

Chloratminimierung bei der elektrolytischen Desinfektion von Gießwasser

Ingo Schuch, Dennis Dannehl, Martina Bandte, Johanna Suhl, Yuan Gao, Uwe Schmidt

Die Minimierung von Chlorat bei der elektrolytischen Gießwasserdesinfektion ist aufgrund problematischer Chloratrückstände in pflanzlichen Lebensmitteln von Bedeutung. Im Hinblick auf verfahrenstechnische Optimierungsvorschläge wurde daher am Beispiel einer Salzelektrolyseanlage (Einkammersystem) geprüft, wie viel Chlorat beim Herstellungsprozess des Desinfektionsmittels entsteht und wie sich dessen Anteil bei einer Lagerung unter warmen Temperaturbedingungen im Gewächshaus verändert. Zudem wurde untersucht, wie sich der Pflanzendünger Ammonium auf das Desinfektionsmittel auswirkt. Dabei ergab sich, dass die Chloratbildung durch eine Kühlung des Elektrolysereaktors sowie des Desinfektionsmittel-tanks und durch ein zur Kurzzeitlagerung ausgelegtes Bevorratungssystem von Desinfektionsmittel minimiert werden könnte. Ferner wurde bestätigt, dass Ammonium den Desinfektionsmittelverbrauch bzw. Chlorateintrag deutlich erhöht. Daher empfiehlt sich eine sensorbasierte Dosierung, um sich ändernde chemische Vorgänge im Gießwasser (Chlorzehrung) zu berücksichtigen.

Schlüsselwörter

Wasserdesinfektion, Salzelektrolyse, Hypochlorit, Chlorat, Chlorzehrung

Bei der Nutzung von Oberflächenwasser (v. a. gespeichertes Regenwasser) für die Bewässerung und bei einer Wiederverwendung von überschüssigem Gießwasser (v. a. bei geschlossenen Systemen) ist das Verbreitungsrisiko von wasserbürtigen Phytopathogenen erhöht (SALLY 2011). Zur Senkung des Befallsrisikos existieren bereits mehrere Verfahren zur Wasserdesinfektion, die prinzipiell für den Pflanzenbau geeignet sind. Dabei sind physikalische Desinfektionsverfahren (Wärme, UV-Strahlung, Filtration) von den chemischen Verfahren (Ozon, Wasserstoffperoxid, Kupfer-/Silber-Ionen, Chlordioxid, Chlor) zu unterscheiden (VAN OS 2010). Im Gegensatz zu den physikalischen verfügen die chemischen Verfahren über den Vorteil einer potenziellen Wirkung im gesamten Bewässerungssystem; damit kann die Krankheitsübertragung von Pflanze zu Pflanze verhindert werden (WOHANKA et al. 2015).

Problematisch ist bei den chemischen Desinfektionsverfahren jedoch eine mögliche Akkumulation von unerwünschten Nebenprodukten im Wasser bzw. in den damit kultivierten Pflanzen oder gewaschenen Pflanzenteilen. So zeigt eine umfangreiche Studie mit 1.020 Proben von Lebensmitteln pflanzlichen Ursprungs, dass bei rund 10 % der Proben $\geq 0,01$ mg Chlorat (ClO_3^-) pro kg Lebensmittel nachweisbar ist (KAUFMANN-HORLACHER 2014). Chlorate, wie Natrium- oder Kaliumchlorat, wurden in der Vergangenheit als Unkrautvernichtungsmittel eingesetzt. Diese sind allerdings seit 2010 in der Europäischen Union als Herbizide nicht mehr zugelassen (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2008). Zudem kann Chlorat beim Menschen zu einer Schädigung der roten Blutkörperchen und Hemmung der Jodaufnahme führen (BfR 2014). Daher hat die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit eine vorläufige Stellungnahme zum Chlorat-Grenzwert in Lebensmitteln veröffentlicht (EFSA 2015), der sich auf eine

akute Referenzdosis von 0,036 mg pro kg Körpergewicht und Tag bezieht. Die toxikologische Risikobewertung wird allerdings noch fortgesetzt, da der bisherige Erkenntnisstand keine abschließende gesundheitliche Bewertung zulässt.

Zur Frage, durch welche verfahrenstechnischen Prozesse das Chlorat in Lebensmittel gelangt, wird u. a. der Einsatz von gechlortem Gieß- und Waschwasser in der Vor- und Nachernte vermutet (KAUFMANN-HORLACHER 2014). Hierzu erfolgte bereits der Nachweis, dass eine Chlordesinfektion mit elektrolytisch hergestelltem Hypochlorit (ClO^-) bei zirkulierendem Gießwasser (NFT-Verfahren) zur Anreicherung von Chlorat in Tomatenfrüchten führen kann (DANNEHL et al. 2015a). Bei dem zugrundeliegenden Desinfektionsverfahren wird entweder handelsübliche Chlorbleichlauge (Natriumhypochlorit) aus Fässern verwendet oder das Desinfektionsmittel wird in Anlagen vor Ort selbst hergestellt. Diese sogenannten Elektrolyseanlagen werden bislang vorrangig zur Aufbereitung von Trink- und Badewasser eingesetzt (DYGUTSCH und KRAMER 2012). Dabei wird aus Salz (z. B. NaCl), Wasser und elektrischen Strom eine hypochlorithaltige Desinfektionslösung hergestellt. Die hierfür notwendige Energie wird der Salzlösung (Elektrolyt bzw. Sole) über Elektroden (Anode und Kathode) zugeführt. Während der so erzwungenen Stoffumwandlung (Redoxreaktion) werden Elektronen (e^-) übertragen. Diese werden von negativ geladenen Ionen (Chlorid) an der Anode abgegeben (Gleichung 1) und von positiv geladenen Ionen oder neutralen Stoffen (Wasser) an der Kathodenseite aufgenommen (Gleichung 2). Letztlich reagieren Hydroxid (OH^-) und Chlor (Cl_2) nach Gleichung 3 zu Hypochlorit (ClO^-) und Chlorid (Cl^-).



