



**Hochschule  
Hof**



## **DBU-Projekt Abschlussbericht – März 2026**

**Entwicklung eines ressourcenschonenden Verfahrens zur elektrochemischen Nachbehandlung von biologisch hergestellten Urindünger für die Lebensmittelproduktion**

**Aktenzeichen: 3963/01**  
**Projektname: EULe**  
**Projektkosten: 143.882 €**  
**Fördermittelanteil: 124.000 €**  
**Projektbeginn: 27.08.2024**  
**Projektende: 31.12.2025**

**Projektbearbeiter: Hochschule Hof – Institut für Nachhaltige Wassersysteme**

**M. Sc. Axel Wolfram**

**Alfons-Goppel-Platz 1, 95028 Hof**

**[axel.wolfram@hof-university.de](mailto:axel.wolfram@hof-university.de)**



**inwa**

**Institut für nachhaltige  
Wassersysteme  
der Hochschule Hof**

# Projektkennblatt

der

**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az **3963/01-23**

Referat 23

Fördersumme

**124.000 €**

**Antragstitel**                      **Entwicklung eines ressourcenschonenden Verfahrens zur elektrochemischen Nachbehandlung von biologisch hergestellten Urindünger für die Lebensmittelproduktion**

**Stichworte**                              Photokatalyse, Energieeffizienz, Stromerzeugung, Grauwasserreinigung

Laufzeit

Projektbeginn

Projektende

Projektphase(n)

**16 Monate**

**27.08.2024**

**31.12.2025**

Zwischenberichte

**Bewilligungsempfänger** Synantik GmbH

Suhler Straße 11

99885 Ohrdruf

Tel            036257 457720

Fax

Projektleitung

M.SC. Daniel Martschoke

Bearbeiter

Franz-Peter Heidenreich

**Kooperationspartner** Hochschule Hof - Forschungsgruppe „Photonik und Wasser“  
Alfons-Goppel Platz 1  
95028 Hof  
  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)  
Linder Höhe  
51147 Köln

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Das übergeordnete Ziel des beantragten Projektes ist die vereinfachte Aufbereitung von separat erfasstem menschlichem Urin zu einem hochwertigen und sicheren Düngemittel. Dabei soll der Urin in einem biologischen Filtrationsverfahren (C.R.O.P.<sup>®</sup>) nitrifiziert werden. Im Anschluss an die Nitrifikation muss die produzierte Lösung von pathogenen Keimen und organischen Mikroschadstoffen wie Medikamentenrückständen befreit werden. Gesucht wird eine verfahrenstechnische Lösung, die dies im Gegensatz zur üblichen Kombination aus Aktivkohlefiltration und Erhitzen in einem Schritt und wenn möglich ohne reststoffverursachende Verbrauchsmaterialien und Chemikalien durchführen kann.

Untergeordnete Ziele des Projekts:

- Identifizierung von Verfahren zur Nachbehandlung von biologisch hergestellten urinbasierten Recyclingdünger mittels physikochemischer Verfahren wie der Diamantelektrolyse oder der photokatalytischen Oxidation.
- Zuverlässige Entfernung von Pathogenen und Medikamentenresten, somit ist eine Nutzung als Spurenstoffeliminationsverfahren bspw. für Krankenhausurin denkbar
- Anwendung von Verfahren ohne Verbrauchsmaterialien und Gefahrenstoffe wie Laugen oder Säuren.
- Auswahl wartungsarmer Geräte zur Einsparung von Personalstunden bei Einsatz in kommerziellen Betrieben.
- Vielseitige Verwendbarkeit, ggf. auch zur Desinfektion von Düngerlösungen, die in Gewächshäusern mit erdfreien Kultivierungssystemen mehrfach verwendet werden (rezyklierende Systeme)

## ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Im Projekt wurde ein kombiniertes Verfahren zur Nachbehandlung biologisch nitrifizierter C.R.O.P.-Lösungen untersucht, bestehend aus Diamantelektrolyse (BDD) und nachgeschalteter Photokatalyse. Hierfür wurden entsprechende Laborreaktoren aufgebaut und betrieben.

Die Diamantelektrolyse wurde in einem Durchflussreaktor mit variabler Verweilzeit und einstellbarem Energieeintrag (Wh/L) untersucht. Die photokatalytischen Versuche erfolgten in einem gerührten Batchreaktor unter UV-A-LED-Bestrahlung. Die Katalysatoren wurden mittels Sol-Gel-Verfahren auf geeigneten Trägern mit TiO<sub>2</sub> beschichtet.

Als Matrix wurden reale C.R.O.P.-Lösungen eingesetzt. Zur Bewertung der Spurenstoffelimination wurden ausgewählte Arzneimittel gezielt zudosiert. Die Untersuchungen umfassten die Variation relevanter Betriebsparameter sowie die Analyse der resultierenden Stoffumwandlungen.

Die analytische Auswertung erfolgte mittels HPLC-DAD für Arzneimittel sowie über Summen- und Standardparameter (u. a. CSB, pH, Stickstoffspezies). Die Desinfektionsleistung wurde über Keimzahlbestimmungen (KBE/100 ml) bewertet.

Auf Basis der Laborergebnisse wurden zentrale Einflussgrößen identifiziert und erste Zielparameter für die Systemauslegung abgeleitet. Diese dienen als Grundlage für die weiterführenden Untersuchungen im halbtechnischen Maßstab.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Die im Projekt untersuchten Verfahren zur elektrochemischen und photokatalytischen Nachbehandlung zeigen ein hohes Potenzial für eine ressourcenschonende Aufbereitung von urinbasierten Düngerlösungen ohne den Einsatz zusätzlicher Chemikalien. Insbesondere die Diamantelektrolyse (BDD) erwies sich als zentrale Verfahrensstufe zur gleichzeitigen Oxidation organischer Inhaltsstoffe und Desinfektion.

Im Labormaßstab konnte eine deutliche Reduktion des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) von initial >40 mg/L auf etwa 18 mg/L erreicht werden. Gleichzeitig wurde über alle untersuchten Betriebszustände hinweg eine vollständige Desinfektion nachgewiesen (0 KBE/100 ml). Darüber hinaus zeigte sich eine Verschiebung der Stickstoffspezies in Richtung Nitrat, mit Konzentrationen im Bereich von ca. 10.500–12.400 mg/L, während Ammonium tendenziell abnahm. Dies ist im Hinblick auf die Stabilität und pflanzenbauliche Verwertbarkeit der Lösung positiv zu bewerten.

Als verfahrenstechnisch kritisch ist der deutliche pH-Abfall von etwa 3,8 auf Werte bis ca. 1,7–2,1 zu bewerten. Zusätzlich wurde eine ausgeprägte Bildung von chlorhaltigen Spezies beobachtet, die zur Oxidations- und Desinfektionsleistung beitragen, jedoch insbesondere in gasförmiger Form eine potenzielle Gefährdung darstellen und daher eine geeignete Abluft- bzw. Nachbehandlung (z. B. Gaswäsche) erforderlich machen.

Die Untersuchungen zur Spurenstoffelimination zeigen, dass mit der BDD-Behandlung Abbauraten von bis zu ca. 80 % für ausgewählte Arzneimittel erreicht werden können. Die nachgeschaltete Photokatalyse zeigte für die untersuchten Substanzen ein Abbauverhalten pseudo-erster Ordnung, wobei Naproxen deutlich effizienter abgebaut wurde als Venlafaxin. Innerhalb der betrachteten Reaktionszeit von 180 Minuten konnte jedoch im Mittel keine vollständige Zielerreichung von 80 % erzielt werden. Die Photokatalyse ist daher primär als ergänzende Verfahrensstufe zur weiteren Reduktion verbleibender Mikroschadstoffe zu bewerten.

Für Summenparameter wie CSB, mikrobiologische Kenngrößen und Stickstoffspezies konnten im Rahmen der photokatalytischen Behandlung keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden, sodass kein zusätzlicher Synergieeffekt hinsichtlich der Nitrifikation zu erwarten ist.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse das Potenzial der kombinierten Verfahren zur energieeffizienten und chemikalienfreien Behandlung von urinbasierten Düngerlösungen. Während für die elektrochemische Behandlung bereits belastbare Zielparame-ter, insbesondere ein Energieeintrag im Bereich von etwa 40 Wh/L, abgeleitet werden konnten, besteht für die photokatalytische Stufe weiterhin Optimierungsbedarf.

Die halbtechnischen Versuche bestätigen grundsätzlich die im Labormaßstab beobachteten Effekte, zeigen jedoch Einschränkungen bei der Übertragbarkeit der Betriebsparameter. Insbesondere konnte aufgrund des deutlich geringeren Energieeintrags der BDD (max. ca. 1,6 Wh/L gegenüber ca. 40 Wh/L im Labor) die Oxidationsleistung für organische Inhaltsstoffe und Spurenstoffe nur eingeschränkt erreicht werden.

Die Desinfektionsleistung der BDD blieb hingegen auch im halbtechnischen Maßstab zuverlässig erhalten, sodass diese weiterhin als zentrale Verfahrensstufe bewertet werden kann. Die nachgeschaltete Photokatalyse führte zu einer zusätzlichen Reduktion einzelner Mikroschadstoffe, konnte jedoch auch unter praxisnahen Bedingungen keine vollständige Elimination erreichen.

Auffällig ist zudem ein teilweise abweichendes Verhalten von Summenparametern wie TOC und Trübung, was auf matrixbedingte Effekte und Zwischenproduktbildung im größeren Maßstab hinweist. Die Bildung chlorhaltiger Spezies konnte ebenfalls bestätigt werden und bleibt ein zentraler Aspekt für die technische Umsetzung.

Insgesamt zeigen die halbtechnischen Ergebnisse, dass das Verfahren grundsätzlich übertragbar ist, jedoch insbesondere für die elektrochemische Leistungsdichte und die Prozessführung weiterer Optimierungsbedarf besteht.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Im Rahmen des Projekts erfolgte keine gesonderte externe Öffentlichkeitsarbeit. Die erzielten Ergebnisse wurden jedoch kontinuierlich in internen Formaten kommuniziert. Hierzu zählen insbesondere die Präsentation von Zwischenergebnissen in institutsinternen Seminaren sowie die Einbindung der Projektergebnisse in Lehrveranstaltungen an der Hochschule Hof. Auf diese Weise konnte ein Wissenstransfer in Forschung und Lehre sichergestellt werden.

### ***Fazit***

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass die Diamantelektrolyse eine effektive und chemikalienfreie Verfahrensstufe zur Oxidation organischer Inhaltsstoffe und vollständigen Desinfektion von C.R.O.P.-Lösungen darstellt. Ergänzend ermöglicht die nachgeschaltete Photokatalyse eine weitere Reduktion ausgewählter Mikroschadstoffe. Die Kombination beider Verfahren stellt somit einen vielversprechenden Ansatz zur Aufbereitung urinbasierter Düngerlösungen dar. Für die technische Umsetzung sind insbesondere der Umgang mit pH-Absenkung und chlorhaltigen Nebenprodukten sowie die weitere Optimierung der photokatalytischen Stufe zu berücksichtigen.

## **Inhaltsverzeichnis**

1	Zusammenfassung.....	1
2	Einleitung .....	3
3	Hauptteil.....	4
3.1	C.R.O.P. Anlage DLR.....	4
3.2	Laboraufbau .....	5
3.3	Versuchsauswertung Laborversuche .....	6
3.3.1	BDD Versuche .....	6
3.3.2	Photokatalyse Versuche.....	9
4	Fazit .....	25
5	Literaturverzeichnis .....	27

## **Verzeichnis von Bildern und Tabellen**

Abbildung 1.	Laborversuchsaufbau Photokatalyse .....	5
Abbildung 2.	Laborversuchsaufbau Diamantelektrolyse .....	6

# 1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurde ein kombiniertes Verfahren zur Nachbehandlung biologisch nitrifizierter C.R.O.P.-Lösungen untersucht, bestehend aus einer elektrochemischen Oxidation mittels bor-dotierter Diamantelektroden (BDD) sowie einer nachgeschalteten photokatalytischen Behandlung. Ziel war die gleichzeitige Entfernung organischer Mikroschadstoffe und pathogener Keime bei möglichst geringem Einsatz von Betriebsmitteln.

Die Laboruntersuchungen zur Diamantelektrolyse zeigen eine effektive Oxidation organischer Inhaltsstoffe, was sich insbesondere in der deutlichen Reduktion des CSB widerspiegelt. Gleichzeitig konnte eine vollständige Desinfektion (0 KBE/100 ml) über alle untersuchten Betriebszustände hinweg nachgewiesen werden. Zudem wurde eine Umwandlung der Stickstoffspezies in Richtung Nitrat beobachtet, was im Hinblick auf die Stabilität der Düngerlösung positiv zu bewerten ist. Kritisch zu betrachten sind hingegen der deutliche pH-Abfall sowie die Bildung von Chlor bzw. chlorhaltigen Spezies, die zwar zur Reinigungsleistung beitragen, jedoch zusätzliche Anforderungen an die verfahrenstechnische Umsetzung (z. B. Abluftbehandlung) stellen.

