	8°dH
Variante	Quelle	IWW / Schätzung
Strompreis	€/kWh	0,35
Arbeitsstunde	€/h	45
Ausnutzung Kalkhydrat	%	99%
Kalk an Pellets	%	96%
Kalkmilch	Gew%	20%
Natronlauge	Gew%	50,5%
Kalkhydrat	€/t	169,0
Ca(OH) ₂	€/t	143,9
Natronlauge	€/t	222,6
Kohlensäure (CO ₂)	€/t	203,0
Sandkosten	€/t	74
Sandbedarf (als % des Pellet-Kalksteinanteils)	%	5%
Pelletentsorgung	€/t	12,8
Schlamm Entsorgung	€/t	51,2
Variante		IWW / Schätzung
Zielgröße		8 °dH
Trinkwasserabgabe	m ³ /a	540.000
Eigenwasserverbrauch_konventionell	%	1,00%
Zusätzlicher Spülwasserbedarf Enthärtung	%	0,50%
Anteil Produktwasser Sonderverfahren	%	82%
Ausbeute Sonderverfahren	%	99,5%
Produktwasser Sonderverfahren	m ³ /a	442.800
Zulauf Sonderverfahren	m ³ /a	445.025
Abwasser Sonderverfahren	m ³ /a	2.225
Aufbereitungsleistung konventionell	m ³ /a	542.225
Rohwasserförderung	m ³ /a	550.359
Zusätzliche Rohwasserförderung Enthärtung	m ³ /a	2.247
Zusätzlicher Wasserverbrauch	m ³ /h	2.247
Mittl. Aufbereitungsleistung (20 h/d)	m ³ /h	74
Max. Aufbereitungsleistung	m ³ /h	140
Ca(OH) ₂	g/m ³	127,70
CaCO ₃ (Anfall)	g/m ³	314
CO ₂	g/m ³	3,17
Sandbedarf	g/m ³	15,07
Kalkhydrat (100 %)	kg/m ³	0,134
CaCO ₃ (Anfall)	kg/m ³	0,314
CO ₂	kg/m ³	0,0032
Kalkhydrat (100 %)	t/a	72,6
Sandbedarf	t/a	8,3
CaCO ₃	t/a	169,6
Pelletanfall	t/a	170,9
CaCO ₃ -Schlamm (100 %)	t/a	6,8
CaCO ₃ -Schlamm (20 %)	t/a	22,6
CO ₂	t/a	1,4
Förderhöhe Aufbereitung	m	12
Förderhöhe Brunnen	m	40
Förderhöhe Ableitung	m	5
Pumpenwirkungsgrad (mech. + el.)	%	70%
Elektr. Leistung Rührwerke	kW	4
Elektr. Leistung Dosieranlagen	kW	3
Stromverbrauch für Förderung Aufbereitung	kWh/a	25.210
Stromverbrauch für Mehr-Förderung und Ableitung Rohwasser	kWh/a	498
Sonstiger Stromverbrauch	kWh/a	51.100
Stromverbrauch (Gesamt)	kWh/a	76.310
Kalkhydrat	€/a	12.259
Sandkosten	€/a	610
Pelletentsorgung	€/a	2.188
Schlamm Entsorgung	€/a	1.158
CO ₂	€/a	285
Stromverbrauch	€/a	26.709
Chemikalienkosten + Schlamm Entsorgung	€/a	16.499
Instandhaltung/Ersatzteile	€/a	12.300
Personalaufwand	h/d	1,30
Personalkosten (250 d/a)	€/a	14.625
Betriebskosten	€/a	70.133
spez. Betriebskosten	€/m³	0,130
Investitionen Verfahrenstechnik (20,0 a)	€	600.000
Investitionen Elektrotechnik (20,0 a)	€	300.000
Investitionen Verfahrenstechnik (20,0 a)	€	600.000
Investitionen Verfahrenstechnik, Ingenieurleistungen, Voruntersuchungen (20,0 a)	€	80.000
Investitionen Summe	€	900.000
Betriebskosten	€/a	70.133
spez. Betriebskosten	€/m ³	0,13
Annuität bei Zinssatz 4%	€/a	66.224
jährl. Aufbereitungskosten	€/a	136.356
spez. Aufbereitungskosten	Cent/m³	25,3
spez. Aufbereitungskosten (ohne Abwasserentsorgungskosten)	Cent/m³	25,3
min Erhöhung TW-Preis (Netzverl. ber.)	Cent/m³	26,0