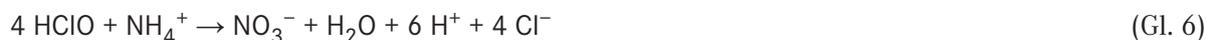
Bei der Salzelektrolyse können sich je nach pH-Wert des zu desinfizierenden Wassers zwei unterschiedliche Chlorverbindungen in Form von Hypochlorit (ClO^-) bzw. hypochloriger Säure (HClO) ausbilden, die jedoch gemeinsam als freies Chlor bezeichnet werden (CLARK und SMAJSTRLA 1992). Die zugehörige Dissoziationsreaktion ist reversibel (Gleichung 4). Daher steigt der Anteil der hypochlorigen Säure, so wie der Hypochloritanteil abnimmt und umgekehrt. Während bei $\text{pH} < 6$ die hypochlorige Säure (HClO) mit einer hohen Desinfektionsleistung überwiegt, ist es ab $\text{pH} > 6$ zunehmend das Hypochlorit (ClO^-) mit geringerer Desinfektionsleistung. Ab $\text{pH} > 7,5$ gilt die desinfizierende Wirkung als unzureichend (MEBALDS et al. 1996).



In wässriger Lösung erfolgt die Disproportionierung von drei Teilen Hypochlorit (ClO^-) in einer mehrstufigen Reaktion zu einem Teil Chlorat (ClO_3^-) und zwei Teilen Chlorid (Cl^-). Die Gesamtreaktion wird mit Gleichung 5 beschrieben. Dieser Prozess wird v. a. durch hohe Hypochloritkonzentrationen, UV-Strahlung und Wärme beschleunigt (STRÄHLE 1999, GABRIO et al. 2004). Aufgrund der unter Wärmezufuhr ablaufenden Reaktionen kann sich so bereits während der elektrochemischen Herstellung der Desinfektionslösung ein Chloratanteil von 2 bis 8% ausbilden (DYGUTSCH und KRAMER 2012).



Das zu desinfizierende Wasser kann hinsichtlich seiner Nutzungsart und chemischen Parameter unterschiedlich sein. So enthält zirkulierende Nährlösung für hydroponische Gemüsekulturen wie Tomate oder Gurke mit 18 mg Ammonium pro Liter (SONNEVELD und STRAVER 1988), im Vergleich zum Trinkwasser mit < 0,05 mg Ammonium pro Liter (BWB 2015), eine wesentlich höhere Konzentration an Pflanzennährstoffen. Zudem erhöht der Stickstoffdünger Ammonium (NH_4^+) die Chlorzehrung im Wasser und oxidiert mit hypochloriger Säure (HClO) in mehreren Teilschritten zunächst zu Chloramin (gebundenes Chlor) mit verminderter antimikrobieller Wirkung (US NATIONAL RESEARCH COUNCIL 1987), dann zu Nitrit und zuletzt weiter zu der für Pflanzen schnell verfügbaren Stickstoffquelle Nitrat (NO_3^-) (BRYANT et al. 1992). Dabei bindet 1 mg Ammonium-Stickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) etwa 10 mg der als freies Chlor messbaren hypochlorigen Säure (WOHANKA et al. 2015). Die Gesamtreaktion wird mit Gleichung 6 dargestellt.



Im Mittelpunkt dieses Beitrags steht die verfahrenstechnische Adaption der bislang vorrangig zur Desinfektion von Trink- und Badewasser eingesetzten Elektrolysetechnik für den Anwendungsfall der Gießwasserdesinfektion, vor allem bei geschlossenen Bewässerungssystemen. Am Beispiel einer Salzelektrolyseanlage (Einkammersystem) wird ermittelt, wie viel problematisches Chlorat beim Herstellungsprozess des Desinfektionsmittels entsteht und wie sich dessen Anteil bei einer Lagerung unter den warmen Temperaturbedingungen im Gewächshaus (Sommerbetrieb) verändert. Zudem wird untersucht, wie sich der Pflanzendünger Ammonium auf den Desinfektionsmittelverbrauch bzw. Chlorateintrag ins Gießwasser auswirkt.

Material und Methoden

Gegenstand der Untersuchungen ist eine Einkammer-Salzelektrolyseanlage (nt-BlueBox mini nt-CLE, newtec Umwelttechnik GmbH, Berlin), die im Experimentalgewächshaus der Humboldt-Universität zu Berlin (Standort Dahlem) zur Vor-Ort-Herstellung einer Desinfektionslösung dient (Abbildung 1).

