

bbr

Wasser und Rohrbau

Sonderdruck aus Ausgabe 7/1999

Bestimmung der Reaktivität von Kalkprodukten für die Trinkwasseraufbereitung

Hans-Michael Schiffner, Brendan Herbst, Christine Mehling



Rudolf Müller

Bestimmung der Reaktivität von Kalkprodukten für die Trinkwasseraufbereitung



Hans-Michael Schiffner, Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.



Brendan Herbst, Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V.

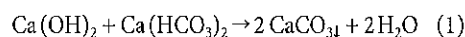


Christine Mehling, Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.

Der Wunsch der Bürger nach gebrauchsgerechtem Trinkwasser erfordert von der Wasserwirtschaft die Aufbereitung der Rohwässer. In der Trinkwasserverordnung [1] werden diesbezügliche Forderungen an die Beschaffenheit von Trinkwasser gestellt. Dies betrifft die Entsäuerung calcitlösender Wässer zum Schutz der Gesundheit der Verbraucher vor Schwermetallbelastungen aus metallischen Hausinstallationen [2] und die Enthärtung von Rohwässern durch Entcarbonisierung.

1. Einleitung

Bei den Verfahren der chemischen Enthärtung und Entcarbonisierung wird der pH-Wert des harten Rohwassers durch Zusatz von Kalkmilch oder Kalkwasser auf einen pH-Wert von 8,5 bis 9,5 eingestellt. Das im Rohwasser vorhandene Calcium wird als Calciumcarbonat aus dem Prozeß entfernt (Gleichung (1)). Gleichzeitig wird die Konzentration an Hydrogencarbonationen verringert (Entcarbonisierung).



Das Lösungsverhalten der dafür eingesetzten Kalkprodukte hängt auch von den Herstellungsbedingungen bei der Kalkproduktion ab. So wird natürlicher Kalkstein durch Brennen mit unterschiedlichen Brennaggregaten und Brennstoffen (Öl, Gas und Kohle) bei Temperaturen zwischen 900 und 1100 °C zu Branntkalk (CaO) entsäuert. Der Branntkalk wird mit Wasser abgelöscht und zum trockenen Weißkalkhydrat (Ca(OH)₂) umgesetzt.

Die Herstellungsbedingungen beeinflussen die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Branntkalles und des gelöschten Kalkes [3]. Die Reaktionsfähigkeit der gelöschten Kalke zeigt sich im Auflösungsvermögen in Wasser und verhält sich in der Reihenfolge ähnlich wie bei den gebrannten Vorprodukten.

Für viele Wasserwerke stellt die Verwendung gebrauchsfertiger Kalkmilch eine Alternative zu den Kalkprodukten in fester Form dar [4, 5]. Insbesondere kommen feindisperse, hochreaktive Kalkhydratsuspensionen, die nach speziellen Verfahren aufbereitet werden [6, 7], zur Anwendung. Diese haben für die Anwendung folgende Vorteile:

- Die Suspension ist quasi sedimentationsstabil
- Die Partikel haben eine hohe Auflösegeschwindigkeit in Wasser
- Bei der Schnellentcarbonisierung ist der Feststoffaustrag aus dem Schnellreaktor geringer als bei der Verwendung handelsüblicher Kalkprodukte. Dadurch wird die nachgeschaltete Filterstufe deutlich entlastet [8].

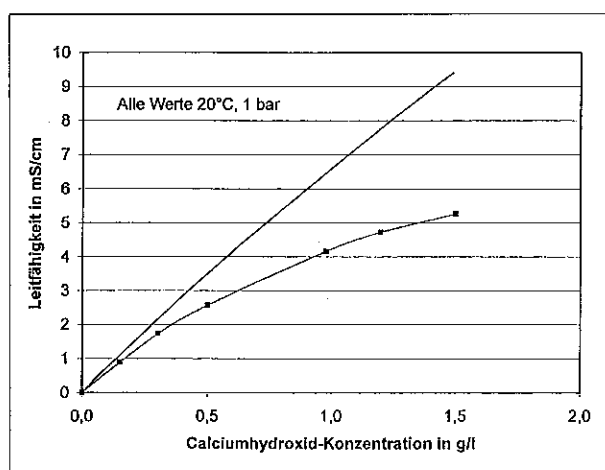


Bild 1: Zusammenhang zwischen Calciumhydroxidkonzentration und Leitfähigkeit bei 20 °C

Die zentrale Enthärtung wird zukünftig aus ökologischen (z. B. zwecks Verringerung des Waschmittelverbrauchs und Verringerung der Schwermetallabgabe aus Rohrwerkstoffen) und ökonomischen Gründen (z. B. aufgrund von Schäden durch Kalkablagerungen

in Heißwasserbereitern und Einsparung durch Verzicht auf private Enthärtungsanlagen) eine wachsende Bedeutung erlangen.

2. Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Auflösengeschwindigkeit von Kalkhydraten

2.1 Einführung

Prüfverfahren werden entwickelt, um bestimmte Eigenschaften einer Produktgruppe erfassen und quantitativ beschreiben zu können.

Der Grund für diese Entwicklung ist in den zunehmenden Anwendungsbereichen für Kalkhydratprodukte im Umweltschutzbereich zu sehen, von denen die Aufbereitung von Trinkwasser an Bedeutung gewonnen hat. Die Qualität der eingesetzten Produkte muß natürlich mit der Weiterentwicklung technischer Prozesse einhergehen, so daß auch die Prüfverfahren für die Produkte eine ständige Angleichung an die technischen Erfordernisse erfahren müssen.

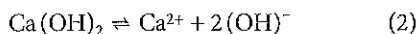
Für den Prozeß der Schnellentcarbonisierung müssen qualitativ hochwertige Kalkmilchprodukte zur Verfügung stehen, die sich durch sehr schnelle Reaktionszeiten und hohe Reinheit auszeichnen, was sich in der Trübung des Reaktorablaufs und damit in der zu filtrierenden Trübungsmenge (»carry-over«) entscheidend bemerkbar macht.

Von den in der Literatur beschriebenen Verfahren, auf die im Abschnitt näher eingegangen wird, hat sich die Bestimmung der Reaktionsfähigkeit durch Messung der Auflösengeschwindigkeit mittels Leitfähigkeitsmessung als das Verfahren erwiesen, das am besten die Übertragbarkeit der Ergebnisse im Labortest auf den technischen Prozeß gestattet. Es ist jedoch erforderlich, die Messung des Parameters Auflösengeschwindigkeit zu standardisieren und die Randparameter der Methode festzulegen.

2.2 Bisher bekannte Arbeiten

Bereits 1970 beschrieb OHNEMÜLLER [9] die Reaktionsfähigkeit von technisch hergestelltem Calciumhydroxid über die Auflösungs geschwindigkeit in Wasser mittels Leit-

fähigkeitsmessung. Dabei wurde der Verlauf der Leitfähigkeitszunahme, verursacht durch die Dissoziation von Calciumhydroxid nach Gleichung (2),



mit einem Linienschreiber festgehalten, der sich aber bei schnell reagierenden Kalkhydraten als zu langsam erwies. Daher wurden verzögernde Wasser/Methanol-Gemische verwendet, um den Lösungsvorgang zu bremsen. 1977 beschrieben BECKER und von ZANDER [10] mit der Messung der Lösegeschwindigkeit von Kalkhydraten über die zeitliche pH-Wert-Messung einen zweiten Weg. Die pH/Zeit-Kurven gestalten aber die Auswertung gerade im Bereich des End-pH-Wertes sehr schwierig, da die Auflösung von 50 % des Calciumhydroxides zwar einen pH-Anstieg von 7 auf 12,36 verursacht, hingegen die Auflösung der letzten 25 % mit einer Änderung des pH-Wertes von 12,52 auf 12,60 verbunden ist.

WITTNEBEN [11] hat 1978 den Einfluß der Reaktionsfähigkeit (Brenngrad, Oberfläche) des Branntkalkes, die Löschwasseremenge, deren Temperatur und Qualität (Fremdionengehalt) sowie die Einwirkung mechanischer Kräfte untersucht. Die Beurteilung der Reaktionsfähigkeit von Kalkhydrat-suspensionen erfolgte anhand der Auflösungs-geschwindigkeit in Wasser mittels Leitfähigkeitsmessungen. Zur Kennzeichnung der Reaktionsfähigkeit wird über die bis zur 80%igen Sättigung benötigte Zeit t_{80} definiert. Im Löschwasser gelöste Stoffe, wie Sulfat und Chlorid, aber auch eine erhöhte Wasserhärte, verringern die Auflösungs-geschwindigkeit infolge von Grießbildung. Der Eintrag hoher Scherkräfte während des Löschvorgangs führt zu einer erhöhten Reaktionsfähigkeit.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimenten erwies sich, daß zur Bestimmung der Reaktivität von Kalkhydraten in Wasser die Messung der zeitlichen Änderung der Leitfähigkeit die höchste Empfindlichkeit aufweist.