Die Untersuchungen zur Spurenstoffelimination mittels BDD zeigen, dass für ausgewählte Arzneimittel relevante Abbauraten erzielt werden können und somit eine Grundlage für die Definition von Zielparametern für die weitere Systemauslegung geschaffen wurde. Die nachgeschaltete Photokatalyse wurde insbesondere im Hinblick auf den weiteren Abbau verbleibender Arzneimittelrückstände untersucht. Dabei zeigte sich ein Abbauverhalten pseudo-erster Ordnung mit deutlichen substanzspezifischen Unterschieden in der Kinetik. Während einzelne Stoffe vergleichsweise gut abgebaut werden konnten, wurde die angestrebte Reduktion innerhalb der betrachteten Reaktionszeiten im Mittel nicht erreicht. Da die Photokatalyse als ergänzende Verfahrensstufe zur BDD-Behandlung konzipiert ist, ist jedoch von einer additiven Gesamtwirkung beider Prozesse auszugehen.

Für Summenparameter wie CSB, mikrobiologische Kenngrößen sowie anorganische Stickstoffverbindungen konnten im Rahmen der photokatalytischen Behandlung keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden, sodass kein zusätzlicher Synergieeffekt hinsichtlich der Nitrifikation zu erwarten ist. Insgesamt zeigen die bisherigen Ergebnisse, dass die Kombination aus Diamantelektrolyse und Photokatalyse ein vielversprechender Ansatz zur Behandlung von urinbasierten Düngerlösungen ist, wobei die BDD-Stufe die zentrale Rolle hinsichtlich Oxidation und Desinfektion einnimmt und die Photokatalyse als ergänzende Stufe zur weiteren Spurenstoffreduktion dient.

Die Ergebnisse der halbtechnischen Versuche bestätigen die grundsätzliche Übertragbarkeit der im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse, zeigen jedoch gleichzeitig maßgebliche Herausforderungen für die technische Umsetzung auf. Insbesondere konnte nachgewiesen werden, dass die Diamantelektrolyse auch bei deutlich reduziertem Energieeintrag eine zuverlässige Desinfektionsleistung erbringt. Die Oxidation organischer Spurenstoffe war hingegen unter den gegebenen Bedingungen limitiert, sodass die im Labormaßstab definierten Zielparameter für den Energieeintrag im technischen Maßstab weiterhin als notwendig anzusehen sind.

Die nachgeschaltete Photokatalyse konnte die Abbaurate einzelner Mikroschadstoffe erhöhen, zeigte jedoch auch im halbtechnischen Maßstab keine ausreichende Leistungsfähigkeit für eine vollständige Elimination. Zudem wurde deutlich, dass matrixbedingte Effekte, wie die Bildung von Zwischenprodukten oder Partikeln, einen

stärkeren Einfluss auf Summenparameter wie TOC und Trübung haben als im Labormaßstab. Die Ergebnisse verdeutlichen somit, dass die Kombination beider Verfahren grundsätzlich geeignet ist, jedoch eine gezielte Anpassung der Betriebsparameter, insbesondere der elektrochemischen Leistungsdichte sowie der Reaktorauslegung, erforderlich ist, um die angestrebte Reinigungsleistung im technischen Maßstab zuverlässig zu erreichen.

## 2 Einleitung

Im Rahmen des Vorhabens „Elektrochemische Nachbehandlung von biologisch hergestelltem Urindünger für die Lebensmittelproduktion (EULe)“ wurde ein innovativer Ansatz zur dezentralen Aufbereitung separat erfassten menschlichen Urins untersucht. Ausgangspunkt des Projektes war die wachsende Bedeutung der Nährstoffrückgewinnung vor dem Hintergrund globaler Rohstoffabhängigkeiten, steigender Energieaufwendungen in der Düngemittelproduktion sowie verschärfter Anforderungen an die Spurenstoffelimination in der Siedlungswasserwirtschaft. Insbesondere die getrennte Erfassung von Urin eröffnet aufgrund der hohen Nährstoffkonzentrationen – bei gleichzeitig vergleichweisem geringem Volumen – erhebliche Potenziale zur Substitution mineralischer Düngemittel, zur Entlastung zentraler Kläranlagen und zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Gleichzeitig bestehen jedoch Herausforderungen hinsichtlich Hygienisierung, Stabilisierung sowie der zuverlässigen Entfernung organischer Mikroschadstoffe, insbesondere im Kontext medizinischer Einrichtungen mit erhöhten Arzneimittelfrachten.

Ziel des Projektes war daher die Entwicklung und Untersuchung einer kombinierten Verfahrenslösung aus biologischer Nitrifikation mittels C.R.O.P.®-Filter und anschließender physikochemischer Nachbehandlung durch Advanced Oxidation Processes (AOP). Hierbei wurden insbesondere die Diamantelektrolyse mit bor-dotierten Diamantelektroden sowie die UV-A-basierte Photokatalyse als potenziell wartungsarme, chemikalienfreie und elektrisch betriebene Oxidationsverfahren betrachtet. Beide Technologien basieren auf der in-situ-Generierung hochreaktiver Hydroxylradikale und versprechen eine simultane Desinfektion sowie Oxidation persistenter organischer Spurenstoffe ohne Einsatz zusätzlicher Betriebsmittel.

Im Projektverlauf wurden Demonstratorreaktoren entwickelt, aufgebaut und in Kombination mit C.R.O.P.®-Testständen betrieben. Dabei standen die vollständige Nitrifikation, die hygienische Unbedenklichkeit des erzeugten Düngers sowie die Degradation ausgewählter Mikroschadstoffe im Fokus der Untersuchungen. Ergänzend wurden Online-Messkonzepte zur Prozessüberwachung erprobt und grundlegende Erkenntnisse zu Abbaukinetiken, Betriebspunkten und energetischen Kenngrößen gewonnen. Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Hochschule Hof, DLR und industriellen Partnern konnte der Transfer raumfahrtbasierter Kreislauftechnologien in den Kontext urbaner, dezentraler Infrastruktursysteme untersucht werden.

# 3 Hauptteil

## 3.1 C.R.O.P. Anlage DLR

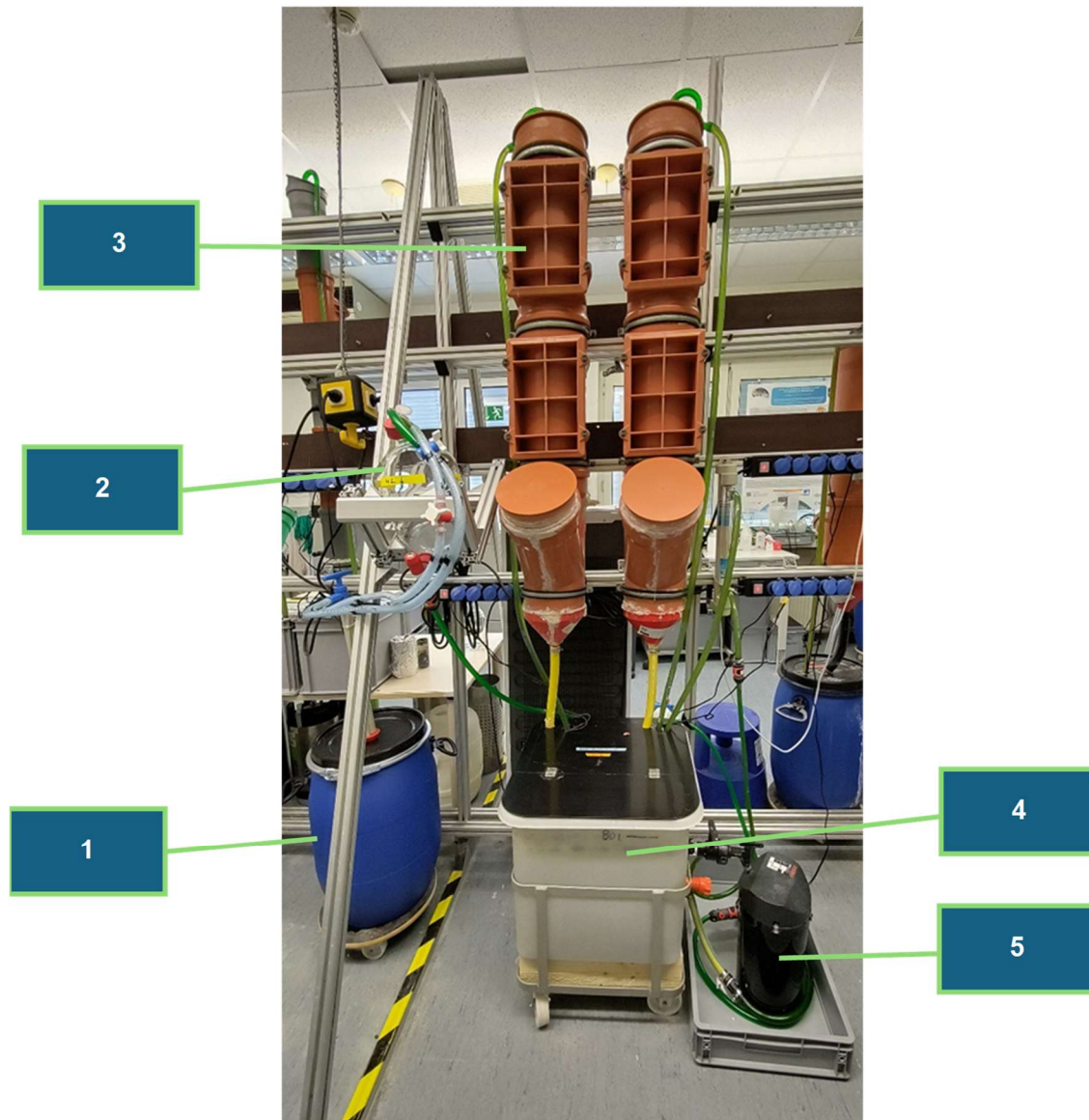


Abbildung 1. C.R.O.P.-Filter für die Verarbeitung von Urin. 1 = Vorlagetank mit Urin; 2 = Pumpvorrichtung zum Abmessen der täglichen Menge Urin (3 L); 3 = Rieselfilter; 4 = Filtertank, aus dem der Urin immer wieder durch die Filter gepumpt wird; 5 = Außenfilter mit Muschelschalen als Puffermaterial.

Der verwendete Urindünger wurde in einer Versuchsanlage im DLR C.R.O.P.-Labor hergestellt. Die sog. C.R.O.P.-Anlage besteht aus zwei parallellaufenden Rieselfiltern, die jeweils 20 L Blähtongranulat als Biofilmträgermaterial enthalten (Abb. 1). Der Biofilm ist auf Urin als Substrat konditioniert und setzt den im Urin enthaltenen Harnstoff über die Zwischenprodukte Ammonium und Nitrit zu Nitrat um (Nitrifikation). Die Anlage verarbeitete zum Zeitpunkt des Versuches 3 L Urin pro Tag, wobei 60 % des Stickstoffs in Nitrat umgesetzt wurde, während 40 % als Ammonium vorlagen. Die C.R.O.P.-Anlage ist mit einem Außenfilter ausgestattet, der Muschelschalen enthält. Diese werden von der Lösung im Tank

durchflossen und geben Calciumcarbonat ab, das als Puffer gegen die bei der Nitrifikation entstehende Säure dient. Ziel des Versuches war, über einen Zeitraum von vier Wochen, den gesamten von der Anlage hergestellten Dünger mit einem kombinierten Verfahren aus Diamantelektrolyse und Photokatalyse zu behandeln.

Als Produkt liefert die Anlage einen nitrifizierten Urin, der keinen Harnstoff mehr enthält und als Dünger eingesetzt werden kann. Urin kann Pathogene und Fäkalbakterien enthalten, die in ihrer Menge im C.R.O.P.®-Filter reduziert, aber nicht völlig entfernt werden. Genauso verhält es sich mit den Resten von Medikamenten, die im Urin enthalten sein können. Auch diese werden reduziert, aber in vielen Fällen nicht vollständig entfernt.

## 3.2 Laboraufbau

Für die Laborversuche wurden zwei Versuchsstände für die jeweiligen Verfahren Photokatalyse sowie Diamantelektrolyse aufgebaut. Für die Photokatalyse wurde ein dauerhaft gerührter Batchreaktor mit einem Volumen von 500ml konzipiert und eine LED-Panel mit 9 LED-Lichtquellen (Seoul CUN66A1B, 367nm, 1.85W elektrisch, 1 W radiometrisch) verwendet, wie in Abbildung 2 dargestellt.