Salzelektrolyse

Während des elektrochemischen Herstellungsvorgangs der Desinfektionslösung wird im Elektrolyseaktor (Abbildung 1, C: Einkammersystem ohne Membran) eine Lösung mit ca. 3,5% Salzgehalt (Sole) durch das Anlegen eines elektrischen Gleichstroms ($\approx 9 \text{ A}$) im Niedervoltbereich ($\approx 13 \text{ V}$) für 15 min einer Redoxreaktion unterzogen. Die Sole (Abbildung 1, B) enthält Kaliumchlorid ($\text{KCl} \geq 99,5\%$, p.a., ACS, ISO, Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe). Da diese mit Leitungswasser ($\approx 16 \text{ }^\circ\text{dH}$) erzeugt wird, ist die Anlage mit einem Wasserenthärter (Abbildung 1, A) zur Vermeidung von Kalkablagerungen auf den titanbeschichteten Elektroden ausgestattet. Zur Lagerung der Desinfektionslösung dient ein Vorratstank (Abbildung 1, D) mit Füllstandssensor. Dieser regelt bei einer Desinfektionsmittelentnahme (z.B. durch eine Dosiervorrichtung) die automatische Tanknachfüllung bis zum Erreichen eines vorgegebenen Sollwerts. Die Funktionsweise der Salzelektrolyseanlage basiert auf zwei Patenten des Anlagenbauers (GAO et al. 1997, GAO 2010).

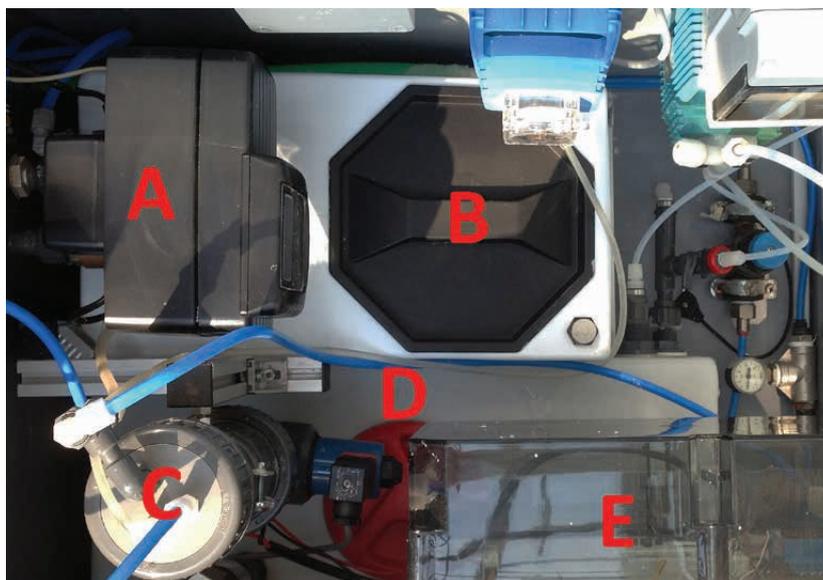


Abbildung 1: Innenansicht der Salzelektrolyseanlage mit den Komponenten Wasserenthärter (A), Soletank (B), Elektrolysereaktor (C), Desinfektionsmitteltank (D) und Steuermodul (E) (Foto: I. Schuch)

Analyse zur Chloratbildung

Um den Einfluss der Lagerdauer unter den warmen Temperaturbedingungen im Gewächshaus (Sommerbetrieb) auf den Gehalt von Chlor und Chlorat in der Desinfektionslösung zu ermitteln, wurde diese nach der salzelektrolytischen Herstellung für vier Wochen (August 2014) im Gewächshaus gelagert. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass die Tagesmitteltemperatur der Desinfektionslösung dem Tagesmittel der gemessenen Lufttemperatur (5-Minuten-Intervall) im Gewächshaus entspricht. Ergänzend hierzu lagen die Sollwerte (Tag/Nacht) der Heizungstemperatur bei 17/20 °C und der Lüftungstemperatur bei 24/24 °C. Die Temperatur im Gewächshaus wurde in 2 m Höhe mit einem strahlungsgeschützten und ventilerten Klimamessgerät (P-TF-30, Positronik, Au in der Hallertau) gemessen. Das freie Chlor (Cl_2) in der Desinfektionslösung wurde mit der DPD-Methode (CLESERL et al. 1999) und einem Photometer (Pocket Colorimeter II, Hach Lange GmbH, Düsseldorf/Berlin) jeweils zum Beginn ($n = 4$, doppelte Probenanalyse) sowie zum Ende der Lagerung bestimmt. Analog dazu erfolgten die Chloratmessungen mittels QuPPE-Methode (ANASTASSIADES et al. 2013) und Flüssigchromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (1290 Infinity LC und 6460 Triple Quadrupole MS/MS, Agilent Technologies GmbH, Waldbronn).