Schließlich befaßte sich 1992 das KIWA-Institut [12, 13] mit der Entwicklung einer auf der Leitfähigkeitsmessung beruhenden Prüf-methode, da zu dieser Zeit bereits 25 % der Wasserwerke in Holland mit der Schnellent-carbonisierungstechnik ausgestattet waren. Die Triebfeder für die Entwicklung einer speziellen Meßapparatur war in der Bewältigung des »carry-over« Problems, also der Schlammmenge hinter dem Pelletreaktor, zu sehen.

Anschließend hat das Rheinisch-Westfälische Institut für Wasserchemie und Wasser-technologie (IWW) in Mülheim im Rahmen einer Diplomarbeit [14] intensive Versuche durchgeführt.

2.3 Vergleich der Prüfverfahren nach KIWA und IWW

Bei der Auswertung der Leitfähigkeits-Zeit-Kurven orientiert sich das IWW an den Vorgaben des KIWA-Verfahrens. Die Verfahren sind in ihren Einzelheiten in [12, 14] beschrieben. In der folgenden Tabelle 1 sind die wichtigsten Parameter der beiden Verfahren aufgelistet.

Tabelle 1: Verfahrensparameter der KIWA- und der IWW-Methode im Vergleich

Verfahrensparameter	KIWA-Verfahren	IWW-Verfahren
Leitfähigkeitsmeßgerät	Fa. Radiometer (Kopenhagen), mit analogem Signalausgang	LF 191 der Fa. WTW, mit analogem Signalausgang
Elektrode	Doppelplatinelektrode PP 1042	Feldelektrode LS 1/T-1,5
Aufzeichnungsgerät	2-Kanal-Linienschreiber	Schreiber Servogor, Fa. Goerz, Datenerfassung mit Portalog der Fa. IBP, mit analogem Ausgang
Doppelwändiges Reaktionsgefäß	Volumen 1,5 l	Volumen 0,45 l
Temperaturmessung	PT 100	PT 100
Rührvorrichtung	Flügelrührer	Propellerrührer
Meßtemperatur	25 °C	25 °C
Volumen der Meßlösung	700 ml Wasser	350 ml Wasser
Konzentration der Kalkmilch	Massenanteil 1 %	Massenanteil 1 %
Dosiermenge	10 g	5 ml

Laut KIWA [12] kann die über eine Schreibereinheit aufgezeichnete Leitfähigkeits-Zeit-Kurve am besten durch eine Reaktionsgleichung 1. Ordnung beschrieben werden:

$$\alpha(t) = k \cdot a \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3)$$

Es bedeuten:

$\alpha(t)$ = Leitfähigkeit zur Zeit t

k = Reinheitskonstante des Kalkhydrates

a = Endleitfähigkeit für 100 % reines Ca(OH)_2

t = Zeit nach Zugabe der Kalkmilch

τ = Lösungszeitkonstante

Die Reinheitskonstante k wird aus der Endleitfähigkeit α_{\max} berechnet:

$$k = \alpha_{\max} / a \quad (4)$$

Wird in Gleichung (3) $t = \tau$ gesetzt und die Konstante k durch Gleichung (4) ersetzt, so wird nach Gleichung (5)

$$\alpha(\tau) = 0,63 \cdot \alpha_{\max} \quad (5)$$

die zur Zeit τ gemessene Leitfähigkeit $\alpha(\tau)$ erhalten. Die Lösungszeitkonstante beschreibt also die Zeit $t(63\%)$, die bis zum 63%igen

Umsatz des Kalkhydrates benötigt wird. Die Angabe dieses Wertes zusammen mit der Reinheitskonstanten wird von KIWA als ausreichend angesehen.

Das IWW hat die Bewertung nach Gleichung (5) noch um die Werte für den 80-, 90- und 95%igen Umsatz erweitert.

Die Erhöhung der Anzahl der Auswerteparameter erscheint sinnvoll, da bei dem strengen Bewertungskriterium der KIWA mit

einer Konstante $\tau < 1,7$ s fehlerbehaftete Ergebnisse nicht ausgeschlossen werden können.