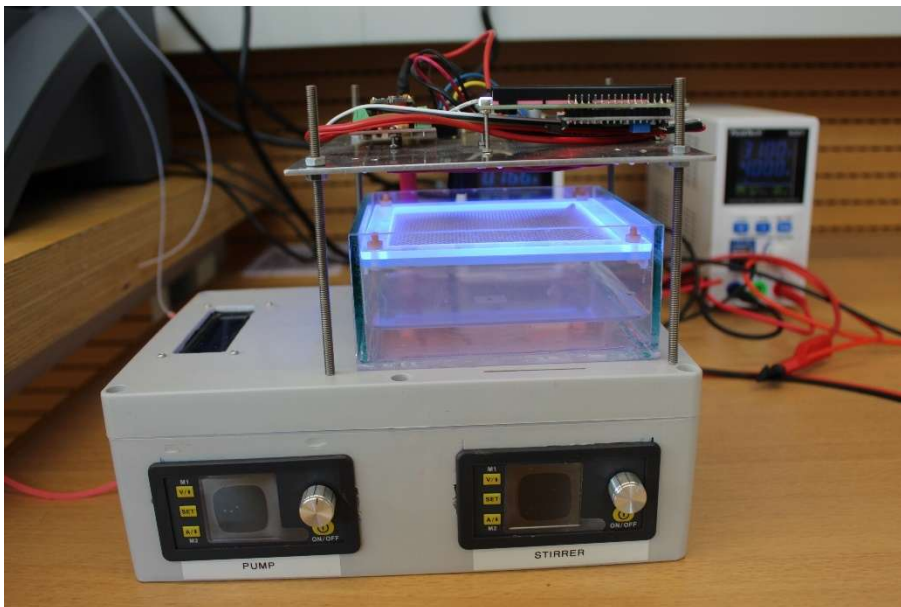


Abbildung 2. Laborversuchsaufbau Photokatalyse

Die LED's können mittels Arduino Nano gesteuert werden, sodass eine Anpassung der radiometrischen Leistung erreicht wird und so relevante Verfahrensparameter abzubilden. Die Photokatalysatoren wurden eigenständig mittels Sol-Gel-Verfahren auf Glasfaserträgern beschichtet. Die Träger besitzen die Abmessungen 10x10cm und werden im Versuch in die Matrix eingebracht. Hierbei ist zum einen ein niedriger Überstand ratsam, um die Absorptionseffekte der Matrix so gering wie möglich zu halten, zum anderen wurde der Abstand zum LED-Panel auf 5,86cm eingestellt um wie in Schnabel et al. [1] beschrieben ein homogenes Lichtfeld zu erhalten.

Für die Diamantelektrolyse wurden ein Durchlaufreaktor aufgebaut (siehe Abbildung 3). Dieser umfasste 2 Bor-dotierte Diamantelektroden (zur Verfügung gestellt vom assoziierten Projektpartner DIACCON GmbH, Elektrodenfläche 50cm<sup>2</sup>), welche in ein Volumen von 36ml

eingetaucht wurden. Der Reaktor ist mit einer Peristaltikpumpe verbunden die sich im Bereich 3 bis 10 ml/min stufenlos regeln lässt. Die Elektroden wurden an ein Labornetzteil angeschlossen. Somit konnte die elektrische Leistung sowie die Aufenthaltszeit der Matrices variiert und ausgewertet werden.

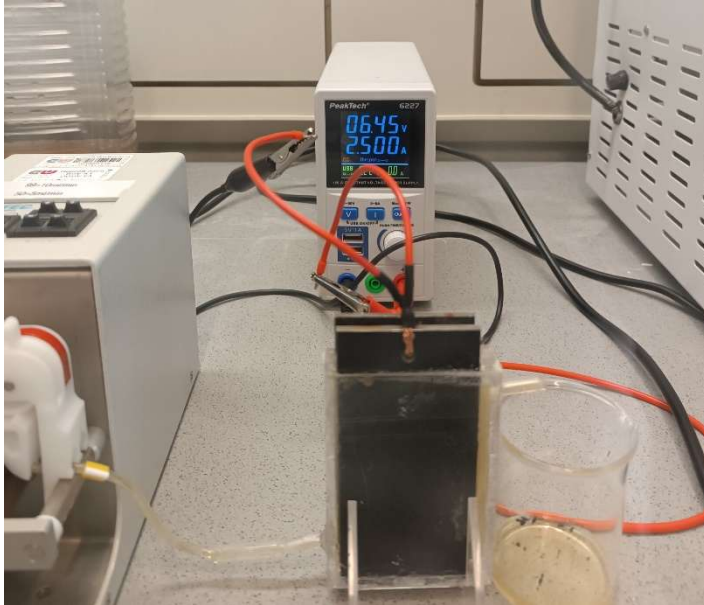


Abbildung 3. Laborversuchsaufbau Diamantelektrolyse

### 3.3 Versuchsauswertung Laborversuche

Für die Laborversuche wurde dem Labor der Hochschule seitens des DLR eine C.R.O.P.-Lösung zur Verfügung gestellt. Die Proben wurden zunächst mittels Kaffeefilter vorfiltriert und anschließend in den jeweiligen Versuchsanlagen eingesetzt. In einer ersten Versuchsreihe wurde die filtrierte Lösung ohne weitere Behandlung direkt eingesetzt, um Veränderungen der Summenparameter zu untersuchen. Für eine zweite Versuchsreihe wurden definierte Konzentrationen ausgewählter Arzneimittel (Paracetamol, Venlafaxin, Naproxen und Metoprolol; jeweils 10 mg/L) zudosiert. Anschließend erfolgte die Behandlung der Proben, wobei insbesondere die Abbaukinetik der zugesetzten Substanzen analysiert wurde.

#### 3.3.1 BDD Versuche

Für die Versuche mit den Bor-dotierten Diamantelektroden wurde das System auf die eingetragene Stromdichte gegen die Abbaukinetik untersucht. Hierfür wurde eine stufenlos regelbare Pumpe angeschlossen sowie die Stromstärke mittels eines Labornetzgeräts variiert. Insgesamt wurden so 30 Messpunkte zwischen 0,5 bis 50 Wh/l abgefahren.

Die in den Abbildungen 4–6 dargestellten Ergebnisse zeigen einen für die BDD-Behandlung typischen Verlauf der Stoffumwandlungen in Abhängigkeit des spezifischen Energieeintrags, welcher durch weitere Versuchsreihen in vergleichbarer Form bestätigt werden konnte. Die Auswertung dieser Parameter diente im Projekt jedoch primär der begleitenden Prozessbeobachtung, während die eigentliche Systemauslegung auf anderen Kenngrößen basierte (vgl. Abbildung 7).

Mit zunehmendem Energieeintrag ist eine deutliche Abnahme des CSB zu erkennen, was auf eine fortschreitende Oxidation organischer Inhaltsstoffe hinweist. Parallel dazu zeigt sich eine Umwandlung der Stickstoffspezies, wobei insbesondere eine Zunahme der Nitratkonzentration bei gleichzeitig leicht sinkenden Ammoniumgehalten beobachtet wird. Dies deutet auf eine elektrochemisch induzierte Nitrifikation bzw. weitergehende Oxidationsprozesse hin und ist im Hinblick auf die Stabilität der Düngerlösung grundsätzlich positiv zu bewerten. Demgegenüber steht jedoch der signifikante Abfall des pH-Wertes im Verlauf der Behandlung, der bis in stark saure Bereiche reicht. Dieser Effekt ist verfahrenstechnisch kritisch, da er sowohl die Materialbeständigkeit als auch eine mögliche Nachnutzung der Lösung beeinflussen kann und daher in zukünftigen Systemauslegungen berücksichtigt werden muss.

Die Konzentrationen der anorganischen Hauptbestandteile zeigen insgesamt keine gravierenden Veränderungen, was darauf hindeutet, dass die BDD-Behandlung selektiv auf organische Inhaltsstoffe und reaktive Stickstoffspezies wirkt. Nitrit konnte in keiner Probe nachgewiesen werden, während Nitrat als dominierende oxidierte Stickstoffform auftritt. Besonders hervorzuheben ist die mikrobiologische Wirkung des Verfahrens: In allen untersuchten Proben konnte eine vollständige Desinfektion nachgewiesen werden (0 KBE/100 ml), unabhängig vom eingestellten Energieeintrag. Dies unterstreicht das Potenzial der Diamantelektrolyse als kombiniertes Oxidations- und Desinfektionsverfahren.

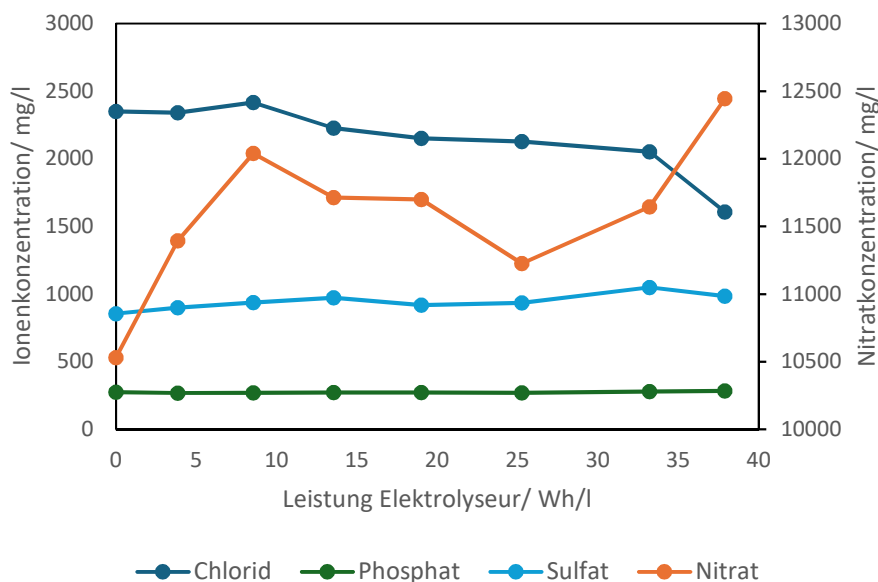


Abbildung 4: Anionenkonzentration BDD Versuch 1 zu Stromdichte am Elektrolyseur

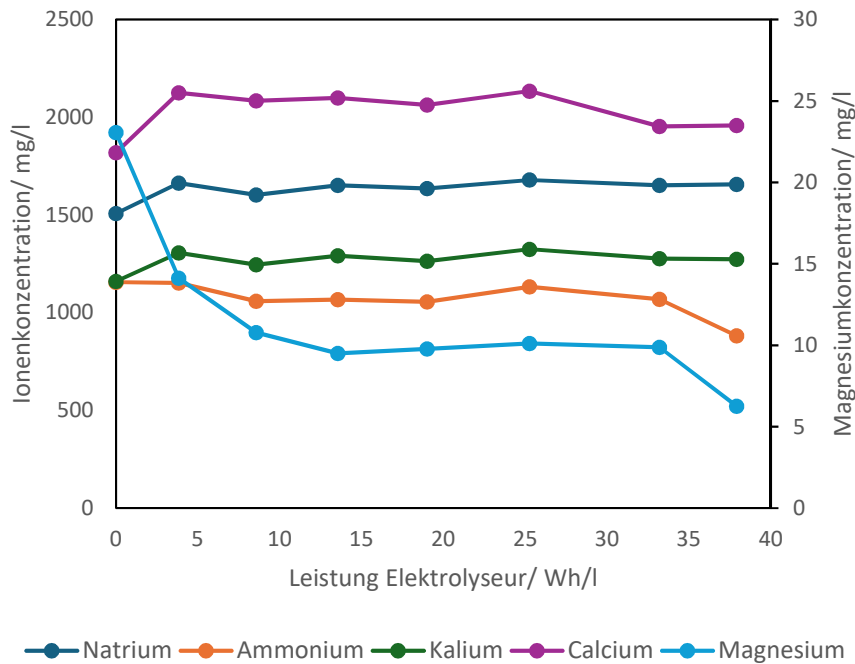


Abbildung 5: Kationenkonzentration BDD Versuch 1 zu Stromdichte am Elektrolyseur

Während der Versuche wurde zudem eine deutliche Chlorbildung festgestellt, die sich sowohl olfaktorisch als auch analytisch bemerkbar machte. Diese führt zu einer zusätzlichen oxidativen Wirkung und kann eine gewisse Residualdesinfektion im System bewirken. Gleichzeitig ist die Bildung von Chlor bzw. chlorhaltigen Spezies kritisch zu bewerten, da insbesondere gasförmiges Chlor gesundheitsschädlich ist. Für eine technische Umsetzung ist daher eine geeignete Nachbehandlung, beispielsweise in Form einer Gaswäsche, zwingend erforderlich.