Analyse zur Chlorzehrung

Um den Einfluss von Ammonium auf die Chlorzehrung im Gießwasser zu quantifizieren, wurde eine Nährlösung mit einem Ammoniumgehalt von 10 mg/l ($\pm 0,5$ mg/l) und einem pH-Wert von 6 hergestellt ($n = 2$). Hierzu wurden Trink- und Regenwasser (50%/50%) mit einer Stammlösung für hydroponische Kulturen nach SONNEVELD und STRAVER (1988) gedüngt und mit Phosphorsäure (3% H_3PO_4) angesäuert. Dabei erfolgte die Ammoniummessung mittels Nessler-Methode (HANNA INSTRUMENTS INC. 2010) sowie Photometer (HI 96733, Hanna Instruments GmbH, Vöhringen) und die pH-Messung mittels Multiparameter-Meter (HI 9811, Hanna Instruments GmbH, Vöhringen). Abschließend wurde zur Nährlösung die Desinfektionslösung in Konzentrationsstufen von 5, 10, 50, 75 und 100 mg freies

Chlor/l zugegeben, um nach 10 min Reaktionszeit das verbleibende freie Chlor mittels DPD-Methode (CLESERL et al. 1999) und Photometer (Pocket Colorimeter II, Hach Lange GmbH, Düsseldorf/Berlin) zu erfassen. Analog dazu wurden Vergleichsmessungen mit Trinkwasser und einem Ammoniumgehalt $< 0,05$ mg/l (BWB 2015) durchgeführt. Alle Messungen erfolgten mit doppelter Probenanalyse.

Ergebnisse und Diskussion

Die exemplarisch verwendete Einkammer-Elektrolyseanlage produziert eine Desinfektionslösung mit einer durchschnittlichen Konzentration an freiem Chlor von 4.872 mg/l (± 612 mg/l) und Chlorat von 197 mg/l (± 154 mg/l) (Abbildung 2), was – bezogen auf das freie Chlor – einem geringen Chloratanteil von rund 4 % entspricht. Dabei ist die Chloratbildung vermutlich auf den endothermen Herstellungsprozess im Elektrolysereaktor zurückzuführen (STRÄHLE 1999, GABRIO et al. 2004). Im Vergleich dazu weisen ähnliche Anlagen einen Chloratanteil von 2 bis 8 % auf (DYGUTSCH und KRAMER 2012). Bereits nach vierwöchiger Lagerung der Desinfektionslösung im Gewächshaus (Sommerbetrieb) mit einer Lagertemperatur, die im Gesamtmittel bei 22,4 °C liegt und im Tagesmittel von 20,5 bis 25,6 °C reicht, jedoch bezüglich der zugrunde liegenden Einzelmessungen mit minimal 17 °C (nachts) und maximal 34,6 °C (tags) eine deutlich größere Temperaturspreizung ($\Delta T = 17,6$ K) aufweist, sinkt der Gehalt an freiem Chlor um nahezu 50 % auf 2.500 mg/l (± 375 mg/l). Zeitgleich steigt der Chloratgehalt auf 1.412 mg/l (± 212 mg/l) (Abbildung 2). Dies entspricht einem hohen Chloratanteil von rund 56 % (bezogen auf das freie Chlor), wobei dieses Ergebnis auf Reproduzierbarkeit geprüft und um Lagerungsversuche mit geringeren Temperaturschwankungen im Gewächshaus (z. B. Winterbetrieb) sowie um den Nachweis etwaiger weiterer Nebenprodukte wie Chlorit (ClO_2^-) und Perchlorat (ClO_4^-) ergänzt werden sollte.

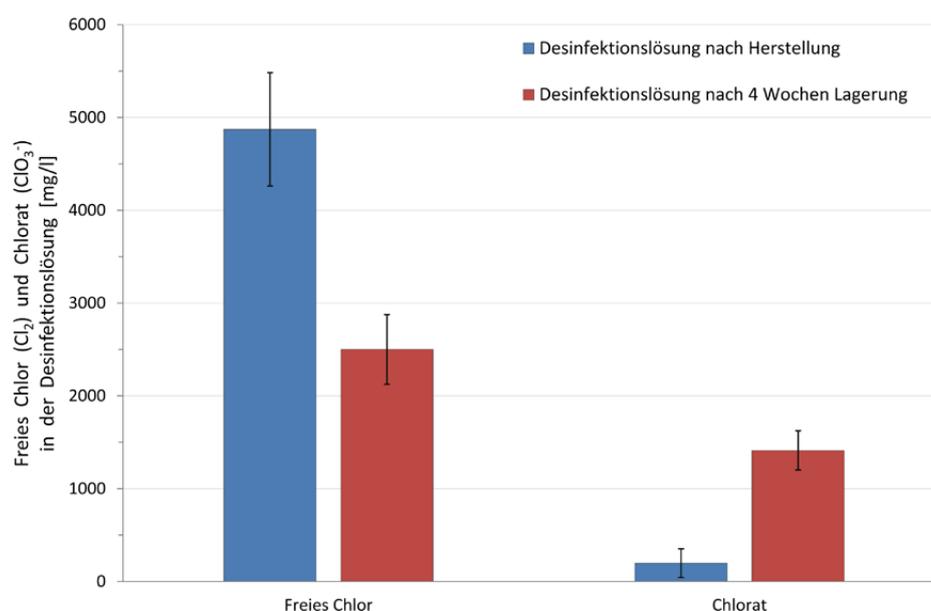


Abbildung 2: Einfluss der Lagerdauer unter warmen Bedingungen im Gewächshaus (Sommerbetrieb, $T_{\text{max}} = 34,6$ °C) auf das freie Chlor und Chlorat in der mittels Salzelektrolyse erzeugten Desinfektionslösung; Mittelwerte \pm StAbw ($n = 4$) für freies Chlor und Chlorat unmittelbar nach dem Herstellungsprozess (blaue Balken) und nach vierwöchiger Lagerung im Gewächshaus (rote Balken)

