sofw journal
Home & Personal Care Ingredients & Formulations
powered by SOFW

Biologisch inspiriert: Keimbekämpfung durch HClO-Hydrogele mit Smektiten

J. Gödeker, A. Drewer, T. Lamont

SOFW Journal 12/22 S. 2-7 | 148 Jahrgang | Thannhausen, 20. Dezember 2022

Biologisch inspiriert: Keimbekämpfung durch HClO-Hydrogele mit Smektiten

J. Gödeker, A. Drewer, T. Lamont

Abstract

Hypochlorige Säure (HClO) wird in den weißen Blutzellen von allen Säugetieren gebildet [1]. Als Teil eines Mechanismus, der sich vor vielen Millionen Jahren entwickelt hat, hilft sie auch im menschlichen Organismus, eindringende Pathogene abzuwehren. Das macht die schwache Säure zu einer der Natur nachempfundenen Option zur Desinfektion. Nichtsdestotrotz haben wasserdünne Lösungen einer hypochlorigen Säure den großen Nachteil, dass sie sehr schnell abfließen und damit durch die verringerte Kontaktzeit das anti-mikrobielle Potential deutlich einschränken. Hydrogele überwinden diese Limitierung und führen zu einer verbesserten und nachhaltigeren Verwendung. Aufgrund der hohen Reaktivität der hypochlorigen Säure sind übliche Additive wie organische Polymerverdicker und natürliche Tonmineralien nicht geeignet. Synthetische Smektittone – zu denen ebenfalls das hier vorgestellte PURABYK-R 5500 gehört – sind den natürlichen Tonmineralien in der Struktur sehr ähnlich. Sie weisen jedoch durch ihre technische Weiterentwicklung eine bessere Stabilität auf und eignen sich daher hervorragend zur Ausbildung dieser Hydrogele. Sie stabilisieren die hypochlorige Säure in dem notwendigen pH-Wert-Bereich und sind frei von Komponenten, die die Aktivität der HClO beinträchtigen. Diese einzigartigen Additive werden unter kontrollierten Bedingungen aus natürlich vorkommenden anorganischen Mineralienquellen hergestellt. Sie bieten die Möglichkeit, Strukturen aus der Natur zu nutzen, gepaart mit einer sehr hohen Reinheit und gleichbleibender Qualität. Ihr großes Potenzial soll am Beispiel des PURABYK-R 5500 hier vorgestellt werden.

1. Einleitung

Durch die COVID-19 Pandemie hat sich bei vielen Menschen das Bewusstsein für Sauberkeit fast über Nacht verändert [2]. Die erhebliche Bedeutung von Hygiene und Eindämmung mikrobieller Kontamination für unsere Gesundheit sind dabei nochmal mehr in den Fokus getreten und das Bedürfnis nach Hygienemaßnahmen ist deutlich gewachsen. Dies zeigt sich auch im merklich gestiegenen Umsatz von Hygieneprodukten insbesondere zwischen 2019 und 2020 [3].

Chemische Substanzen, mit denen potenziell schädliche Mikroorganismen wie Bakterien, Hefen und Pilze bekämpft und Viren inaktiviert werden, fallen unter den Begriff der anti-mikrobiellen Wirkstoffe. In Haushaltsanwendungen geht es dabei vor allem um die Eindämmung von schädlichen Mikroorganismen. Um gesundheitliche Risiken abzuwenden, soll eine Kontamination von Oberflächen und Übertragung von Krankheitserregern durch pathogene Keime reduziert werden. Die Suche nach möglichst nachhaltigen und sicheren Produkten zur Gewährleistung der für unsere Gesundheit notwendigen Hygiene ist aktueller denn je.