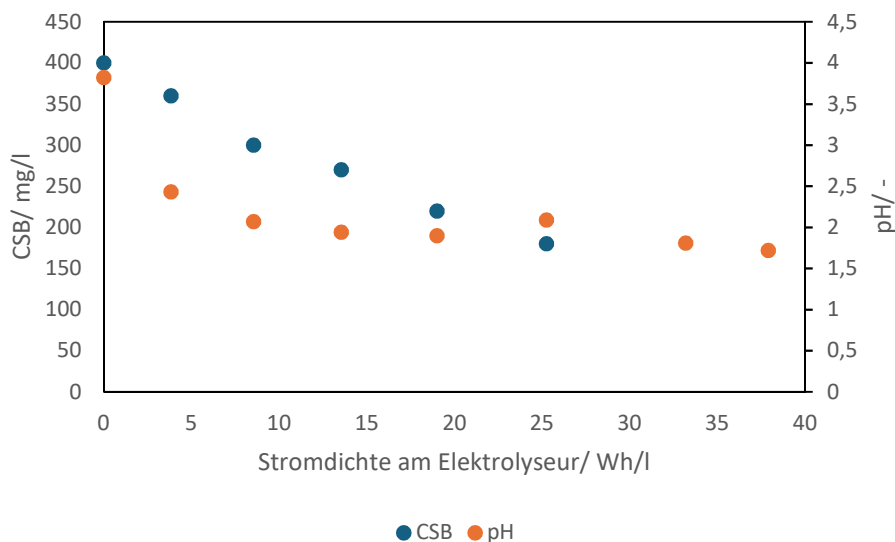


Abbildung 6: CSB und pH-Wert BDD Versuch 1 zu Stromdichte am Elektrolyseur

Insgesamt liefern die dargestellten Ergebnisse ein konsistentes Bild der elektrochemischen Prozesse im System und dienen als wichtige Grundlage für das Prozessverständnis, auch wenn die maßgeblichen Auslegungsparameter in den weiterführenden Untersuchungen (vgl. Abbildung 7) definiert wurden.

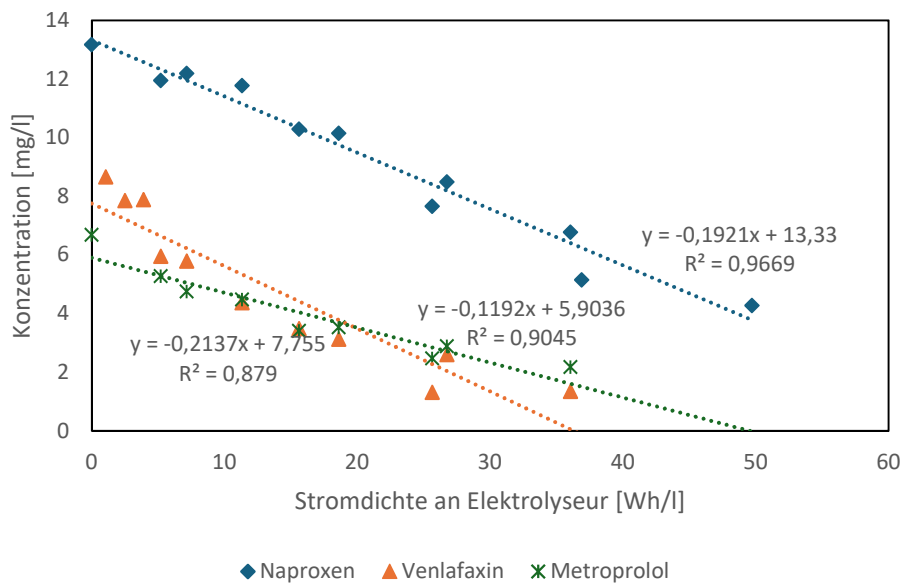


Abbildung 7: Abbaukinetik der zudosierten Arzneimittel in C.R.O.P. Matrix in Abhängigkeit der Stromdichte am Elektrolyseur

Die Auswertung der Versuchsdaten ist beispielhaft in Abbildung 7 dargestellt. Die Analytik erfolgte mittels HPLC-DAD. Für Paracetamol konnte mit der eingesetzten LC-Methode keine ausreichende analytische Zuverlässigkeit erzielt werden, sodass dieses für die weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt wurde. Die folgenden Betrachtungen konzentrieren sich daher auf die verbleibenden drei Arzneimittel.

Die Ergebnisse der Laborversuche mit BDD-Elektroden dienen als Grundlage für die Skalierung des Systems. In Anlehnung an das Schweizer Konzept wurde eine mittlere Abbaurrate von 80 % für die betrachteten anthropogenen Spurenstoffe angestrebt. Daraus wurde ein Energieeintrag von 40 Wh/L als Zielgröße für die weiteren Untersuchungen abgeleitet.

### 3.3.2 Photokatalyse Versuche

Für die Behandlung des Systems mittels Photokatalyse wurde sich größtenteils auf den Abbau der Arzneimittel fokussiert. Im geplanten System soll die Photokatalyse als nachgeschaltete Stufe hinter der BDD erfolgen. Grundsätzlich ist die Photokatalyse mit abnehmender Konzentration an Schadstoffen (insbesondere org. Inhaltstoffen) effizienter, da weniger Konkurrenz für Radikalreaktionen vorhanden sind.

In den nachfolgenden Versuchsauswertungen wurde mit den C.R.O.P. Lösungen vom DLR so verfahren wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben und ebenfalls die Matrix mit Arzneimitteln aufgestockt. Die Versuche erfolgten wie beschrieben im Batchsystem über eine Dauer von 180 Minuten.

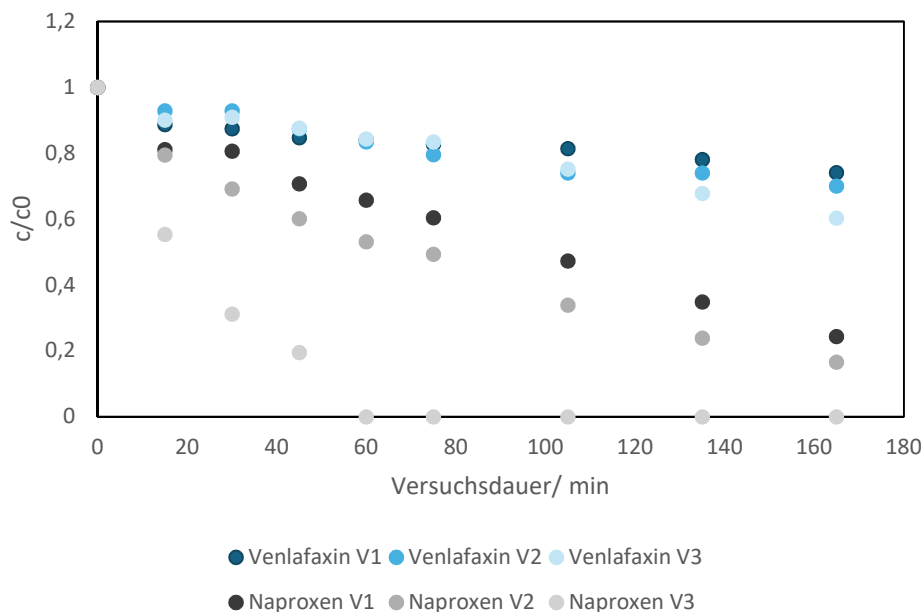


Abbildung 8: Abbaukinetik für Arzneimittel mittels Photokatalyse im Batchsystem für 180 Minuten

In Abbildung 8 ist die Abbaukinetik der untersuchten Arzneimittel für drei Versuchsreihen, jeweils normiert auf den Ausgangswert, dargestellt. Aufgrund analytischer Einschränkungen bei der HPLC konnten innerhalb der Versuche lediglich Venlafaxin und Naproxen zuverlässig ausgewertet werden. Für beide Substanzen zeigt sich ein Abbauverhalten pseudo-erster Ordnung, wobei deutliche Unterschiede in der Reaktionskinetik erkennbar sind. Naproxen wurde im Vergleich zu Venlafaxin signifikant schneller und in höherem Maße abgebaut. Im Mittel konnten die angestrebten 80 % Reduktion innerhalb der betrachteten Reaktionszeit jedoch nicht erreicht werden. Da die Photokatalyse im vorliegenden System als nachgeschaltete Verfahrensstufe zur BDD-Behandlung konzipiert ist, ist von einer additiven Gesamtwirkung beider Prozesse auszugehen.

Die Untersuchung relevanter Summenparameter (CSB, KBE/CFU und Nitrat) zeigte keine signifikanten Veränderungen infolge der photokatalytischen Behandlung. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass neben dem verbesserten Abbau von Arzneimittelrückständen ein zusätzlicher Synergieeffekt hinsichtlich der Nitrifikation erzielt werden kann.

Für die Skalierung des Systems konnten auf Basis der vorliegenden Daten keine belastbaren Auslegungsparameter abgeleitet werden. Daher wurde für weiterführende Untersuchungen ein Versuchsreaktor der Firma Lynatox für die Behandlung entsprechender Volumenströme im halbertechnischen Maßstab ausgelegt.

### 3.4 Halbtechnische Versuche am DLR®

Der von der C.R.O.P.®-Anlage produzierte Dünger wurde jeweils über eine Woche in einem Kanister gesammelt und als Batch von 15 L behandelt. Da die Geräte für größere Feststoffpartikel nicht geeignet sind, wurde der Urin vorab filtriert (Vakuumfiltration, Whatman 42, 200 µm Porengröße).

Da die Wirksamkeit der Photokatalyse von der Trübung bzw. Färbung der behandelten Flüssigkeit beeinträchtigt wird, wurde immer zuerst die Elektrolyse durchgeführt. Die Behandlungsdauer betrug jeweils zwischen einer und drei Stunden (siehe Tabelle 1). Zusätzlich zu den Versuchen mit der kombinierten Behandlung aus BDD und PK wurde ein Versuch mit BDD und UV durchgeführt. Dabei wurde ein handelsüblicher UV-Klärer für Aquarien ([hw UV-Wasserklärer Modell 500 | HW Wiegandt Aquaristik](#)) in den BDD-Kreislauf integriert und über drei Stunden zusammen mit der BDD betrieben. Da kein Urindünger aus der gleichen Anlage zur Verfügung stand, stammte der dafür verwendete Urindünger aus einer anderen Versuchsanlage. Die Versuchsaufbauten von BDD und PK sind in den Abb. 2 und 3 dargestellt.

Tabelle 1: Versuchsparemeter (BDD = Bordotierte Diamantelektrolyse, PK = Photokatalyse).

Datum	Versuchs nr.	Behandlungsdauer BDD [h]	Stromstärke/ Spannung/ Durchfluss/ Stromdichte	BDD Leistung	Behandlungsdauer PK [h]	Stromstärke/ Spannung/ Durchfluss/ Strahlungsleistung	PK Bestrahlungsstärke
05.11.2025	1	3	16 A/5 V 150 L/h/ 100 mA/cm <sup>2</sup>	1,6 Wh/L	1	24 V/0,5 A  45 L/h 115 W	16 mW/cm <sup>2</sup>
11.11.2025	2	2		1,1 Wh/L	1		
18.11.2025	3	1		0,5 Wh/L	1		
25.11.2025	4	1			2		
01.12.2025	5	1			3		
13.11.2025	Zusatzversuch	3			1,6 Wh/L	UV	4,9 W UV-C-Leistung

Aufgrund der eingeschränkten Leistung der zur Verfügung gestellten Geräts konnte bei der BDD nicht die gleiche Leistung wie bei den Laborversuchen verwendet werden (Zielgröße BDD: 40 Wh/L, max. erreicht: 1,6 Wh/L). Dafür müssten Behandlungsdauern gewählt werden, die in der praktischen Umsetzung nicht realistisch wären. Daher wurde die Behandlungsdauer auf 3 Stunden begrenzt.



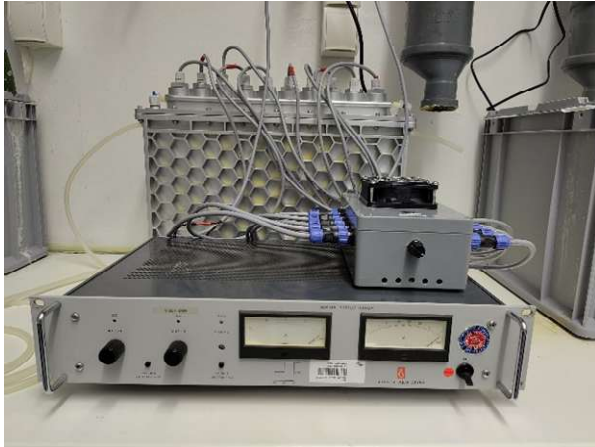


Abb. 3: Photokatalyse mit Stromquelle (Delta Elektronika Power Supply SM 7020).