Den Messungen nach gelangen bei der Verwendung von frischer Desinfektionslösung und einer antimikrobiellen Dosis von 1 mg freiem Chlor/l (CLARK und SMAJSTRLA 1992) rechnerisch etwa 0,04 mg Chlorat/l ($\pm 0,03$ mg/l) ins behandelte Gießwasser. Dabei würde eine Erhöhung bzw. Absenkung der Desinfektionsdosis den Chlorateintrag in gleicher Ausprägung beeinflussen. Wird die Desinfektionslösung hingegen für vier Wochen im Gewächshaus (Sommerbetrieb) gelagert, wobei die für die warme Jahreszeit im Gewächshausinneren typischen Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht auftreten, steigt bei der o. g. Desinfektionsdosis der Chlorateintrag rechnerisch auf 0,56 mg/l ($\pm 0,08$ mg/l).

Die Messungen zur Chlorzehrung zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen dem Wasser ohne bzw. mit Ammonium. So findet ein Anstieg des freien Chlors beim Gießwasser ($10 \pm 0,5$ mg NH_4^+ /l) erst nach Erreichung der Chlorzehrungsgrenze statt (Abbildung 3, rote Strichlinie) – im Gegensatz zum Trinkwasser ($< 0,05$ mg NH_4^+ /l), in dem das freie Chlor annähernd der applizierten Dosis entspricht (Abbildung 3, blaue Linie). Diesbezüglich lässt sich mithilfe einer Regressionsgeraden (Abbildung 3, rote Punktlinie), die durch die Parallelität zur Messung ohne Ammonium gestützt wird, ein Zehrungsverhältnis von Ammonium zu Chlor von etwa 1 : 7 ableiten (nach 10 min Reaktionszeit). Dieses liegt unter dem für Ammonium-Stickstoff von 1 : 10 (WOHANKA et al. 2015, ohne Angabe der Reaktionszeit). Hierzu ist anzunehmen, dass der Zeitraum zwischen Chlorzugabe und Probenahme einen Einfluss auf den Messwert hat. Daher sollten zukünftige Messungen zur Chlorzehrung um weitere Einwirkzeiten ergänzt werden (z. B. nach 5, 20 und 30 min).