Hypochlorige Säure – eine effektive, der Natur nachempfundene Waffe gegen Keime

Das außergewöhnliche biomedizinische Potential von hypochloriger Säure ist bereits seit Langem bekannt. Bereits im ersten Weltkrieg wurde aus Ermangelung an Antibiotika HClO zur Wunddesinfektion eingesetzt [4]. Ihre sehr hohe Effizienz als anti-mikrobielle Substanz wird auch heute noch in zahlreichen Reinigungsanwendungen sowie im Bereich der äußerlichen Anwendungen und der Wundversorgung genutzt. Da hypochlorige Säure auch im menschlichen Körper eine essenzielle Rolle bei der Abwehr einer Vielzahl von schädlichen Erregern spielt[1], wird sie als sichere, der Natur nachempfundene Option zur Bekämpfung von Keimen gesehen. Sie wird als endogene Substanz in allen Wirbeltieren als Teil der Immunantwort von den weißen Blutzellen gebildet [1]. Beim Menschen bestehen die weißen Blutzellen v.a. aus neutrophilen Granulozyten (kurz: Neutrophilen). In diesen wird das Oxidationsmittel HClO entweder extrazellulär oder intraphagosom (innerhalb der Zelle) gebildet. Das Häm-Enzym Myeloperoxidase (MPO) nutzt dabei Wasserstoffperoxid und Chlorid, um die Produktion von HClO zu katalysieren (siehe **Abbildung 1**) [5].

Unsere weißen Blutzellen nutzen diesen Mechanismus, indem sie schädliche Mikroorganismen aufnehmen und anschließend mit hypochloriger Säure als Oxidationsmittel unschädlich machen. HClO durchdringt sehr schnell die Zellwände einzelliger Mikroorganismen wie Bakterien und Viren [6]. Sie oxidiert die dortigen Proteine inklusive der DNA (deoxyribonuleic acid, deutsch: Desoxyribonukleinsäure) der schädlichen Keime. Durch Chlorierung von N-Funktionalitäten in den Strukturen der Mikroorganismen werden Chloramine gebildet, die wiederum instabil sind und weiter radikalisch zerfallen. Dies führt zu einer Zerstörung der DNA von Viren und

damit zu deren Inaktivierung [7].

In ähnlicher Weise führt die oxidative Kraft der HClO dazu, dass Zellmembranen und Proteine von Bakterien und Viren denaturiert werden. Dies führt zu einem sehr breiten Anwendungsspektrum gegenüber allen Arten von schädlichen Mikroorganismen. Menschliche Zellstrukturen werden dabei nicht verletzt, da ihre Strukturen höher organisiert sind und sie einen schützenden Mechanismus entwickelt haben, der eine Schädigung durch hypochlorige Säure verhindert [6]. Ein erheblicher Vorteil gegenüber anderen Wirksubstanzen ist dabei auch die Schwierigkeit für Bakterien, eine Resistenz gegenüber HClO durch Mutation zu entwickeln. Die hypochlorige Säure ist ebenfalls wirksam gegen die Sporen der Bakterien und hebt sich damit ab von den weit verbreiteten Hygieneprodukten auf alkoholischer Basis (Ethanol, Isopropanol) [4]. Auch eine Irritation der Haut, wie sie bei häufiger Nutzung von Isopropanol und Ethanol auftreten kann, kann durch den Einsatz einer wässrigen Formulierung der schwachen Säure vermieden werden [4]. All diese Eigenschaften machen die hypochlorige Säure zu einem leistungsstarken Mittel im Kampf gegen Keime und dies veranlasste auch die Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization, abgekürzt WHO), den Einsatz von HClO gegen das COVID-19-(SARS-CoV2-)Virus zu empfehlen [8].

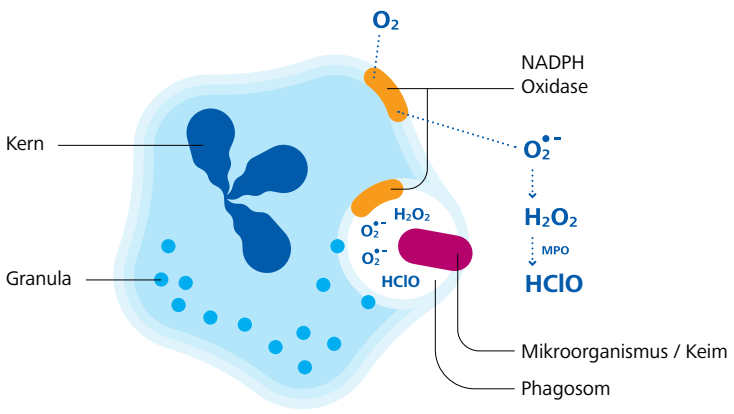

Abb. 1 Schematische Darstellung der HClO-Generierung als Immunantwort in weißer Blutzelle

Es gibt jedoch einige Herausforderungen, die überwunden werden müssen, um die Säure auch außerhalb des Körpers möglichst effektiv einsetzen zu können. Hypochlorige Säure ist nur in wässriger Lösung stabil und steht in einem Gleichgewicht mit ihrer konjugierten Base Hypochlorit (ClO^-). Diese ist um ein Vielfaches weniger reaktiv. Bei höheren pH-Werten verschiebt sich das Gleichgewicht in Richtung Hypochlorit und die oxidative Wirkung nimmt ab. Wird die Mischung zu sauer, entsteht freies Chlorgas (Cl_2).