## **Analysen**

### **Ionenchromatographie**

Für die Chromatographie wurde ein Metrohm 850 Professional IC verwendet. Der Anioneneluent war 3,2 mmol  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  und 1,0 mmol  $\text{NaHCO}_3$  in 1 L Reinstwasser. Der Kationeneluent 1,7 mmol  $\text{HNO}_3$  und 0,7 mmol Dipicolinsäure in 1 L Reinstwasser. Als Kationensäule wurde Metrosep C4 – 150/4.0 (Metrohm) und als Anionensäule Metrosep A Supp 5 - 150/4.0 verwendet. Um Verunreinigungen des Gerätes zu vermeiden, wurden die Proben vor der Messung mit einer Ultrafiltration gereinigt. Die folgenden Ionen wurden bestimmt: Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ), Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ), Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Natrium ( $\text{Na}^+$ ), Kalium ( $\text{K}^+$ ), Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), und Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Alle Konzentrationen werden in mg/L angegeben.

### **pH-Messung**

Die Messungen des pH-Werts und der Temperatur erfolgten mit dem Multimeter Multi 3630 IDS (WTW, Deutschland) und der entsprechenden Sonde (SenTix®41 von WTW, Deutschland).

### **Trübungsmessung**

Die Trübungsmessungen wurden mit dem WTW Turbidimeter Turb 430 IR/T durchgeführt. Für jeden Messpunkt wurden zwei unabhängige Proben gemessen und der Mittelwert bestimmt.

### **TOC-Messung**

Die TOC (Total Organic Carbon) Messung wurde mit dem Photometer Hach Lange DR 3900 und den Hach Lange TOC Fertigküvettestests durchgeführt. Alle Messungen sind in mg/L angegeben.

### **Medikamentenreste**

In Anlehnung an die DIN SPEC 91421 wurden die Konzentrationen der Medikamente Carbamazepin, Ciprofloxacin, Clarithromycin, Diclofenac, Estradiol und Ethinylestradiol im unbehandelten Dünger, im BDD-behandelten Dünger und im BDD- und PK, bzw. BDD- und UV-behandelten Dünger gemessen. Die Messung wurde mit einer High Performance Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry (HPLC-MS/MS) durch die Firma Lipidomix

GmbH in Berlin durchgeführt. Bei den gelb markierten Messungen gab es Probleme mit den Proben, die nicht geklärt werden konnten. Dabei lag die Wiederfindung der internen Standards unter 10 %, was die Sensitivität der Messung beeinträchtigt hat.

## Mikrobiologie

In Anlehnung an die DIN SPEC 91421 wurden folgende Pathogene bzw. Indikatororganismen untersucht: *E. coli*, Coliforme Keime, Salmonellen, *Enterococcus sp*, *C. perfringens* und Somatische Coliphagen Da diese oft nicht in dem Urindünger vorkommen wurden zusätzlich die Koloniebildenden Einheiten bei 22 und 36 °C bestimmt. Die Analysen wurden durch das Labor Quade durchgeführt.

## Ergebnisse

### Bordotierte Diamantelektrolyse

Bei allen Versuchen sind wie im Labor erhebliche Mengen Chlor und Chloramine entstanden. Diese konnten durch den entstehenden Geruch identifiziert werden. Die Entfernung von Chlorid aus dem Dünger war bei den Versuchen mit mehr als einer Stunde Behandlungsdauer bei der ionenchromatographischen Messung der Chlorid-Ionen im Dünger in den Daten sichtbar. Der pH-Wert stieg in den meisten Versuchen am Anfang, um dann abzufallen. Bei der Temperatur wurde immer ein leichter Anstieg beobachtet (Abb. 3 bis 7).

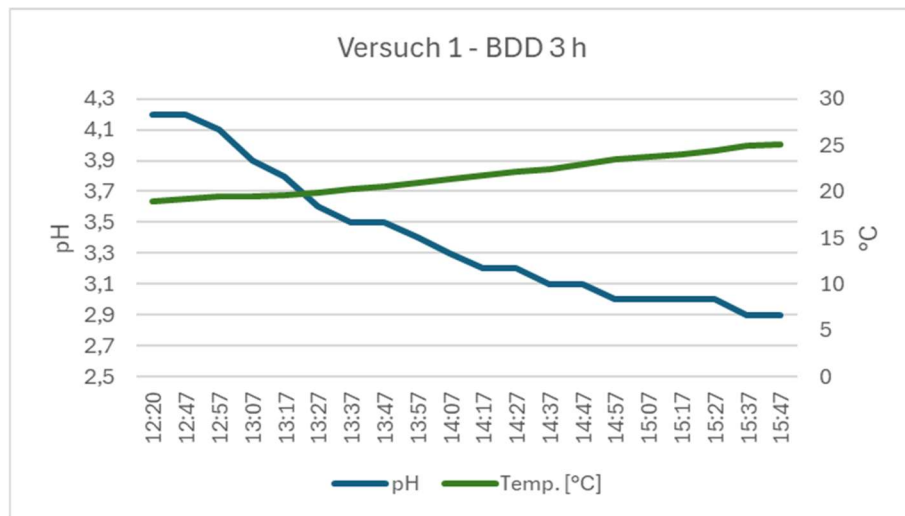


Abb. 3: Versuch 1. Verhalten von pH-Wert und Temperatur bei der dreistündigen BDD-Behandlung.

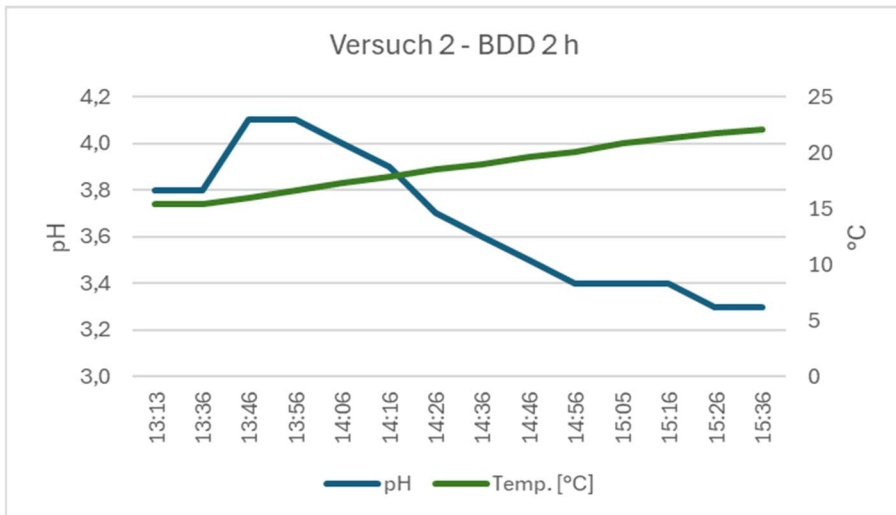


Abb. 4: Versuch 2. Verhalten von pH-Wert und Temperatur bei der zweistündigen BDD-Behandlung.

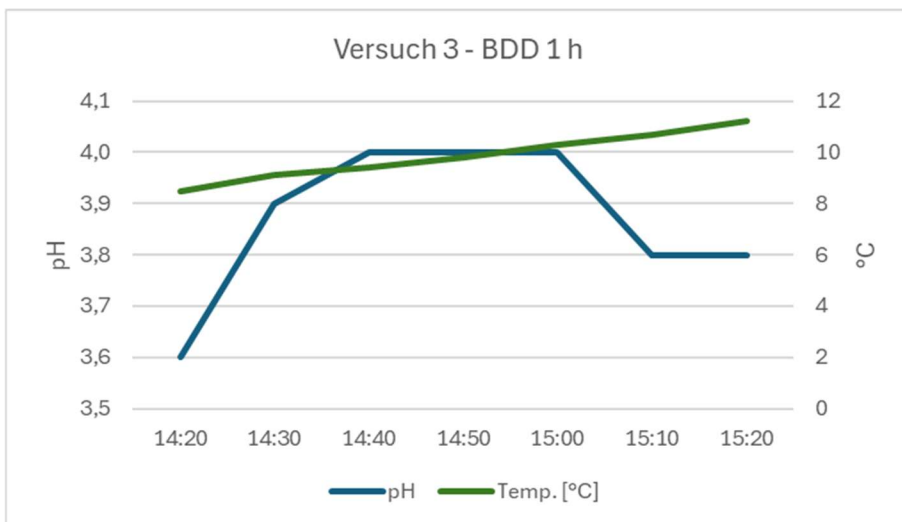


Abb. 5: Versuch 3. Verhalten von pH-Wert und Temperatur bei der einstündigen BDD-Behandlung.

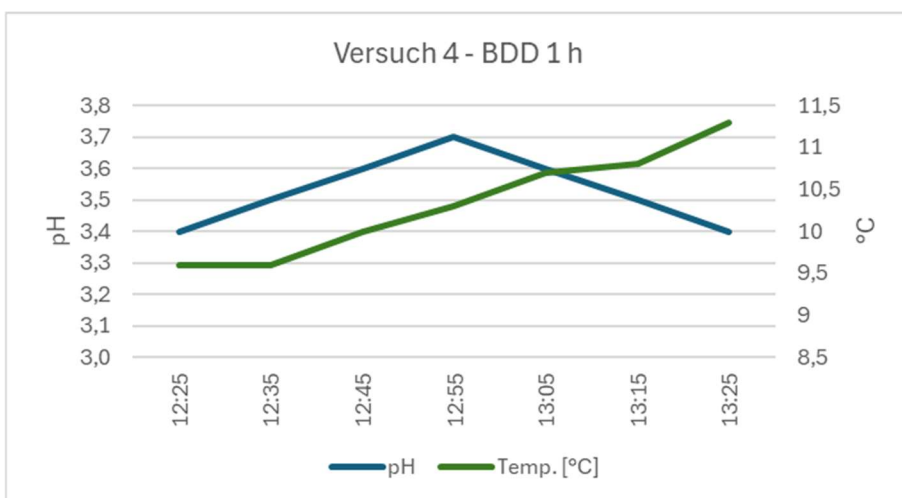


Abb. 6: Versuch 4. Verhalten von pH-Wert und Temperatur bei der einstündigen BDD-Behandlung.

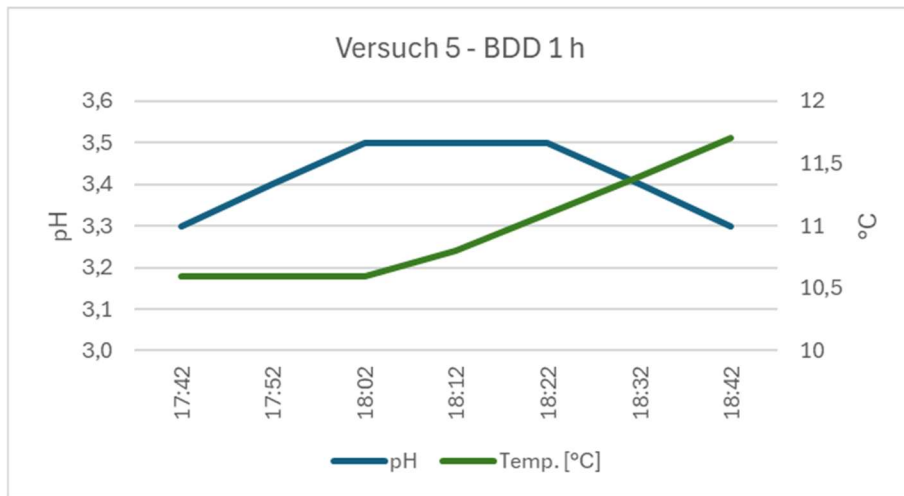


Abb. 7: Versuch 5. Verhalten von pH-Wert und Temperatur bei der einstündigen BDD-Behandlung.

Der saure pH-Wert des Düngers bleibt bei der BDD-Behandlung erhalten. Das ist vorteilhaft für eine Lagerung, da der saure pH das Wachstum von Pathogenen unterdrückt.

### Photokatalyse

Die Photokatalyse wurde immer nach der Diamantelektrolyse durchgeführt. Der pH-Wert blieb während der Behandlung weitgehend konstant oder sank leicht, während ein leichter Temperaturanstieg beobachtet werden konnte. Eine Gasentwicklung wurde bei der PK nicht festgestellt. Temperatur und pH sind in den Abb. 8 bis 10 dargestellt. Die Werte von Versuch 4 und 5 wurden aufgrund eines technischen Problems nicht erfasst. Die gemessenen Stoffmengenkonzentrationen vor und nach der BDD und nach der PK sind in den Abb. 11 bis 15 gemeinsam dargestellt.