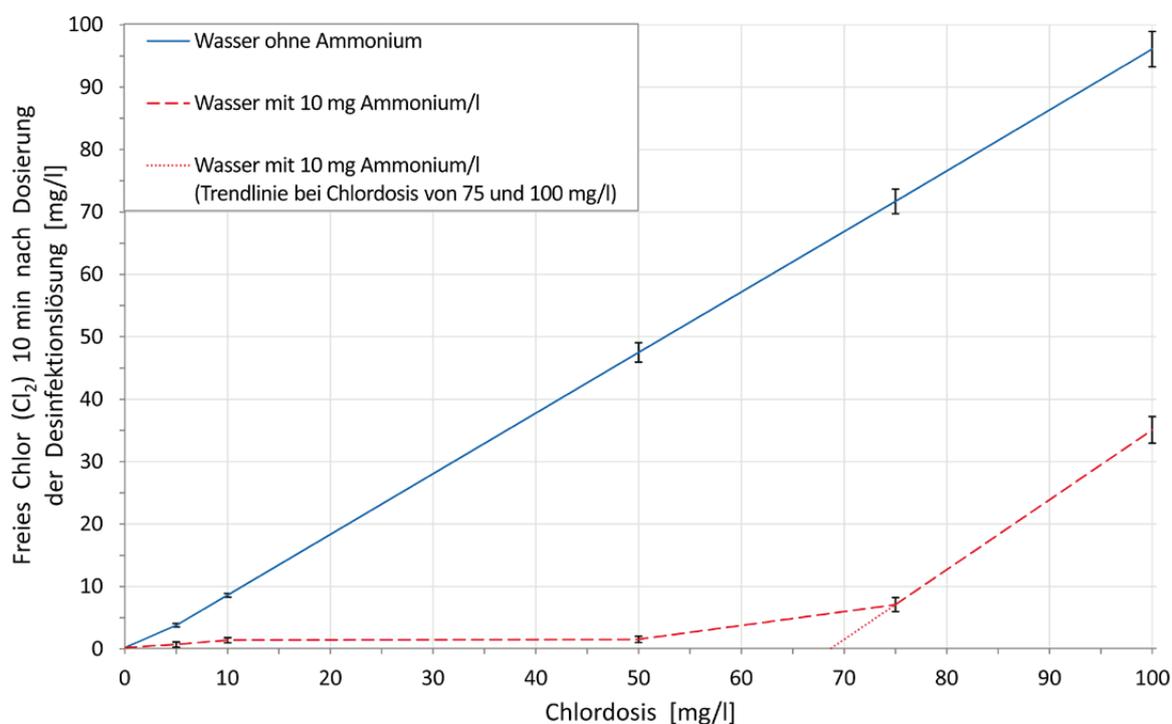


Abbildung 3: Zehrung des freien Chlors 10 min nach Dosierung der mittels Salzelektrolyse erzeugten Desinfektionslösung beim Trinkwasser ohne Ammonium (blaue Linie) und bei Gießwasser mit Ammonium (rote Strichlinie); Ableitung der Chlorzehrungsgrenze (rote Punktlinie) bei einer Chlordosis von 75 und von 100 mg/l unter Annahme eines linearen Verlaufs; Mittelwerte für freies Chlor \pm StAbw ($n = 2$)

Während der Chlorzehrung durch Ammonium entstehen Chloramine (gebundenes Chlor). Diese haben im Vergleich zum freien Chlor zwar eine herabgesetzte antimikrobielle Wirkung (US NATIONAL RESEARCH COUNCIL 1987), dafür jedoch eine längere Halbwertszeit, wobei der Chloraminzerfall unter UV-Einstrahlung maximal 0,2 mg/l h erreicht (WHITE 1992). Darüber hinaus kann aus Chloramin unter nitrifizierenden Bedingungen die für Pflanzen schnell verfügbare Stickstoffquelle Nitrat (NO_3^-) entstehen (BRYANT et al. 1992). Diesbezüglich ist anzunehmen, dass eine kontinuierliche Chlorung den zugrunde liegenden mikrobiologischen Abbauprozess (Nitrifikation) schneller zum Erliegen bringt als eine diskontinuierliche bzw. stoßweise Chlordesinfektion von Gießwasser.

Im Hinblick auf das ermittelte Zehrungsverhältnis von Ammonium zu Chlor ist unter Berücksichtigung der Nährstoffempfehlung zur Tomaten- und Gurkenbewässerung von 18 mg NH_4^+ /l (SONNEVELD und STRAVER 1988) und eines Sollwerts im Gießwasser von 1 mg freiem Chlor/l ein Mehrverbrauch an Desinfektionslösung um den Faktor 126 (bezogen auf Chlorzehrung 1 : 7) zu erwarten. In gleicher Ausprägung wird der Chlorateintrag ins Gießwasser beeinflusst, wobei zur Chlorataufnahme durch Pflanzen noch wenig bekannt ist. Die amtliche Lebensmittelüberwachung zeigt jedoch, dass relativ hohe Chloratgehalte z. B. in Tomaten (0,2 mg/kg) und Karotten (0,3 mg/kg) auftreten können (KAUFMANN-HORLACHER 2014). Hierzu wurde mittlerweile nachgewiesen, dass die salzelektrolytische Gießwasserdesinfektion zur Chlorateinlagerung bei Gemüse führen kann. In der Studie von DANNEHL et al. (2015a) wurden Tomatenpflanzen im geschlossenen Kreislauf auf Fließbrinnen (NFT-Verfahren) durchgehend bewässert und die vor Ort hergestellte Desinfektionslösung wurde über einen Zeitraum von 3 Monaten stoßweise (1x je Woche für 90 min) in Konzentrationen von 1 (Variante DI) bzw. 2 mg freies Chlor/l (Variante DII) ins düngerhaltige Gießwasser (enthielt u. a. Ammonium) dosiert. Im Ergebnis wurde keine Ertragsminderung bei zugleich hoher antimikrobieller Wirksamkeit festgestellt (DANNEHL et al. 2015b). Allerdings stieg der Chloridgehalt im Wasser nach einer Stoßdesinfektion durchschnittlich um 14 mg/l (DI) bzw. 21 mg/l (DII) (DANNEHL et al. 2015a), wobei die Anbauempfehlung zum hydroponischen Tomatenanbau von < 532 mg Chlorid/l (SONNEVELD und STRAVER 1988) auch nach 3 Monaten ohne Wasserwechsel unterschritten blieb. Gleichwohl tolerieren Tomaten im Vergleich zu anderen hydroponischen Kulturen (z. B. Salat) auch höhere Chloridgehalte im Gießwasser (SONNEVELD und STRAVER 1988). Des Weiteren stieg unter dem o. g. stoßweisen Desinfektionsregime der Chloratgehalt in den Tomaten auf 0,22 mg/kg (DI) bzw. 0,25 mg/kg (DII) (DANNEHL et al. 2015a), woraus sich nach dem aktuellen Erkenntnisstand eine toxikologisch unbedenkliche Tagesverzehrmenge bis zu 10 kg Tomaten ableitet (bezogen auf 70 kg Körpergewicht und unter Ausschluss sonstiger Chlorataufnahmen) (EFSA 2015).