Um das volle anti-mikrobielle Potenzial nutzen zu können, muss die hypochlorige Säure in einem pH-Bereich von 5 bis 7 stabilisiert werden. Es muss weiter beachtet werden, dass aufgrund der hohen Reaktivität eine Anwesenheit von organischen Substanzen sowie Übergangsmetallionen weitestgehend ausgeschlossen werden müssen. Andernfalls kommt es zur Zersetzung und zum Abbau der hypochlorigen Säure. Einfache, wasserdünne HClO-Lösungen haben zudem den großen Nachteil, dass sie sehr schnell ablaufen und das antimikrobielle Potential damit erheblich einschränken. Durch die niedrige Viskosität der Lösungen reduziert sich die Kontaktzeit mit der zu reinigenden Oberfläche, was zu einer kürzeren Wirkzeit führt. Insbesondere eine vertikale Anwendung ist nur sehr eingeschränkt möglich. Hydrogele überwinden diese Limitierung und führen zu einer verbesserten und nachhaltigeren Verwendung.

Hydrogele auf Basis von HClO – ein herausforderndes System

Die ausgeprägte Reaktivität von HClO macht es gleichzeitig herausfordernd, einen geeigneten Rheologiemodifizierer zu finden, um Hydrogele auf Basis von hypochloriger Säure auszubilden. Die Aktivität der HClO wird durch organische Chemikalien abgeschwächt, daher können keine organischen Polymerverdicker eingesetzt werden. Außerdem stört die Präsenz von Übergangsmetallionen, weshalb auch natürlichen Tonmineralien nicht in Frage kommen. Neben den natürli-

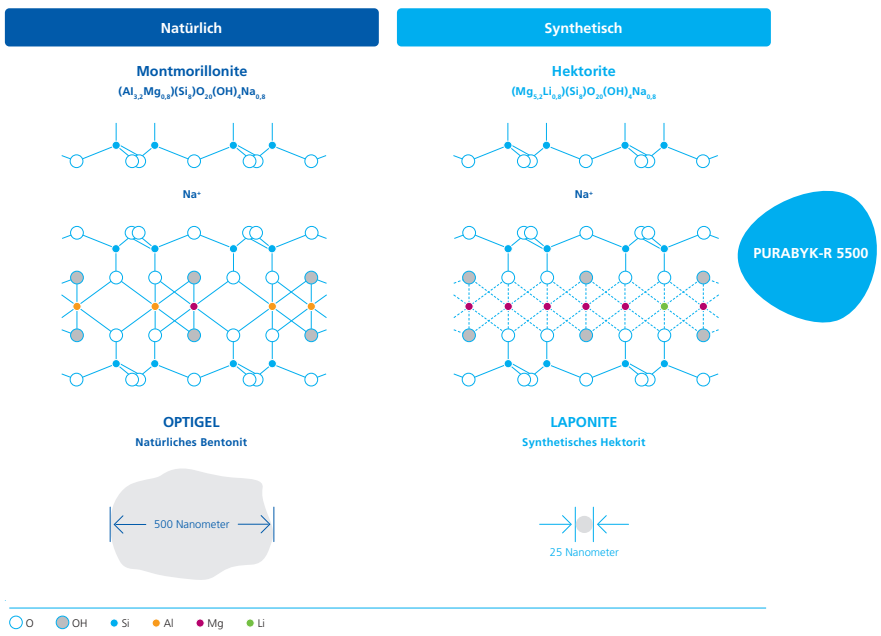

Abb. 2 Kristallstrukturen der Schichtsilikate: Natürliche und synthetische Smektitverbindungen