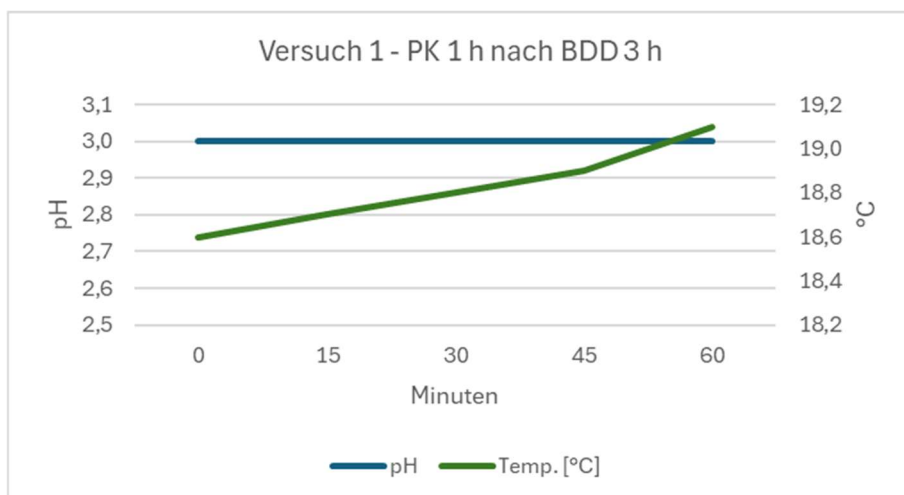


Abb. 8: Versuch 1. Entwicklung des pH-Werts und der Temperatur während der einstündigen PK nach drei Stunden BDD.

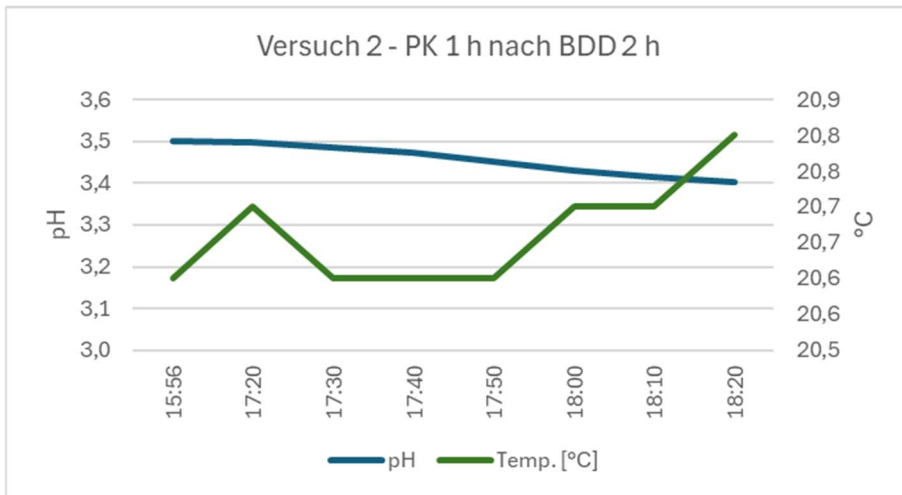


Abb. 9: Versuch 2. Entwicklung des pH-Werts und der Temperatur während der einstündigen PK nach zwei Stunden BDD.

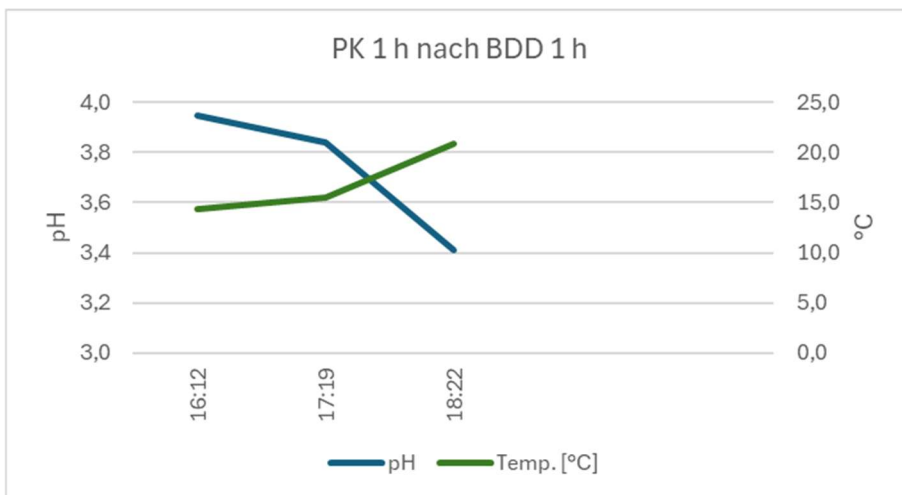


Abb. 10: Versuch 3. Entwicklung des pH-Werts und der Temperatur während der einstündigen PK nach einer Stunde BDD.

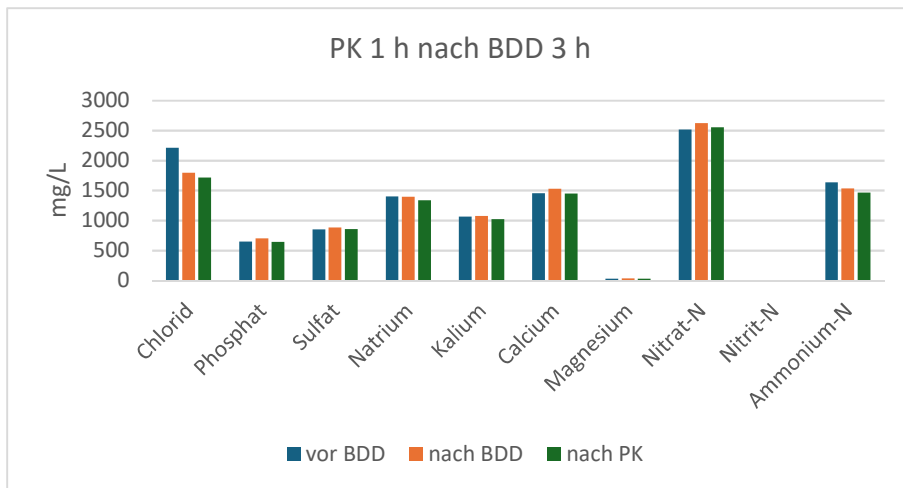


Abb. 11: Versuch 1. Ionenkonzentrationen vor und nach den Behandlungsschritten.

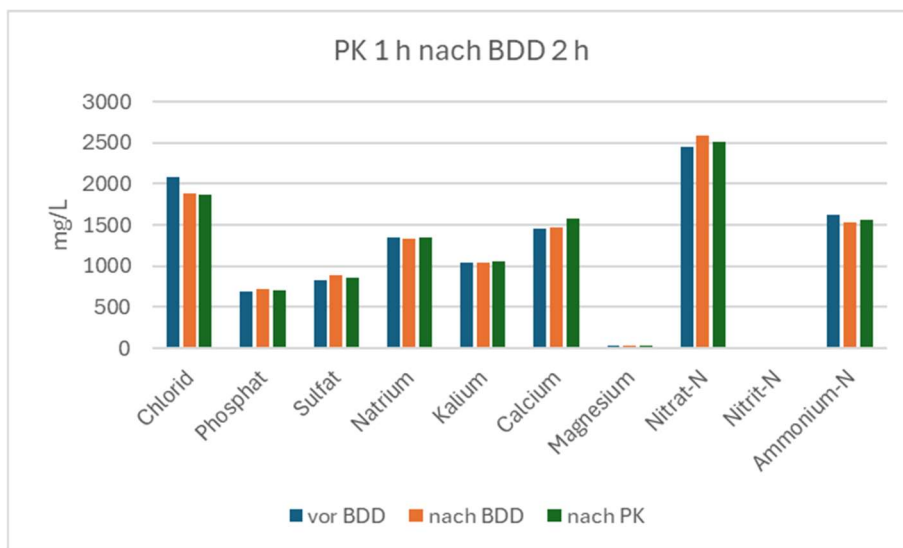


Abb. 12: Versuch 2. Ionenkonzentrationen vor und nach den Behandlungsschritten.

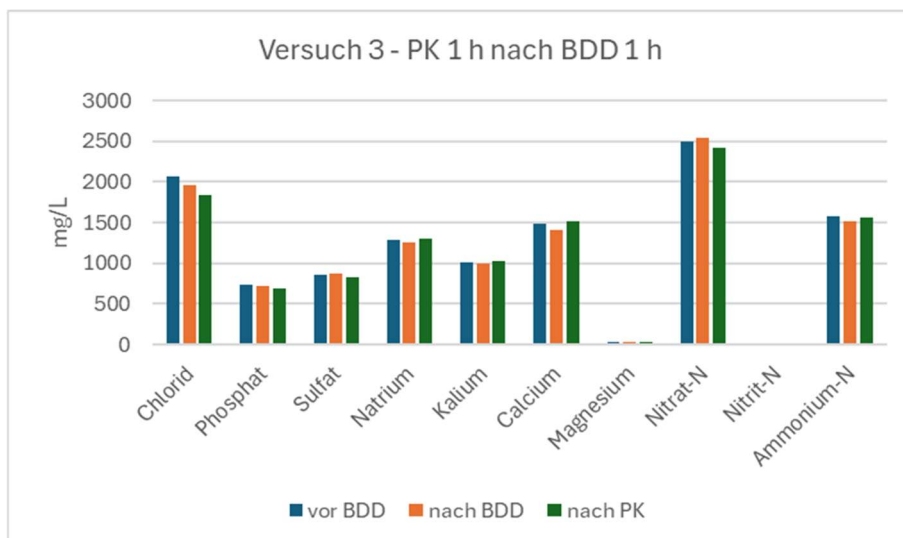


Abb. 13: Versuch 3. Ionenkonzentrationen vor und nach den Behandlungsschritten.

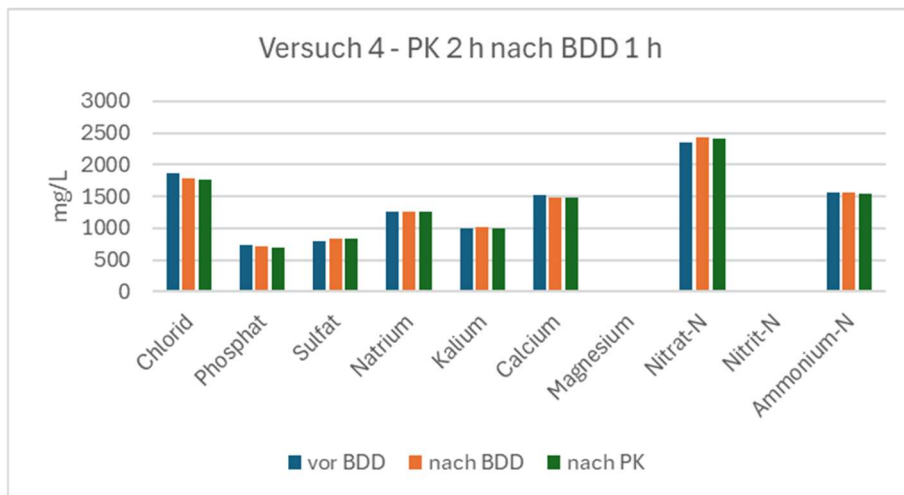


Abb. 14: Versuch 4. Ionenkonzentrationen vor und nach den Behandlungsschritten.

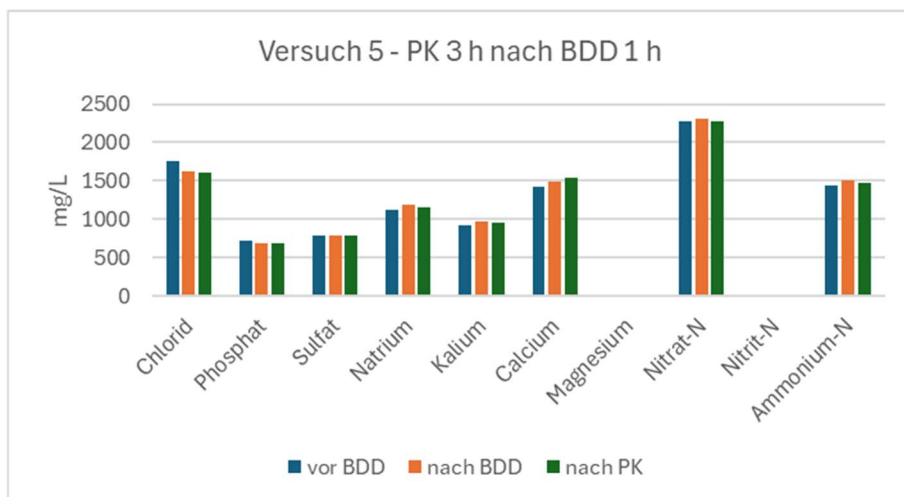


Abb. 15: Versuch 5. Ionenkonzentrationen vor und nach den Behandlungsschritten.

Die Chlorentwicklung spiegelt sich in der gemessenen Chlorid-Konzentration in den meisten Versuchen wider. Eine selektive Reduktion des Chlorid-Gehalts ist durchaus wünschenswert, da dieses von den Pflanzen nur in Spuren aufgenommen wird und sich in den Pflanzsubstraten in Gewächshäusern ansammeln könnte. Eine Oxidation von Ammonium zu Nitrat fand in nur sehr geringem Maße statt. Die übrigen mineralischen Bestandteile blieben ebenfalls weitgehend erhalten, so dass sich die Eigenschaften des Düngers durch die Behandlung nicht verändert haben.

### Zusatzversuch zur Bordotierten Diamantelektrolyse kombiniert mit UV-Behandlung

Da die BDD und die PK nicht simultan betrieben werden konnten, wurde ein Zusatzversuch mit einem UV-Klärer für Aquarien durchgeführt. Bei der dreistündigen Behandlung mit BDD und UV war ein deutliches Absinken des pH-Werts zu beobachten (Abb. 16). Auffällig ist, dass trotz Chlorentwicklung die gemessene Chloridkonzentration nach dem Versuch höher war, als vor dem Versuch. Die übrigen Ionenkonzentrationen veränderten sich kaum (Abb. 17). Die Ergebnisse stimmen weitgehend mit denen der Versuche 1 bis 5 überein.

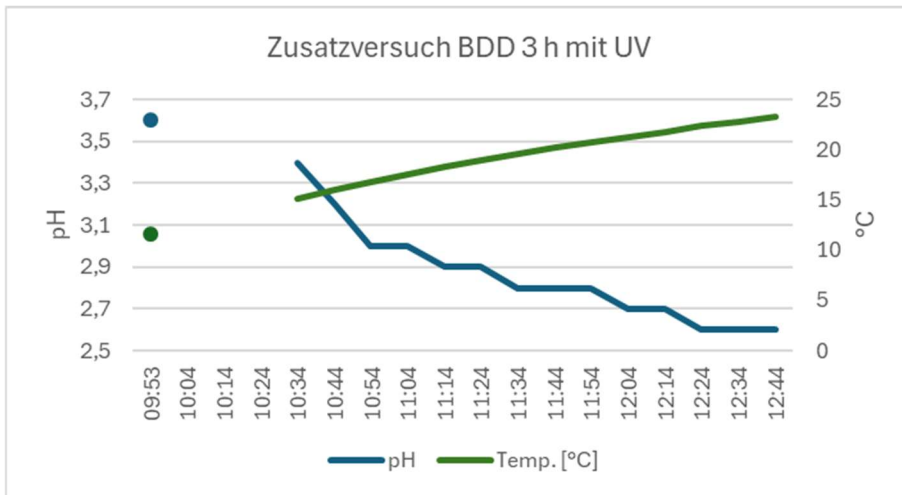


Abb. 16: Zusatzversuch mit Kombination aus BDD und UV. Entwicklung von Temperatur und pH-Wert.

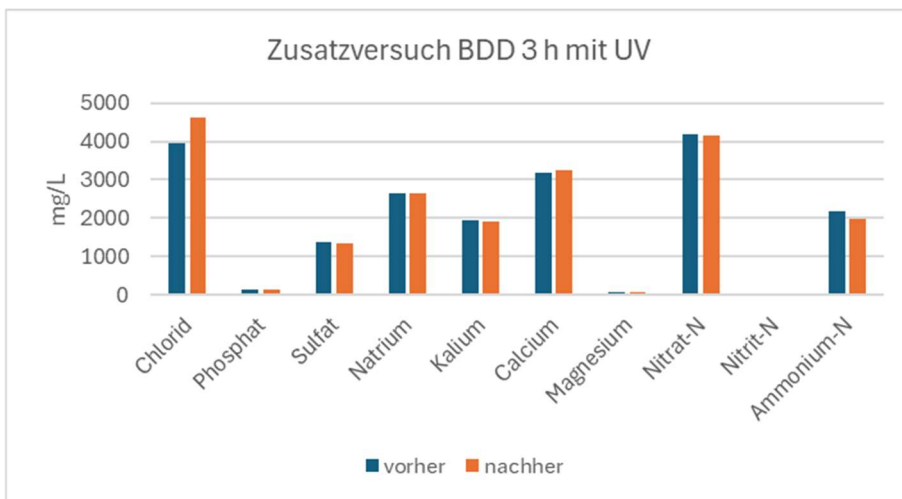


Abb. 17: Stoffmengenkonzentrationen vor und nach dem Zusatzversuch mit BDD und UV.

### Trübung

Trotz einer deutlichen Entfärbung (Abb. 18), ist eine Reduktion der Trübung nicht bei allen Versuchen nachweisbar (Abb. 19).

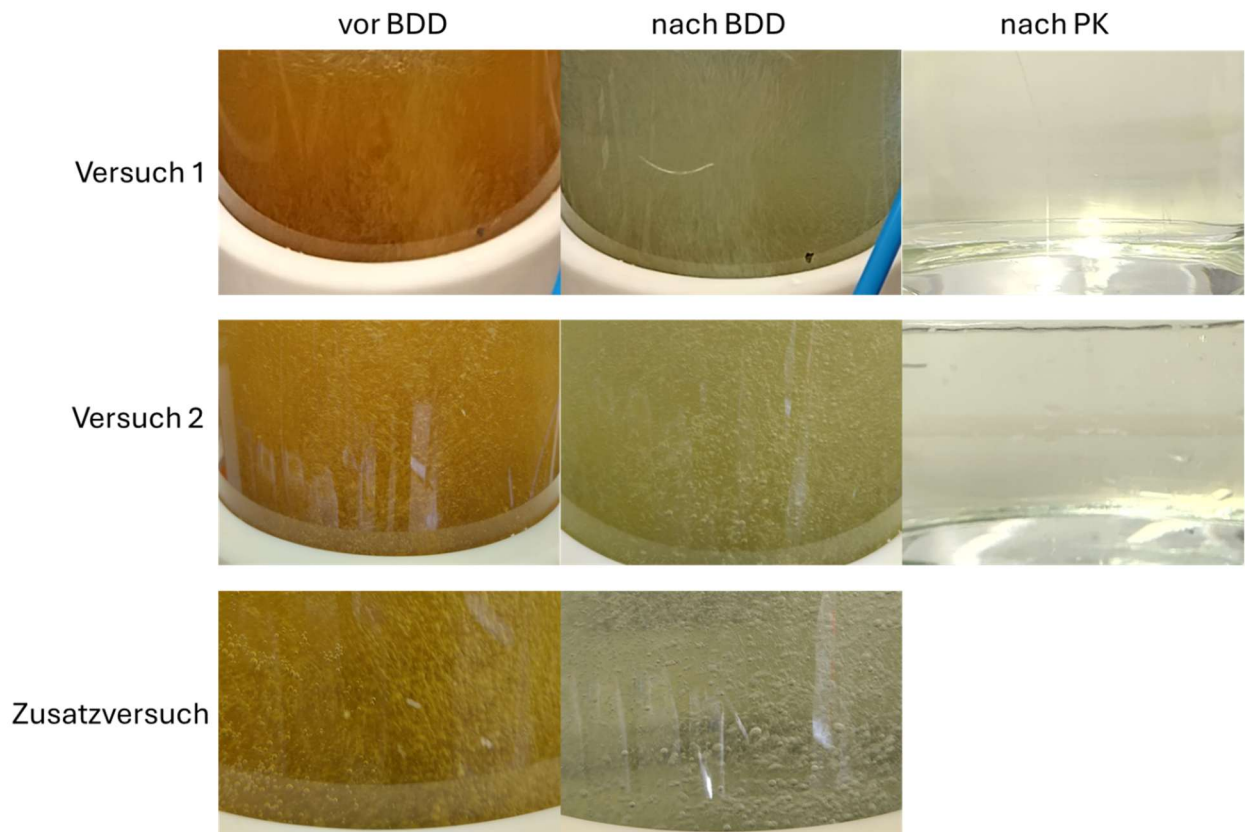


Abb. 18: Beispiele für die Entfärbung des Urindüngers im Laufe der Behandlung.

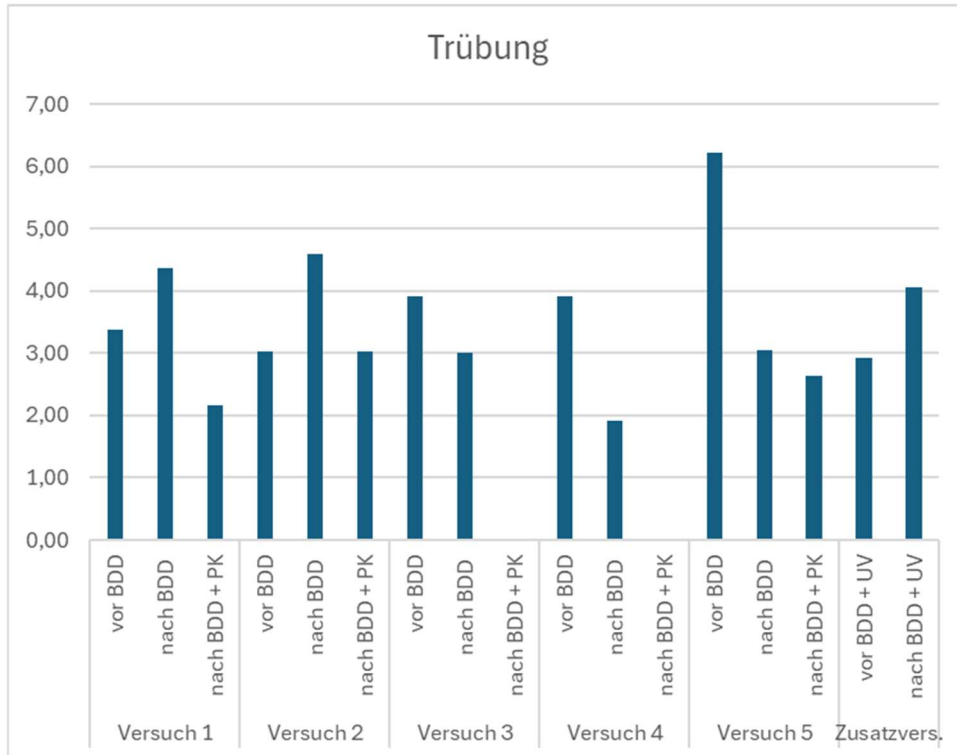


Abb. 19: Gemessene Trübung des Urindüngers vor und nach den einzelnen Behandlungsschritten.

Die deutliche Entfärbung ist positiv zu bewerten, da ein klarer Dünger bei der Anwendung im Gewächshaus ein Verkaufsvorteil ist, weil er „sauberer“ wirkt und keine Spuren in den Pflanzsystemen hinterlässt. Die erhöhten Trübungswerte nach der BDD sind möglicherweise durch die Entstehung von Carbonat zu erklären, das bei der Behandlung aus der Lösung ausgefallen ist. Darauf weisen der leicht gesunkene pH-Wert und eine leichte Flockenbildung, die während der Versuche beobachtet wurde, hin.

### TOC-Gehalt

Der TOC-Gehalt verhält sich weitgehend wie die Trübung. In den Versuchen, in denen die BDD länger als eine Stunde angewendet wurde, ist der TOC-Gehalt danach höher und sinkt erst nach der PK. Wird die BDD nur eine Stunde verwendet sind Trübung und TOC danach reduziert (Abb. 20).

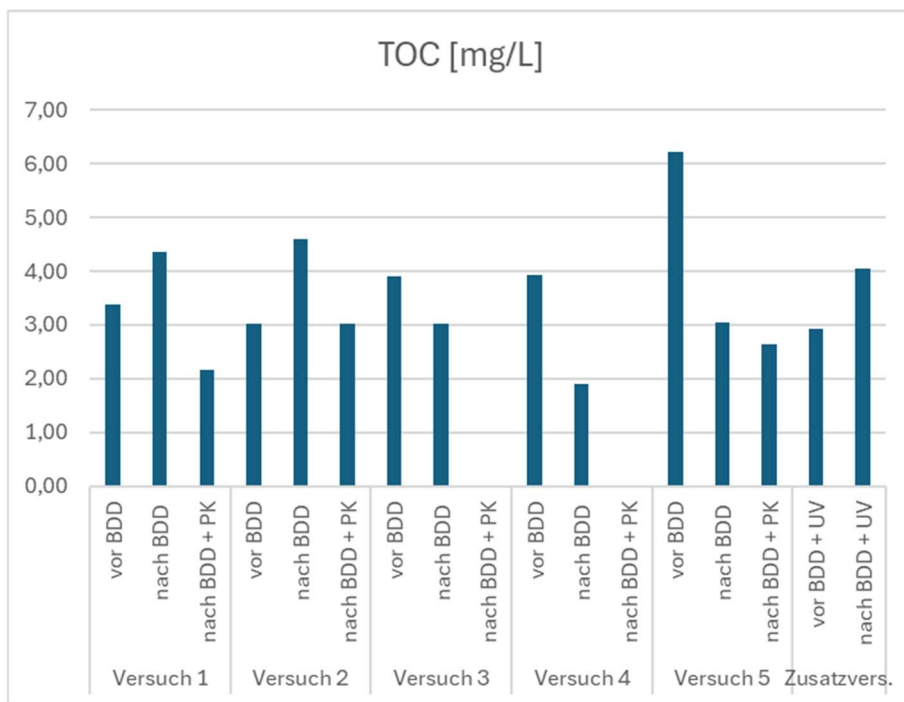


Abb. 20: TOC-Gehalt des Urindüngers vor und nach den einzelnen Behandlungsschritten.