2.4 Gründe für die Neuentwicklung eines Prüfverfahrens

Es existieren, aufbauend auf langjährigen Erfahrungen, Prüfverfahren zur Beurteilung der Reaktionsfähigkeit von Kalkhydraten mittels Leitfähigkeitsmessung. Dennoch ist allen diesen Verfahren eigen, daß sie nur einen Laborstandard widerspiegeln, ohne einen weiten Kreis von Anwendern einzubeziehen. Infolgedessen führten »Vergleichsmessungen« zwischen Prüflabor und beispielsweise Herstellerlabor immer zu unterschiedlichen und nicht vergleichbaren Ergebnissen.

2.5 Grundlagen der Leitfähigkeitsmessung

Die Leitfähigkeit einer verdünnten Elektrolytlösung hängt von der Zahl der Ionen (d.h. von deren Konzentration bzw. Aktivität), von den Ladungen pro Ionen und von der Wanderungsgeschwindigkeit bzw. Beweglichkeit ab. Die spezifische Leitfähigkeit α nimmt mit steigender Konzentration ab. Dieser Effekt ist bei Calciumhydroxid, das nach Gleichung (6)

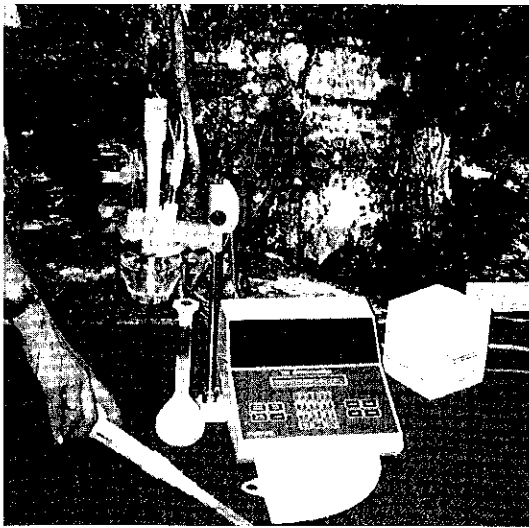
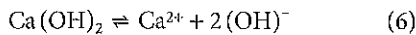


Bild 2: Die verwendete Meßapparatur



dissoziiert, schon weit unter der Löslichkeitsgrenze von 1,6 g Ca(OH)_2 /l gegeben. Aus der Darstellung in Diagramm 1, in dem gemessene Leitfähigkeiten bei 20 °C gegen die zugehörigen Konzentrationen von Lösungen eines technischen Kalkhydrates aufgetragen sind, folgt, daß der lineare Zusammenhang bereits ab einer Konzentration von 300 mg/l Calciumhydroxid nicht mehr gegeben ist.

Die Calciumhydroxidkonzentration der zu messenden Suspensionen sollte daher weit unterhalb von 300 mg/l liegen, damit Konzentrationen und nicht Aktivitäten zur Rechnung verwendet werden können.

2.6 Versuchsplanung

Das Herzstück der Apparatur, das Leitfähigkeitsmeßgerät, muß zu einer digitalen Übertragung der Meßwerte mit hoher Empfindlichkeit und hoher Auflösung fähig sein.

Die durchgeführten Vorversuche ergaben bei Verwendung von Pt-Doppelstabelektroden ein Optimum aus Ansprechzeit und Reproduzierbarkeit.

Bestimmte Voraussetzungen waren aber auch an die Meßzelle hinsichtlich Volumen, Temperierbarkeit durch doppelwandige Bauweise und der Abdichtbarkeit gegen den Zutritt von Raumluft zu richten. Das Titriergefäß-Oberteil mußte Zugänge für ein Rührwerk, eine Begasung mit Inertgas (Stickstoff oder Argon zur Verhinderung von Carbonatisierung durch das Kohlenstoffdioxid der Außenluft), einen Gasauslaß, eine Halterung für die Meßelektrode sowie einen Zugang zum Einspritzen der zu untersuchenden Suspension besitzen. Diese Voraussetzungen sind bei einer über die Firma Metrohm (siehe Bild 2)

zu beziehenden Komplettapparatur gegeben. Sie besteht aus einem 150-ml-Glasgefäß mit Thermostاتمantel und Kunststoffabdeckung mit vier Schlißöffnungen (Nennweite NS 14,5) und einem kompletten Rührwerk aus Rührmotor und Flügelrührer.

2.7 Ringversuche zur Ermittlung der Prüfparameter

Für die Ringversuche sollte die Bestimmung an einer 1%igen und zusätzlich an einer 5%igen Suspension, die nach Messung der Feststoffgehalte der Kalkmilchtypen durch Entnahme eines entsprechenden

Volumens der Kalkmilch hergestellt wurden, durchgeführt werden. Die 5%ige Suspension wurde ausgewählt, da der bereits in der Suspension gelöste Anteil an Calciumhydroxid nur etwa 3,2%, bei der 1%igen Suspension aber bereits 16% beträgt.

Die Ergebnisse für die Lösezeiten t (63%, 80%, 90%, 95%) dieses Ringversuches zeigten allerdings, daß mit einer 1%igen Suspension eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Labors zu erreichen ist. Der Grund dafür ist wahrscheinlich in der geringeren Endleitfähigkeit der 1%igen Suspension im Vergleich zur 5%igen Suspension und dem somit am Gerät kleiner einstellbaren Meßbereich mit höherer Auflösung zu sehen. Infolgedessen sind alle weiteren Versuche mit der 1%igen Suspension durchgeführt worden.

2.8 Versuche zur Reinheitskonstanten

Wie in den Prüfvorschriften des IWW [14] und der KIWA [12] beschrieben, kann

über die maximale Leitfähigkeit der gemessenen Kalkhydratsuspension die Reinheitskonstante k bestimmt werden. Die Reinheitskonstante gibt das Verhältnis der maximalen Leitfähigkeit der gemessenen Kalkhydrate zur maximalen Leitfähigkeit von reinem Calciumhydroxid an.

Entsprechende eigene Versuche zur Reinheitskonstanten wurden an drei repräsentativen Kalkmilchtypen durchgeführt. Hierzu wurden aus den drei Kalkmilchproben Kalkwässer angesetzt und zur Herstellung einer Eichreihe unterschiedliche Mengen entnommen und auf ein Volumen von 100 ml aufgefüllt. Von diesen Eichlösungen wurde die Leitfähigkeit bestimmt. Anschließend wurden die Lösungen über ein Membranfilter abfiltriert und der Calciumgehalt bestimmt. Die Steigung der gemittelten Eichgerade beträgt 12,6 $\mu\text{S} \cdot \text{l}/\text{cm} \cdot \text{mg}$ (siehe Bild 3).

Die Endleitfähigkeit von reinem Calciumhydroxid errechnet sich aus der Calciumkonzentration in der Meßlösung, multipliziert mit der Steigung der Eichgeraden.

2.9 Versuche mit ausgewählten Kalkhydraten

Versuche zur Reinheitskonstanten wurden an ausgewählten Kalkhydraten durchgeführt. Es wurde eine Eichgerade für Kalkwasser erstellt und mittels dieser Steigung die Reinheitskonstante von acht verschiedenen Kalkhydraten bestimmt. Diese Werte sind den nach Arbeitsblatt C 03 der Prüfverfahrensammlung des Bundesverbandes der Deutschen Kalkindustrie bestimmten Anteilen an wasserlöslichem Calciumhydroxid gegenübergestellt.

Wie aus Tabelle 2 zu ersehen ist, stimmen die Reinheitskonstanten und der wasserlösliche Anteil nur bedingt überein. Die Ursache dafür ist darin zu sehen, daß die Steigungen der produktspezifischen Eichgeraden sehr unterschiedlich sind und zur Berechnung der

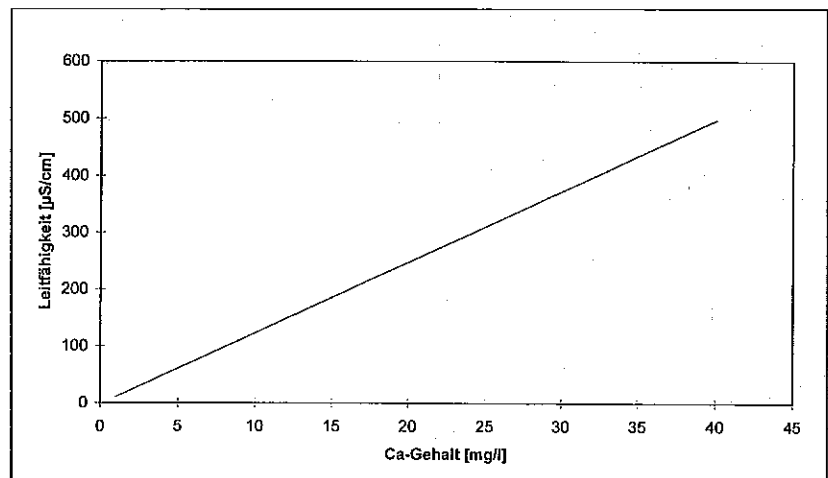


Bild 3: Leitfähigkeit über den Calciumgehalt von drei Kalkmilchproben

Tabelle 2: Leitfähigkeiten und die daraus errechneten Reinheitskonstanten k für 8 Kalkhydrate im Vergleich mit den wasserlöslichen Anteilen

	Proben							
	1	2	5	6	8	9	10	13
κ_{max} [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	844	808	803	810	783	810	828	827
$k_{\text{(gemittelt)}}$	0,93	0,89	0,89	0,89	0,86	0,89	0,91	0,91
Ca(OH) ₂ lösl. [%]	96,5	95,4	91,4	92,4	90,4	92,8	93,0	95,3

Reinheitskonstanten nur die Steigung der gemittelten Eichgerade eingeht. Abweichungen der maximalen Leitfähigkeit der gemessenen Hydrate wirken sich stark auf die daraus berechnete Reinheitskonstante aus. Diese Abweichungen kommen möglicherweise dadurch zustande, daß die Korngrößenverteilung in der dosierten Probe nicht immer identisch ist.

Die Bestimmung der Reinheitskonstanten für ein einzelnes Kalkhydrat sollte daher aus der gemessenen Eichgerade der Leitfähigkeit über der Konzentration für dieses Produkt vorgenommen werden. Für das Prüfverfahren wird auf die Reinheitskonstante verzichtet und statt dessen die Methode zur Bestimmung des wasserlöslichen Anteils von Weißkalken verwendet.

2.10 Versuche zur Homogenisierungszeit

Es sind nur Lösezeiten aussagekräftig, die größer sind als die Zeit, die die Suspension benötigt, um als homogene Mischung im Meßgefäß vorzuliegen. Die Auflösungsgeschwindigkeit schnell löslicher Kalkmilche hängt von verschiedenen Faktoren wie Rührerart, Rührgeschwindigkeit, Gefäßdimension und Position der Meßzelle ab. Deswegen ist die Meßapparatur über meßtechnische Leistungsdaten zu definieren. Für das Verfahren sind Meßgefäße mit einem Meßvolumen von 100 ml besser geeignet als solche mit 500 ml, da eine homogene Mischung schneller erreicht wird.

Im ersten Schritt wurden deshalb die sogenannten Homogenisierungszeiten für verschiedene Meßgefäßdimensionen ermittelt. Die Homogenisierungszeit wurde mit einer 3%igen Kaliumchlorid(KCl)-Lösung gemessen. Die Homogenisierungszeit ist die Zeit, die erforderlich ist, um eine homogene Mischung zu erzielen. Für jedes verwendete Meßgefäß muß eine Homogenisierungszeit von < 2 s eingehalten werden.

Weiterhin ist die Abhängigkeit der Homogenisierungszeit von der Rührerdrehzahl getestet worden. Wie in Bild 4 erkennbar, ist der Kurvenverlauf zur Ermittlung der Homogenisierungszeit bei niedriger Rührerdrehzahl sehr unstetig und zur Messung der Auflösengeschwindigkeit einer Kalkhydratprobe nicht auswertbar. Die Leitfähigkeits-Zeit-Kurve bei hoher Rührerdrehzahl liefert einen wesentlich stetigeren Kurvenverlauf. Die maximal einstellbare Rührergeschwindigkeit ist dann erreicht, wenn die Anzahl der Luftbläschen in der Lösung zu hoch wird und dadurch Schwankungen in der

Leitfähigkeitsbestimmung bewirken bzw. wenn die Trombenbildung so stark ist, daß die Elektrodenflächen freigelegt werden.

2.11 Einfluß der Suspendierbedingungen

Umfangreiche Versuche des IWW [14] haben gezeigt, daß sich das Kornbild der Probe durch Rühren während des Suspendierens verändert und es zu einem verfälschten Ergebnis kommen kann. Die Suspendierzeit bei Suspensionen, die aus Kalkmilchproben hergestellt worden sind, hat keinen Einfluß auf die Lösegeschwindigkeit. Bei Suspensionen, die aus trockenen Kalkhydraten hergestellt wor-

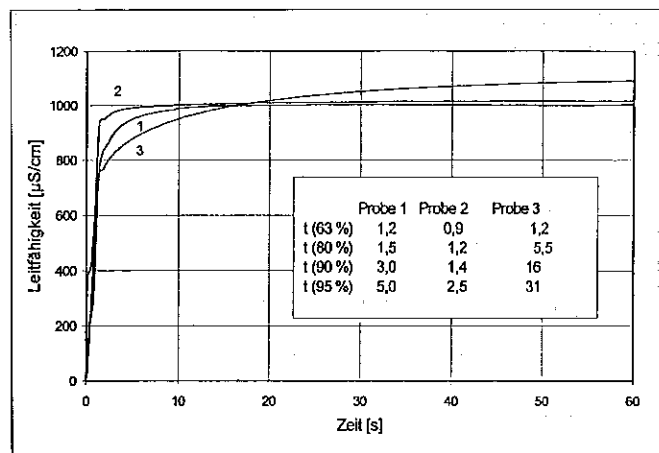


Bild 5: Leitfähigkeits-Zeit-Kurven von drei unterschiedlichen Kalkmilchprodukten

den sind, ändern sich die Lösezeiten mit der Suspendierzeit.

Um den Einfluß der Suspendierbedingungen und der Suspendierzeit auf die Lösezeiten der Proben so gering wie möglich zu halten, werden die Proben vor der Messung 30 Minuten lang ruhig stehen gelassen.

2.12 Auswertung der Leitfähigkeitskurven

Die Auflösungsgeschwindigkeiten von 15 Kalkhydraten sind entsprechend den festgelegten Versuchsbedingungen bestimmt worden. Die untersuchten Kalkhydrate weisen signifikante Unterschiede in den Lösezeiten auf. Dies belegt Bild 5, welches beispielhaft Leitfähigkeits-Zeit-Kurven dreier Proben unterschiedlicher Lösecharakteristik darstellt.

Die Leitfähigkeits-Zeit-Kurve muß bis zum Erreichen der maximalen Leitfähigkeit aufgezeichnet werden, wobei alle 0,1 s ein Wert registriert wird. Die Startzeit ($t = 0$) wird für den ersten Meßwert festgesetzt, an dem sich die Leitfähigkeit um mehr als $20 \mu\text{S}/(\text{cm} \cdot 0,1 \text{ s})$ ändert.

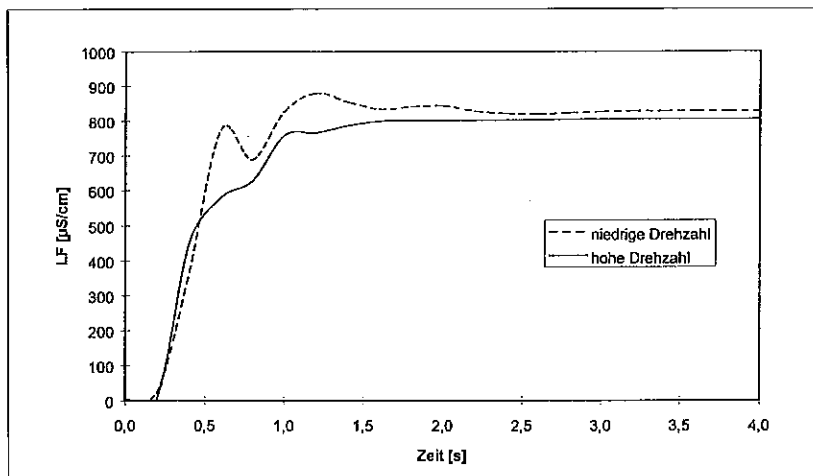


Bild 4: Homogenisierungszeit bei unterschiedlichen Rührerdrehzahlen

nicht genügt, sondern zusätzlich zur Charakterisierung des Löseverhaltens weitere t (x %)-Werte herangezogen werden müssen.

Das neuentwickelte Verfahren ist u. a. gut geeignet, Unterschiede in der Qualität verschiedenartiger Kalkhydratsuspensionen zu erkennen (feindisperse, hochreaktive Kalkmilch, Kalkmilch aus Trockenhydrat, Kalkmilch aus Feinkalk).

4. Danksagung

Wir danken Herrn Dipl.-Ing. D. Stetter, IWW sowie den Herren Dr. S. Luger und Dipl.-Ing. H.-G. Brendl, Schäfer Kalk, Herrn Dr. U. Giltzau, Kalkwerk Oetelshofen, Herrn L. Reinery, Rheinische Kalksteinwerke, und Herrn Dipl.-Ing. P. Schmidt, RWK Kalk AG, für ihre Mitarbeit im projektbegleitenden Ausschuß. Weiter danken wir dem Bundesminister für Wirtschaft (BMWi), der dieses im Rahmen eines von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) unter der Nummer 10345N durchgeführte Forschungsvorhaben gefördert hat. ☺

Alle Abbildungen: Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e. V.