chen Tonmineralien, die in zahlreichen Anwendungen aufgrund Ihrer rheologischen Eigenschaften eingesetzt werden, ist es aber ebenfalls möglich, ähnliche Strukturen mit verbesserter Stabilität und Reinheit synthetisch darzustellen. Bentonite sind natürliche Tone, deren rheologische Eigenschaften durch die Anwesenheit von Smektitstrukturen bestimmt werden [9]. Diese Strukturen sind ebenfalls in den synthetischen Schichtsilikaten (Phyllosilikate, LAPONITE) zu finden. Diese der Natur nachempfundenen Substanzen sind einzigartige Spezialadditive, die die gewünschten Eigenschaften (wie Quellvermögen, Verdickung, Thixotropie) mit einer hohen Reinheit sowie einer außergewöhnlichen Stabilität gegenüber starken Oxidationsmitteln wie hypochlorige Säure vereinen. Dies macht sie zu einem perfekt geeigneten Additiv für die Bildung von Hydrogelen auf Basis von HClO. Wie in **Abbildung 2** dargestellt, gehören die LAPONITE zur Schichtsilikatgruppe der Smektite und ähneln im Aufbau der Kristallstruktur der natürlichen Tonmineralien.

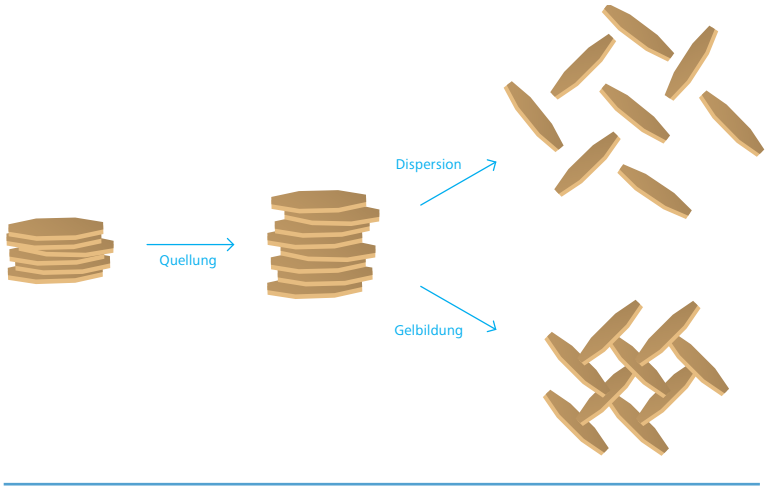

Abb. 3 Dispersion der Smektit-Plättchen in Wasser: Ausbildung der Gelstruktur

PURABYK-R 5500 – Neuartig modifiziertes Schichtsilikat mit verbesserter Kompatibilität

Das neu entwickelte und in diesem Artikel präsentierte PURABYK-R 5500 gehört zu der Gruppe der Hektorite, dessen Kristallstruktur sich aus verschiedenen Schichten zusammensetzt. Jede Silikatschicht besteht aus einer Oktaederschicht, die aus Magnesiumionen besteht, die oktaedrisch von Sauerstoffionen umgeben und miteinander verbunden sind. Diese Schicht ist in einer Art Sandwichstruktur zwischen zwei Schichten aus [SiO_4]-Tetraedern eingefasst.

In die Zwischenschichten lagern sich leicht Wassermoleküle und andere Stoffe unter Vergrößerung des Schichtabstandes ein. Dies bezeichnet man auch als „innerkristalline Quellung" [9]. Die Kristalle dieser Verbindungen ordnen sich im trockenen Zustand als Stapel an. Wenn sie in Wasser dispergiert werden, bilden sie separierte scheibenförmige Plättchen. Durch elektrostatische Wechselwirkungen bilden diese Plättchen ein 3-dimensionales Netzwerk („House-of-Cards"-Struktur) aus, welches zum gewünschten rheologischen Effekt führt **(Abbildung 3)**.

Ein weiterer Unterschied zu den natürlichen Tonmineralverdickern ist die deutlich verringerte Größe der einzelnen Plättchen nach Dispersion. Dies führt zu einer erhöhten Transparenz in den Formulierungen.

Das PURABYK-R 5500 wurde speziell für die Ausbildung dieser Hydrogele entwickelt. Durch gewisse Modifizierung dieser synthetischen Phyllosilikate erhöht sich ihre Toleranz gegenüber Elektrolyten. Dies spielt insbesondere beim Einsatz von hydrochloriger Säure eine große Rolle. In vielen Fällen wird HClO großtechnisch durch Elektrolyse einer hochkonzentrierten Natriumchloridlösung hergestellt. Dadurch können Salzreste nicht ausgeschlossen werden. PURABYK-R 5500 als Weiterentwicklung bestehender LAPONITE Rheologieadditive toleriert Salzgehalte von bis zu 4 % und kann direkt hinzugegeben werden ohne Vordispersion **(Abbildung 4)**.

INCI: Sodium magnesium fluorosilicate (nano) and tetrasodium pyrophospate

Zugabemethode	Wenig NaCl (< 2 %)	Mehr NaCl (> 2 %)
Vordispersion	●	●
Direkte Zugabe	●	–

Geeignet für Anwendung in HClO Lösungen mit bis zu 4 % NaCl Anteil.

- Bei 2 % NaCl oder weniger, kann das Produkt direkt zur HClO Lösung gegeben werden.
- Falls der NaCl Anteil höher als 2 % ist, muss das Produkt vor Zugabe zur HClO in Reinstwasser vordispergiert werden.

Abb. 4 PURABYK-R 5500 als Weiterentwicklung für einfache Verwendung in HClO-Lösungen

2. Material und Methoden

Formulierung des Hydrogels mit PURABYK-R 5500

Die dargestellten Ergebnisse wurden anhand eines Hydrogeles auf Basis von hypochloriger Säure ermittelt. Dazu wurde durch direkte Zugabe des PURABYK-R 5500 zur wässrigen Lösung einer hypochlorigen Säure eine Verdickung erzielt. Besonders nach Einstellen des pH-Wertes mittels Orthophosphorsäure auf 5,0–5,5 erhöht sich die Viskosität der Mischung deutlich. Der pH-Wert stabilisiert sich typischerweise bei 6,5. Die Formulierung ist in **Tabelle 1** gezeigt.

Dabei wird ein leicht trübes Hydrogel erzeugt, dass sich angenehm und nicht klebrig auf der Haut anfühlt. Im Lagertest zeigt sich, dass die Viskosität auch nach 12 Wochen Lagerung bei 40 °C weiter stabil ist und die Gelstruktur erhalten bleibt.

Pos.	Komponente	Funktion	Gewicht [g]
1	Reinstwasser	Lösungsmittel	16,0
2	Hypochlorige Säure 500 ppm FAC	Aktivsubstanz	80,0
3	**PURABYK-R 5500**	**Rheologieadditiv**	**3,5**
4	Ortho-Phosphorsäure (21 % in Wasser)	Einstellung pH-Wert	0,5.

Tabelle 1 Formulierung des Hydrogels

An der gezeigten Formulierung wurden die im folgenden Abschnitt diskutierten Untersuchungen zur weiteren Charakterisierung des entstandenen Hydrogeles durchgeführt.

Bei genauerer Betrachtung – hochauflösende Verfahren zur Abbildung der Nanostrukturen

Die Smektit-Plättchen bewegen sich im Nano-Größenmaßstab. Dies hat zur Folge, dass die Auflösung einfacher Lichtmikroskope zur Darstellung der Morphologie nicht ausreicht, da diese durch die Wellenlänge des Lichtes physikalisch begrenzt ist. Um diese Strukturen dennoch als wirkliches Bild darzustellen zu können, sind anspruchsvolle Präparationen und Analysenmethoden notwendig. Als bildgebende Verfahren eignet sich zum einen die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM). Nach Louis de Broglie haben auch Elektronen Welleneigenschaften und man kann von einer Wellenlänge der Teilchen sprechen [10,11]. Da die angenommenen Wellenlängen der Elektronen deutlich kleiner sind als die Größenordnung der Plättchen, lassen sich mittels Elektronenmikroskopie Nano-Strukturen gut abbilden. Hierbei werden dünne Probenschichten einem hochenergetischen Elektronenstrahl ausgesetzt und nach Transmission der Probe die Elektronen auf einem Detektor erfasst [10,11]. Durch die unterschiedliche Streuung der Elektronen beim Durchqueren der Probe können Rückschlüsse über die Größe und Beschaffenheit der Substanz gezogen werden. Mittels dieser hochauflösenden Methode kann sogar die Netzwerkstruktur der Plättchen dargestellt werden, die zum rheologischen Effekt führt („House-of-Cards"-Struktur). Insbesondere die sogenannte Cryo-TEM ist ein sehr gutes Werkzeug um die Interaktionen in Lösung „einzufrieren" und realistisch abzubilden.

Der Grad der Exfolierung der Smektit-Plättchen in Dispersionen lässt sich durch eine Rasterkraftmikroskop-basierte (engl. AFM: atomic-force-microscopy) Höhenbestimmung ermitteln. Bei dieser nicht-invasiven Methode wird eine nanoskopisch kleine Nadel über die Oberfläche der Probe geführt. Die dabei entstehenden Kräfte zwischen der Probe und der Messnadel (Cantilever) werden gemessen und zur Bildgebung ausgewertet [12].

3. Ergebnisse und Diskussion

Mikro- und Makro-Morphologie mittels TEM und AFM

In **Abbildung 5** ist die Cryo-TEM-Aufnahmen eines Hektorits in wässriger Dispersion zu sehen. Dabei ist gut die Netzwerkstruktur („House-of-Cards"-Struktur) zu erkennen, die die exfolierten Plättchen durch elektrostatische Wechselwirkung ausbilden. Dies führt zu dem gewünschten rheologischen Effekt, nämlich in diesem Fall der Ausbildung eines thixotropen Hydrogels. Auch eine Stabilisierung von verschiedenen Partikeln (Trübungsmittel, Duftkapseln etc.) ist durch Einlagerung in dieses Netzwerk der Plättchen möglich und durch die Abbildung gut vorstellbar. Es ist ebenfalls zu sehen, dass sich die Dimensionen der einzelnen Smektit-Plättchen entlang der zwei in dieser Ebene gezeigten Achsen im Bereich von 25 nm bewegen. In Abhängigkeit der Konzentration des Hektorits bilden die Plättchen ein räumlich weniger dichtes oder dichteres Netzwerk.

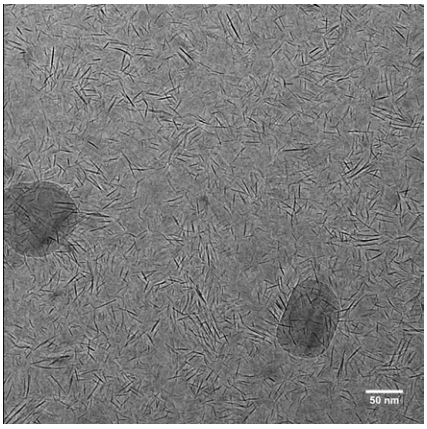

Abb. 5 Cryo-TEM-Aufnahmen eines dispergierten Hektorits, JEOL 2200FS TEM mit einem Gatan K2 Elektronendetektor (University of Warwick, UK)

Das Ausmaß der Exfolierung der Plättchen in wässriger Dispersion lässt sich durch eine topographische Auswertung mittels AFM-Methode ermitteln. **Abbildung 6** zeigt die dazugehörige AFM-Aufnahme des hier vorgestellten Hektorits.

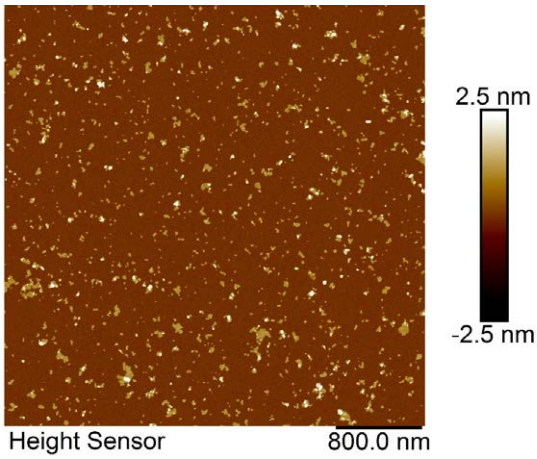

Abb. 6 AFM-Aufnahme des Hektorits in Lösung, Bruker Icon-PT instrument

Es ist deutlich erkennbar, dass die Smektit-Plättchen homogen verteilt vorliegen.