### Mikrobiologie

Die Desinfektionsleistung der einzelnen Behandlungsschritte ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: KBE der ausgewählten Pathogene bzw. Indikatororganismen. Rot markiert sind die Werte von Proben, die vom erwartbaren Muster abweichen.

		E. coli	Coliforme Keime	Salmonellen	Enterococcus sp.	C. perfringens	Somatische Coliphagen	Koloniezahl 22°C	Koloniezahl 36°C
Versuch 1	vor BDD 3 h	0	0	0	0	0	positiv	>300	>300
	nach BDD 3 h	0	0	0	0	0	negativ	3	6
	nach BDD 3 h + PK 1 h	0	0	0	0	0	negativ	2	2
Versuch 2	vor BDD 2 h	0	0	0	0	0	negativ	79	158
	nach BDD 2 h	0	0	0	0	0	negativ	1	5
	nach BDD 2 h + PK 1 h	0	0	0	0	0	negativ	0	7
Versuch 3	vor BDD 1 h	0	0	0	0	0	negativ	3	6
	nach BDD 1 h	0	0	0	0	0	negativ	132	192
	nach BDD 1 h + PK 1 h	0	0	0	0	0	negativ	1	2
Versuch 4	vor BDD	0	0	0	0	0	negativ	>300	>300
	nach BDD 1 h	0	0	0	0	0	negativ	1	2
	nach BDD 1 h + PK 2 h	0	0	0	0	0	negativ	6	1
Versuch 5	vor BDD	0	0	0	0	0	negativ	2	10
	nach BDD 1 h	0	0	0	0	0	negativ	>300	243
	nach BDD 1 h + PK 3 h	0	0	0	0	0	negativ	1	2
Zusatzversuch	vor BDD 3 h + UV	0	0	0	0	0	negativ	6	8
	nach BDD 3 h + UV	0	0	0	0	0	negativ	9	16

Die Proben der Versuche 1, 2 und 4 zeigen eine deutliche Reduktion der Keimzahlen und damit die Wirksamkeit der Desinfektion schon nach der BDD, was die PK für die Desinfektion möglicherweise überflüssig macht. Die abweichenden Werte in den Versuchen 3 und 5 sind nicht erklärbar und möglicherweise durch eine Verwechslung der Proben vor und nach der BDD entstanden. Die Keime, die in Anlehnung an die DIN SPEC ausgewählt wurden, konnten in keiner Probe nachgewiesen werden. Nur einmal fanden sich somatische Coliphagen. Hier sollte die DIN SPEC bei der Überführung in die europäische Norm nachgebessert werden. In zukünftigen Versuchen sollten die Proben vor dem Test außerdem mit Indikatorkeimen beimpft werden, um die Wirksamkeit der Methode eindeutiger nachzuweisen.

### Medikamentenreste

Ciprofloxacin, Clarithromycin, Estradiol und Ethinylestradiol konnten in keiner Probe nachgewiesen werden. Carbamazepin und Diclofenac konnten gefunden werden. Allerdings gab es bei fast allen Proben nach der Behandlung mit der BDD Probleme mit dem Nachweis. Die Ergebnisse sind in Abb. 21 und 22 dargestellt.

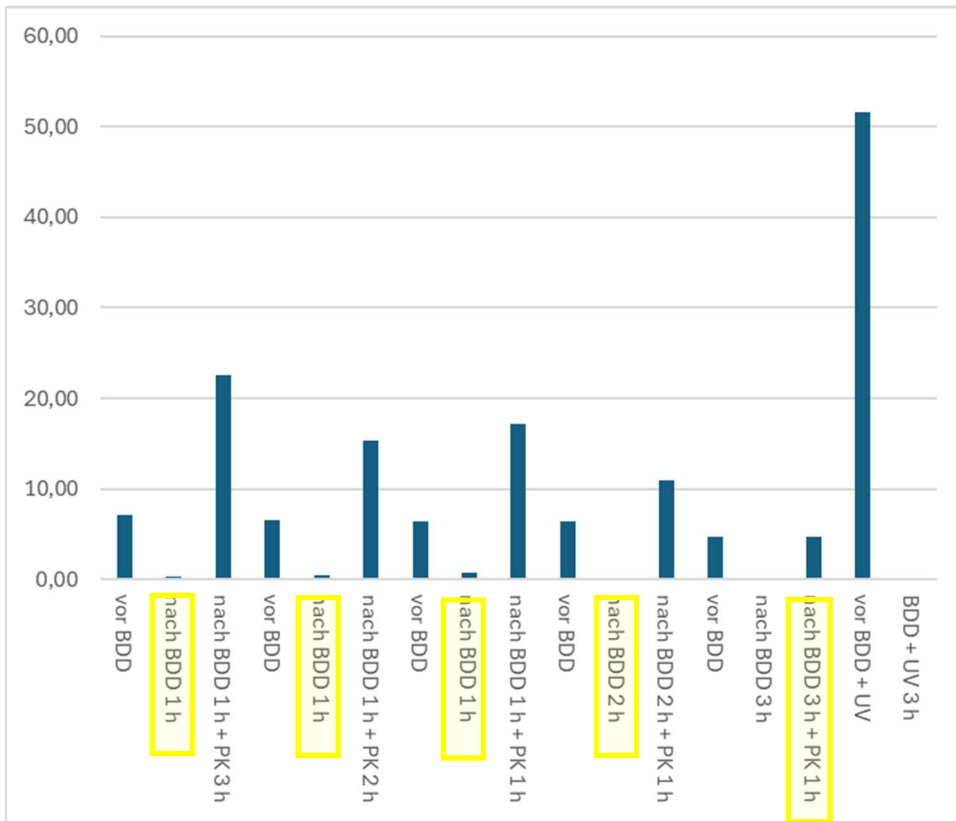


Abb. 21: Carbamazepinkonzentration [ng/L] in den Proben. Problematische Proben sind gelb markiert.

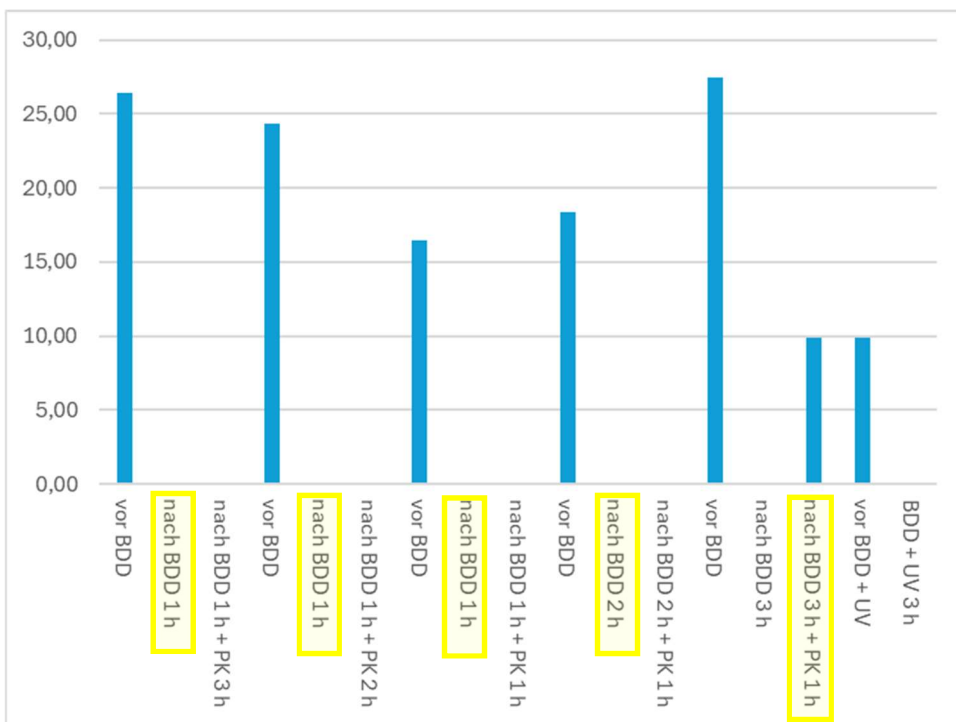


Abb. 22: Diclofenackonzentration [ng/L] in den Proben. Problematische Proben sind gelb markiert.

## 4 Fazit

Das im Projekt untersuchte Verfahren zur elektrochemischen und photokatalytischen Nachbehandlung von biologisch nitrifizierten C.R.O.P.-Lösungen zeigt im Labormaßstab insgesamt vielversprechende Ergebnisse. Insbesondere die Diamantelektrolyse konnte sowohl eine zuverlässige Oxidation organischer Inhaltsstoffe als auch eine vollständige Desinfektion erreichen und stellt damit die zentrale Verfahrensstufe dar. Zusätzlich konnte eine Umwandlung der Stickstoffspezies in Richtung Nitrat beobachtet werden, was im Hinblick auf die Stabilität der erzeugten Düngertlösung positiv zu bewerten ist.

Die Bildung von chlorhaltigen Spezies trägt zwar zur Reinigungsleistung bei, stellt jedoch gleichzeitig eine verfahrenstechnische Herausforderung dar, insbesondere im Hinblick auf Arbeitssicherheit und Emissionen. Ebenso ist der deutliche pH-Abfall im System als kritisch zu bewerten und muss bei einer weiteren technischen Umsetzung berücksichtigt werden. Die photokatalytische Behandlung konnte den Abbau einzelner Arzneimittel weiter unterstützen, zeigte jedoch im Labormaßstab keine ausreichende Leistungsfähigkeit, um als alleinige Verfahrensstufe zu dienen. Ihre Stärke liegt vielmehr in der ergänzenden Behandlung bereits voroxidierteter Matrices, sodass eine Kombination beider Verfahren grundsätzlich sinnvoll erscheint.

Für die Auslegung und Skalierung des Gesamtsystems konnten auf Basis der Laboruntersuchungen erste Zielparameter definiert werden, insbesondere für die elektrochemische Behandlung. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass für die photokatalytische Stufe noch weiterer Optimierungsbedarf besteht und derzeit keine belastbaren Auslegungsparameter abgeleitet werden können.

Die Ergebnisse der halbtechnischen Versuche zeigen, dass die im Labormaßstab identifizierten Wirkmechanismen und Verfahrenspotenziale grundsätzlich auch unter praxisnäheren Bedingungen bestätigt werden können. Besonders hervorzuheben ist die stabile und weitgehend energieunabhängige Desinfektionsleistung der Diamantelektrolyse, wodurch diese als zentrale Verfahrensstufe für die Hygienisierung des Düngers angesehen werden kann.

Gleichzeitig wird deutlich, dass die für den Abbau organischer Spurenstoffe erforderliche Oxidationsleistung stark vom spezifischen Energieeintrag abhängt und im halbtechnischen Maßstab bislang nicht ausreichend erreicht wurde. Für eine technische Umsetzung ist daher eine deutliche Leistungssteigerung der elektrochemischen Stufe oder eine Anpassung der hydraulischen Verweilzeiten erforderlich.

Die photokatalytische Behandlung bestätigt ihre Rolle als ergänzende Verfahrensstufe, zeigt jedoch weiterhin Optimierungsbedarf hinsichtlich Reaktorhydraulik, Strahlungsfeld und Katalysatoreffizienz. Zudem verdeutlichen die Ergebnisse, dass matrixbedingte Effekte im technischen Maßstab eine größere Rolle spielen und in zukünftigen Systemauslegungen stärker berücksichtigt werden müssen.

Besondere Aufmerksamkeit erfordert weiterhin die Bildung chlorhaltiger Spezies, die sowohl prozesstechnisch vorteilhaft als auch sicherheitstechnisch kritisch sind. Für eine praktische Anwendung ist daher die Integration geeigneter Abluft- und Sicherheitskonzepte zwingend erforderlich.

Insgesamt bestätigen die halbtechnischen Untersuchungen die grundsätzliche Eignung des kombinierten Verfahrens, zeigen jedoch gleichzeitig klaren Entwicklungsbedarf hinsichtlich Skalierung, Energieeffizienz und Prozessstabilität. Eine Weiterentwicklung des Systems in Richtung eines kontinuierlichen Betriebs sowie die gezielte Optimierung der elektrochemischen und photokatalytischen Stufen stellen zentrale nächste Schritte dar.

## 5 Literaturverzeichnis