Schlussfolgerungen

Salzelektrolyseanlagen sind prinzipiell zur Gießwasserdesinfektion geeignet, wenn Verfahrenstechnik, Lagerbedingungen, Dosiermanagement und Anwendungsfall aufeinander abgestimmt sind. Zukünftig werden hierzu noch Fallstudien mit differenten Pflanzenkulturen, Anbausystemen, Dosierszenarien und Phytopathogenen benötigt. Grundvoraussetzung für die Anwendung im Pflanzenbau ist jedoch, dass die toxikologisch unbedenkliche Menge von Desinfektionsnebenprodukten (v. a. Chlorid, Chlorit, Chlorat, Perchlorat) im Wasser, im Substrat und in den Pflanzen (v. a. Gemüse) nicht überschritten wird.

Bereits während der Salzelektrolyse entsteht aufgrund des unter Wärmezufuhr ablaufenden elektrochemischen Prozesses ein gewisser Chloratanteil. Folglich sollten Techniken erprobt werden, um die Reaktionswärme abzuführen (z. B. durch Lüfter, Wasserkühler oder Peltier-Kühler).

Eine weitere Maßnahme betrifft die Lagerung der Desinfektionslösung, v. a. unter warmen Bedingungen, da mit zunehmender Lagerdauer der desinfektionswirksame Anteil des freien Chlors sinkt und der Chloratanteil steigt. Bei der Gießwasserdesinfektion im Gewächshaus erscheint demnach die Vor-Ort-Herstellung einer frischen, dem kurzfristigen Mengenbedarf (z. B. eines Tages) angepassten, Desinfektionslösung als vorteilhaft gegenüber den industriell hergestellten großvolumigen Lagergebinden (Fässer). Zudem empfiehlt sich eine Kühlung des Desinfektionsmittel tanks.

Ein weiterer Ansatz zur Chloratminimierung im Wasser bzw. in den damit kultivierten Pflanzen betrifft das Dosiermanagement. So könnte eine diskontinuierliche Desinfektion, z. B. 1- bis 2-mal je Woche, mit höherer Chlordosis zu weniger Chlorateintrag führen als eine kontinuierliche Chlorung mit geringer Dosis. Vergleichstests zur Pflanzenverträglichkeit und Befallsminderung stehen jedoch noch aus.

Bei der Dosierung von elektrolytisch hergestellter Desinfektionslösung in das Gießwasser zeigt sich, dass der Pflanzendünger Ammonium das freie Chlor schnell bindet und folglich den Desinfektionsmittelverbrauch bzw. Chlorateintrag bis zum Erreichen der Chlorzehrungsgrenze deutlich erhöht. Daher empfiehlt sich eine konzentrationsabhängige Dosierung mittels Chlorsensor, um so auch sich ändernde chemische Vorgänge im Wasser (Chlorzehrung) bei der Dosierregelung zu berücksichtigen. Ferner sollte so wenig Ammoniumdünger wie möglich eingesetzt und stattdessen ein Ausgleich mit anderen Düngestoffen (z. B. Nitrat) angestrebt werden.

Literatur

- Anastassiades, M.; Kolberg, D. I.; Mack, D.; Wildgrube, C.; Sigalov, I.; Dörk, D. (2013): Quick method for the analysis of residues of numerous highly polar pesticides in foods of plant origin involving simultaneous extraction with methanol and LC-MS/MS determination (QuPPE-Method) – Version 7.1. EU Reference Laboratory for pesticides requiring – Single Residue Methods (EURL-SRM). http://www.eurl-pesticides.eu/library/docs/srm/meth_QuPPE.pdf, Zugriff am 25.08.2015
- BfR (2014): Vorschläge des BfR zur gesundheitlichen Bewertung von Chloratrückständen in Lebensmitteln. Stellungnahme Nr. 028/2014 des BfR vom 12. Mai 2014. <http://www.bfr.bund.de/cm/343/vorschlaege-des-bfr-zur-gesundheitlichen-bewertung-von-chloratrueckstaenden-in-lebensmitteln.pdf>, Zugriff am 21.08.2015
- Bryant, E. A.; Fulton, G. P.; Budd, G. C. (1992): Disinfection alternatives for drinking water. Van Nostrand Reinhold, New York, NY
- BWB (2015): Analysedaten der Wasserwerke – Jahresmedianwerte 2014. Berliner Wasserbetriebe, http://www.bwb.de/content/language1/downloads/WW_Analysedaten_2014.pdf, Zugriff am 23.08.2015
- Clark, G.; Smajstrla, A. (1992): Treating irrigation systems with chlorine. *Foliage Digest* 15(6), pp. 3–5
- Clescerl, L. S.; Greenberg, A. E.; Eaton, A. D. (1999): Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington (D. C.), American Public Health Association
- Dannehl, D.; Schuch, I.; Gao, Y.; Cordiner, S.; Schmidt, U. (2015a): Effects of hypochlorite as a disinfectant for hydroponic systems on accumulations of chlorate and phytochemical compounds in tomatoes. *European Food Research and Technology*, <http://dx.doi.org/10.1007/s00217-015-2544-5>
- Dannehl, D.; Schuch, I.; Gao, Y.; Cordiner, S.; Schmidt, U. (2015b): Hypochlorite application for controlling algae biofilm formation, microorganisms and tomato production in recirculating systems. *Gesunde Pflanzen* 67(4), pp. 191–199, <http://dx.doi.org/10.1007/s10343-015-0351-3>