Über die Höhenverteilung können dann Angaben darüber getroffen werden, welcher Anteil an Smektit-Plättchen einzeln, doppelt, dreifach usw. gestapelt vorliegt. Eine Auswertung der gemessenen Daten ergibt, dass die Mehrzahl (kumulativ 73,6 %) sich im Höhenbereich unterhalb von 1,75 nm befinden und daher als vollständig exfoliert gelten. Es gibt keine Plättchen, die mehr als dreifach-gestapelt vorliegen (kumulativ 100,0 % im Bereich 2,75 nm bis 3,25 nm). Somit kann von einer guten Delaminierung gesprochen werden.

HCIO-Hydrogel mit PURABYK-R 5500

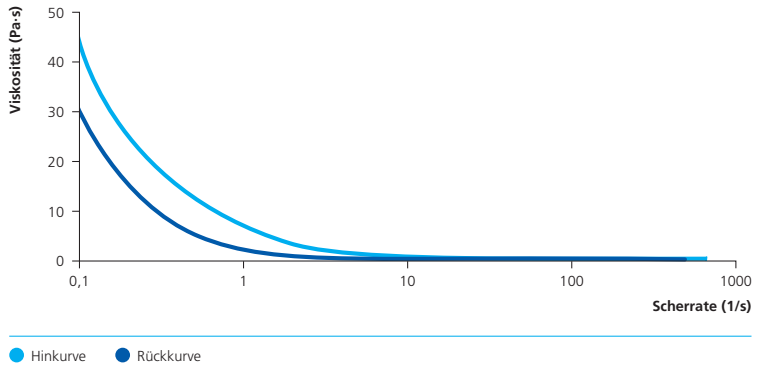

Abb. 7 Viskositätskurve, 12 h nach Einarbeitung des PURABYK-R 5500

Viskositätsverhalten des Hydrogels – Thixotropie und Fließgrenze

Die wässrige Formulierung auf Basis von hypochloriger Säure mit 3,5 % PURABYK-R 5500 bildet ein Hydrogel aus, welches ein thixotropes Verhalten aufweist. In **Abbildung 7** ist zu erkennen, dass sich bei niedriger Scherung eine gute Viskosität ausbildet, diese jedoch unter Erhöhung der Scherrate deutlich einbricht (siehe blaue Kurve). So entsteht eine dünnflüssige und gut versprühbare Lösung. Die Viskosität baut sich nach Entfernung der Kraft wieder auf, jedoch etwas verzögert (orangene Kurve). Die Ursprungsviskosität des Hydrogeles wird jedoch schnell wieder erreicht.

Im Vergleich zweier Proben (eine wurde direkt nach Einarbeitung des PURABYK-R 5500 vermessen, die andere wurde 12 h stehen gelassen) zeigt sich ebenfalls, dass sich die Gelstruktur zwar sehr rasch nach Einarbeitung des Rheologieadditives ausbildet, es jedoch einige Stunden dauern kann, bis sich die Endviskosität vollständig ausgebildet hat.

Durch weitere Messungen konnte ebenfalls ermittelt werden, dass das Hydrogel auf Basis von PURABYK-R 5500 eine deutliche Fließgrenze ausbildet, oberhalb derer die Probe kein elastisches Verhalten (Gel-Struktur) mehr zeigt, sondern zu fließen beginnt. Dies unterstützt die gute Sprühbarkeit und Pumpbarkeit des Hydrogels, was die Handhabung je nach Anwendung deutlich verbessert.

Biozide Wirksamkeit – Einfluss von PURABYK-R 5500

Prüfungen zum Einfluss des PURABYK-R 5500 auf die biozide Wirksamkeit des HClO Hydrogels wurden im akkreditierten Prüflabor HygCen Germany GmbH umgesetzt. Dazu wurden quantitative Suspensionstests der Phase 2, Stufe 1 mit verschiedenen Standard-Bakterien- und Virenstämmen durchgeführt. Bei den Austestungen wurde nach der Prüfmethode EN 13727 (bakterizide Wirkung) bzw. EN 14476 (viruzide Wirkung) mit einer niedrigen Belastung (0,3 g/l Rinderserumalbumin) vorgegangen. Es zeigte sich, dass unter Zugabe von 3.5 % PURABYK-R 5500 die biozide Wirksamkeit gegenüber Bakterien sowie Viren vollständig erhalten bleibt. Die nach EN 13727 und EN 14476 gegebenen Kriterien werden auch im durch das Schichtsilikat ausgebildeten Hydrogel erfüllt.
Abhängig von der Praxisanwendung und dem konkreten Prozess müssen ggf. Tests der Phase 2, Stufe 2 ergänzt werden. Es kann jedoch auf Grundlage des jahrzehntelangen erfolgreichen Einsatzes dieser synthetischen Hektoritverbindungen in diesen Anwendungen davon ausgegangen werden, dass der Einsatz des Rheologieaddtives zu keiner Beeinträchtigung der bioziden Wirksamkeit der Aktivsubstanz und damit des Produktes führt. Die hier erwähnten Suspensionstests am Hydrogel stützten diese Erfahrung.

4. Schlussfolgerung

Synthetische Schichtsilikate wie das hier vorgestellte PURABYK-R 5500 sind sehr vielseitige Additive. Sie können durch technische Modifizierungen für verschiedenste auch sehr anspruchsvolle Anwendungen passend hergestellt werden. In ihrer Struktur ähneln sie den natürlichen Tonmineralien (Smektiten), sie sind aber deutlich reiner herstellbar und gut modifizierbar. Dies macht sie zu sehr sicheren und robusten Verbindungen, die den Anwendungsbereich solcher Smektite deutlich erweitern.

In diesem Artikel wurden die interessanten Strukturen, die diese Verbindungen ausbilden, genauer betrachtet und wissenschaftlich fundiert ausgewertet. Dies ermöglicht ein besseres Verständnis der Eigenschaften wie Rheologie und Wechselwirkungen mit anderen Komponenten verschiedenster Systeme und damit Anwendungen. Diese Erkenntnisse sind essenziell wichtig, da sie das Fundament dazu ausbilden, um diese leistungsstarken Additive optimal einzusetzen und so ihr volles Potenzial auszuschöpfen. Am Beispiel der hypochlorigen Säure wurde gezeigt, dass mit diesen Verbindungen die Grenzen der Anwendung von Rheologieadditiven erweitert werden können. Auch sehr anspruchsvolle Systeme können damit verdickt und somit besser und nachhaltiger anwendbar gemacht werden.

Referenzen:

[1] *Michael S. Block and Brain G. Rowan*, Hypochlorous Acid: A Review, J Oral Maxillofac Surg, 2020; 78; 1461-1466.

[2] https://klinegroup.com/six-cleaning-trends-turbocharged-by-the-pandemic/, veröffentlicht am 02.11.2021. Abgerufen am 14.09.2022.

[3] Datenabfrage aus https://my.klinegroup.com/, Umsatz der Produktgruppe Desinfektion und Sanitizers zwischen den Jahren 2017 und 2021. Abgerufen am 31.08.2022.

[4] *Margie Recalde*, Hypochlorous acid: harnessing nature´s germ killer, Optometry Times; December 2019.

[5] *A.J. Kettle, C.C. Winterbourn*, Myeloperoxidase: a key regulator of neutrophil oxidant production, Redox Report, 1997; 3(1); 3-15.

[6] https://mediset.de/hypochlorige-saeure/, abgerufen am 14.09.2022.

[7] *Clare L. Hawkins, Michael J. Davies*, Hypochlorite-induced damage to DNA, RNA, and polynucleotides: formation of chloramines and nitrogen-centered radicals, Chem Res Toxicol., 2002; 15(1); 83-92.

[8] WHO Interim guidance, Cleaning and disinfection of environmental surfaces in the context of COVID-19, 2020; 1-8.

[9] *G. Lagaly*, Anorganische System- Tonmineraldispersionen, Fließverhalten von Stoffen und Stoffgemischen, 1986, Hüthig & Wepf Verlag, 147-167.

[10] https://www.mri.psu.edu/materials-characterization-lab/characterization-techniques/transmission-electron-microscopy-tem, abgerufen am 14.09.2022.

[11] https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-elektron/ausblick/transmissions-elektronen-mikroskop-tem, abgerufen am 14.09.2022.

[12] *G. Binnig, C.F. Quate*, Atomic Force Microscope, Physical Review Letters, 1986; 56(9); 930-934.

Autoren

Dr. Jessica Gödeker | Jessica.Goedeker@altana.com
Head of Technical Service Homecare & Industrial Solutions, **BYK**

Anne Drewer | Anne.Drewer@altana.com
Global Head of Enduse Care and Industrial Solutions, **BYK**

Tom Lamont | Tom.Lamont@altana.com
LAPONITE Applications chemist, **BYK**