Literaturhinweise

- [1] Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe. (Trinkwasserverordnung- TrinkwV) vom 12.12.1990, BGBl, (1990) I, S. 2612-2629
- [2] MEYER, E. (1986): Zur Einschätzung der Notwendigkeit der Entsäuerung aus der Sicht des Verordnungsgebers. - 1. Mülheimer Wassertechnisches Seminar vom 25. September 1986 »Die Entsäuerung - ein neues Gebot der Trinkwasserverordnung«, Heft 1, Universität Duisburg
- [3] WITTNEBEN, U. (1980): Untersuchungen zur Teilchengrößenverteilung in Kalkhydratsuspensionen. - Forschungsbericht Nr. 1/80, Forschungsgemeinschaft der Deutschen Kalkindustrie e. V., Köln
- [4] REINERY, L. (1995): Optimierte Schnellentcarbonisierung von Trink- und Brauchwasser mit gebrauchsfertiger »feindisperser« Kalkmilch. - Vortrag anlässlich Ausstellerseminar ENVITEC '95
- [5] BRENDL, H.-G. (1995): Optimierung einer Schnellentcarbonisierung in der Trinkwasseraufbereitung mit hochreaktiver Kalkmilch. - Vortrag anlässlich Ausstellerseminar ENVITEC '95
- [6] STETTER, D., BEFORTH, H., KEMOUGNE, D., FÖRSTER, E., OVERATH, H. (1987): Sedimentationsstabile Kalkmilch - ein neuer Weg zur Trinkwasser-Entsäuerung. - *bbr Wasser und Rohrbau*, 38. Jahrgang, Heft 11, 1987, S. 409-414, Verlagsgesellschaft R. Müller, Köln
- [7] BEFORTH, H. (1990): Feindisperse Kalkmilch - praktische Fortschritte zur Trinkwasseraufbereitung. - *bbr Wasser und Rohrbau*, 41. Jahrgang, Heft 11, 1990, S. 556-562, Verlagsgesellschaft R. Müller, Köln
- [8] BEFORTH, H. (1994): Zentrale Trinkwasserenthärtung mittels Schnellentcarbonisierung mit Kalk. - *bbr Wasser und Rohrbau*, 45. Jahrgang, Heft 8, 1994, S. 28-32, Verlagsgesellschaft R. Müller, Köln
- [9] Ohnemüller, W. (1970): Herstellung reaktionsfähiger Trockenhydrate. - Technische Tagung Salzburg
- [10] BECKER H., von Zander H. (1977): Über die Lösungsgeschwindigkeit von Kalkhydraten. - Zement-Kalk-Gips, Nr. 30, 1977, S. 381
- [11] WITTNEBEN, N. (1978): Untersuchungen zur Reaktionsfähigkeit und Viskosität wäßriger Kalksuspensionen. - Forschungsbericht Nr. 3/78, Forschungsgemeinschaft der Deutschen Kalkindustrie e.V., Köln
- [12] VAN EEKEREN, VAN PAASSEN, MERKS (1993): Improved milk-of-lime for softening of drinking water. - KIWA N. V. Research and Consultancy, Nieuwegien
- [13] MERKS, VAN EEKEREN, VAN DER JAGT (1992): Voorschrift kwaliteitstest kalkmelk. - KIWA, Nieuwegien
- [14] MÖHLE, E. (1994): Optimierung einer Methode zur Bestimmung und Beurteilung der Lösegeschwindigkeit der Kalkhydratsuspensionen und Untersuchung von Produktproben verschiedener Hersteller und Bereitungsanlagen. - Bereich Wasserchemie des Rheinisch-Westfälischen-Instituts für Wasserchemie und Wassertechnologie, Mülheim a. d. R.
- [15] BECKER, H. (1986): Der Einfluß des Rührens und der Diffusion bei der Auflösung von Kalkhydraten. - Zement-Kalk-Gips, Heft 5, 1986, S. 273 ff.
- [16] RUTTEN, P., URBAN, F. (1998): Enthärtungsanlage im Nebenschluß. - *gwf Wasser · Abwasser*, 139. Jahrgang, Nr. 8, 1998, S. 497, R. Oldenbourg Verlag, München