- Dygutsch, D. P.; Kramer, M. (2012): Chlorit und Chlorat - Ein neuer Summenparameter der DIN 19643 zur Überwachung von Schwimmbeckenwasser. *Archiv des Badewesens* 03, S. 166–178
- EFSA (2015): Chlorat in Lebensmitteln – Risiken für öffentliche Gesundheit. *Nachricht der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA)* vom 24. Juni 2015. <http://www.efsa.europa.eu/de/press/news/150624a>, Zugriff am 21.08.2015
- Europäische Kommission (2008): Entscheidung 2008/865/EG der Kommission vom 10. November 2008 über die Nichtaufnahme von Chlorat in Anhang I der Richtlinie 91/414/EWG des Rates und die Aufhebung der Zulassungen für Pflanzenschutzmittel mit diesem Stoff. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32008D0865:DE:HTML>, Zugriff am 18.08.2015
- Gabrio, T.; Bertsch, A.; Karcher, C.; Nordschild, S.; Sacre, C. (2004): Belastung von Badebeckenwasser mit anorganischen Desinfektionsnebenprodukten. *Archiv des Badewesens* 03, S. 158–163
- Gao, T.; Gao, Y.; Han, B.; Li, J.; Zhang, D. (1997): WO 1997011908 A2
- Gao, Y. (2010): WO 2010020270 A1
- Hanna Instruments Inc. (2010): Instruction Manual. HI 96733C Ammonia High Range ISM. http://www.hannainst.com.au/manuals/man96733_22_12_2010.pdf, Zugriff am 17.08.2015
- Kaufmann-Horlacher, I. (2014): Chlorat-Rückstände in pflanzlichen Lebensmitteln - ein Update. *Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt Stuttgart (CVUA)*. https://dl.dropboxusercontent.com/u/8384843/Homepage/CVUAS_RK_Chlorat-Update2014.pdf, Zugriff am 21.08.2015
- Mebalds, M.; van der Linden, A.; Bankier, M.; Beardsell, D. (1996): Using ultraviolet radiation and chlorine dioxide to control fungal plant pathogens in water. *Nursery Papers* 005, pp. 1–2
- Sally, M. S.-W. (2011): Plant pathogens in recycled irrigation water in commercial plant nurseries and greenhouses: their detection and management. *Irrigation Science* 29(4), pp. 267–297, <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-011-0285-1>
- Sonneveld, C.; Straver, N. (1988): Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates. 7th ed., no. 8, Voedingsoplossing glastuinbouw
- Strähle, J. (1999): Risikoabschätzung der gesundheitlichen Belastung von Schwimmern durch die bei der Desinfektion von Schwimmbeckenwasser entstehenden Nebenreaktionsprodukte. *Dissertation, Universität Heidelberg*
- US National Research Council (1987): *Drinking water and health*. Vol. 7, National Academy Press, Washington, DC
- Van Os, E. A. (2010): Disease management in soilless culture systems. *Acta Hort.* 883, pp. 385–393, <http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.883.48>
- White, G. C. (1992): *The handbook of chlorination and alternative disinfectants*. 3rd ed., Van Nostrand Reinhold, New York, NY
- Wohanka, W.; Domke, O.; Schmidt, J. (2015): Entkeimung von Nährlösung oder Gießwasser – Verfahren, Einsatzbereiche und Bewertung. *KTBL-Arbeitsblatt 0738, Darmstadt*

Autoren

Dr. Ingo Schuch und **Dr. Dennis Dannehl** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Fachgebiet Biosystemtechnik der Humboldt-Universität zu Berlin (HU), Albrecht-Thaer-Weg 3, 14195 Berlin, E-Mail: ingo.schuch@agrار.hu-berlin.de.

Dr. Martina Bandte ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Phytomedizin der Humboldt-Universität zu Berlin (HU), Lentzeallee 55/57, 14195 Berlin.

M. Sc. Johanna Suhl ist wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Biologie und Ökologie der Fische am Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB), Müggelseedamm 301, 12587 Berlin.

Dipl.-Ing. Yuan Gao ist Geschäftsführer der Firma newtec Umwelttechnik GmbH, Am Borsigturm 62, 13507 Berlin.

Prof. Dr. Uwe Schmidt ist Leiter des Fachgebiets Biosystemtechnik und geschäftsführender Direktor des Albrecht Daniel Thaer-Instituts für Agrar- und Gartenbauwissenschaften an der Humboldt-Universität zu Berlin (HU), Albrecht-Thaer-Weg 3, 14195 Berlin.

Hinweise und Danksagungen

Die Ergebnisse stammen aus einem Forschungsprojekt (FKZ 2815502611), welches im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) gefördert und mit Unterstützung der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) durchgeführt wurde.

Das Thema wurde in Teilen auf der 50. Gartenbauwissenschaftlichen Jahrestagung und dem Internationalen WeGa-Symposium, Freising-Weihenstephan, 24.-28. Februar 2015, vorgestellt und eine Kurzfassung in der BHGL-Schriftenreihe veröffentlicht (Bd. 31, S. 34).

Die Autoren danken M. Sc. Janine Berberich und M. Sc. André Seyfarth für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung.