



### Online-Abschlusskonferenz von innovatION

Ort: Dresden/online

Datum: 5.9.2024; 9:00 – 14:45 Uhr

Teilnehmer von innovatION:

- TUD-VTH: Prof. Dr.-Ing. André Lerch, Hanna Rosentreter, David Schödel, Elina Hiess
- TUD-NBU: Christoph Scope
- DEUKUM: Dr.-Ing. Hans-Jürgen Rapp
- elkoplan: Axel Staiger
- FUMATECH: Dr. Michael Jeske
- IPF: Tim Oddoy, Dr. Jochen Meier-Haack
- UOL: Laura Bräunig
- OOWV: Yannick Tiemann
- KWN: (vorab aufgenommenes Video mit Joachim Oltmann)

Protokoll: TUD-VTH

Anlagen: [www.innovat-ion.de](http://www.innovat-ion.de)

---

#### **Begrüßung - Hanna Rosentreter (TUD-VTH), Dr. Schwegmann (PTKA), Frau Giebner (DECHEMA):**

- Vorstellung Inhalt und Partner vom Verbundprojekt innovatION in der BMBF Fördermaßnahme „Wassertechnologien: Wiederverwendung“ WavE II
- Vorstellung des Programms
- Kurze Zusammenfassung des Online Workshops "Anforderungen an die selektive Entsalzung in der Praxis" am 7.3.22
- Grußworte Dr. Schwegmann (PTKA): Gute Trinkwasserqualität in Deutschland enorm wichtig!
- Grußworte Frau Giebner (DECHEMA): Vorstellung des Vernetzungs- und Transvervorhaben „TransWavE“; Information zur Abschlusskonferenz der Fördermaßnahme am 8./9.10.24 in Frankfurt am Main

#### **Impulsvortrag „Nachhaltigkeit & Wasser - ein untrennbares Band“ - Prof. Dr. Daniel Karthe (UNU-FLORES):**

- Darstellung der Verfügbarkeit vs. Qualität von Wasser
  - Weltweit steigender Wasserverbrauch
  - Definition von physischer und ökonomischer Wasserknappheit

- Wasser ist in verschiedenen nachhaltigen Entwicklungszielen der WHO enthalten + wichtiges Ziel der UN
- Welchen Stellenwert hat Wasser? Weniger Wasser bedeutet nicht gleich weniger HDI (Human Development Index, ein Indikator für menschliche Entwicklung) aber trotzdem bedeutender Zusammenhang
- Unkonventionelle Wasserressourcen sind für die zukünftige globale Wassersicherheit bedeutend wie z.B. Brackwasser und die selektive Entsalzung

**Impulsvortrag „Vorstellung der Funktionsweise der Kapazitiven Deionisation“-  
Hanna Rosentreter (TUD-VTH):**

- Umkehrosmose ist gegenwärtig geeignetes Standardverfahren für Meerwasserentsalzung
- Für Teilentsalzung von Brackwasser, können elektrochemische Verfahren flexible und effizienter sein (z.B. Elektrodialyse oder kapazitive Deionisation (CDI))
- Funktionsweisen unterschiedlicher CDI Verfahren in WavE II im aktuellen Fact Sheet dargestellt : [https://bmbf-wave.de/Wasserwiederverwendung/\\_WavE%20Fact%20Sheet-Web\\_final.pdf](https://bmbf-wave.de/Wasserwiederverwendung/_WavE%20Fact%20Sheet-Web_final.pdf)
- Die in innovat|ON untersuchte monovalent selektive membrangestützte kapazitive Deionisation (mMCDI) kann mit Hilfe von selektiven Ionenaustauschermembranen (IEM) einwertige Ionen, wie z.B.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  aus Brackwasser entfernen

**Session I: Membran- und Anlagenherstellung**

**Herstellung der Elektroden, der Labor- und Versuchsanlagen - Dr.-Ing. Hans-Jürgen Rapp (DEUKUM GmbH):**

- Vorstellung der Versuchs- und Pilotanlage
  - o Für Elektroden wurde Aktivkohle-Slurry verwendet („Ionenspeicher“ aus wasserlöslichem Polymer und AK)
  - o Grafitfolie wurde als Stromkollektor genutzt, Dichtrahmen aus Silikon
  - o Teilweise wurde Ionenaustauschermaterial bei der Herstellung der Elektrode verwendet
- Verschiedene Dicken und Materialien für Spacer genutzt
- Aufskalierung für Pilotanlage mit Faktor 5
- Aufbau in Zusammenarbeit mit elkoplan staiger GmbH

**Herstellung der selektiven Ionenaustauschermembranen**

**- Dr. Michael Jeske (FUMATECH BWT GmbH):**

- Polymerlösungen für Elektroden und IEM hergestellt, unterschiedliche Ansätze mit unterschiedlichen Lösungsmitteln/Volumen/Konzentrationen
- Entwicklung von neuen Anionen- und Kationenaustauschermembranen

- Beschichtung mit einer Neutralschicht, entgegengesetzten Schichten, Zeolithmaterial
- Casting Prozess in kleiner Produktionslinie verwendet
- IEM, die sich in Laborversuchen an der TUD-VTH erfolgreich gezeigt haben, wurden aufskaliert und in Pilotanlage verbaut
- IEM wurden analytisch bewertet, funktionellen Gruppen waren detektierbar
- Reziproke Ansätze zeigen Tendenz zur Monoselektivität
- Neutralschichtansätze: Hier zum Teil sehr gute Ansätze im Sprühverfahren. Casting-Verfahren bisher nicht so gute Ergebnisse. Sprühverfahren müsste auf die Produktionslinie übertragen werden
- Zeolith Membranen zeigen gute Ergebnisse in Analytik
- Polyamidbeschichtung durch das IPF zeigen bisher beste Ergebnisse bezüglich der Monoselektivität
- Weitere Untersuchungen notwendig

**Tim Oddoy (Institut für Polymerforschung Dresden e. V.):**

- Monoselektivität bei NF Membranen gegeben
- Verschiedene Ansätze getestet, um IEM mit hoher Monoselektivität herzustellen
  - Applikation einer NF-Membran auf neu zu entwickelnden porengefüllten IEM (a) oder bestehenden IEM oder Ionenaustauscher-Aktivkohle-Elektrodenmaterialien mittels Grenzphasenpolymerisation
  - Applikation der IEM in der Stützschiicht einer NF-Membran
  - Herstellung einer integralen NF-IEM durch Verwendung funktionalisierter Monomere und weitere Oberflächenmodifizierung mit hochgeladenen Polymeren/Polyelektrolyten
  - Beschichtung einer AEM bzw. CEM mit einer dünnen, nanoporösen und hochvernetzten Anionen- bzw. Kationenaustauscherschicht nach einem Nass- bzw. Lösungsbeschichtungsverfahren
  - Einführung einer zusätzlichen elektrostatischen Abstoßung in die selektive Schicht durch Beschichtung einer AEM bzw. CEM mit einer dünnen, nanoporösen Kationen- bzw. Anionenaustauscherschicht gegensätzlicher Ladung nach einem Nass- bzw. Lösungsbeschichtungsverfahren
- Entwicklung von Standard- und eigenen Methoden für Membranalytik
- Polyamidbeschichtung durch das IPF der Basismembranen von FUMATECH zeigen bisher beste Ergebnisse bezüglich der Monoselektivität
- Weitere Untersuchungen zur Optimierung der Membranen und Messmethoden notwendig

**Diskussion Session I:**

Welche Membranen am vielversprechendsten, was muss verbessert werden?

- Jeske / Oddoy / Meier-Haack: Neutralschichten trotz durchwachsender Ergebnisse an TUD, PA auf Basismembranen aber auch reziproke Beschichtung zeigen Erfolge → hier Verbesserungen in Herstellungsprozess und Testung notwendig
- Rapp: Es ist ein besserer Verbund zwischen Elektrode und IEM notwendig! Ggf. direktes Aufbringen der Membranen auf Elektrode

## **Session II: Digitalisierung, Entsalzung, Infiltration mit der mMCDI**

### **Digitalisierung - Axel Staiger (elkoplan staiger GmbH):**

- Erstellung der Bedieneroberfläche/Automatisierung für die Versuchs- und Pilotanlage inkl. Reinigungsprozesse
- Realisierung der Bedienbarkeit über Weboberfläche abhängig von der Netzabdeckung, dafür Bedienung an beliebigen Standort
- Verschiedene Sicherheitsebenen für Ausfall/Störung der Anlage implementiert
- Automatisierung der Ermittlung von qualitativen Betriebsparametern. Diese können für Entscheidungen im Betriebsablauf genutzt werden.
- Sehr genaue Datenaufzeichnung und grafische Oberfläche zur Beobachtung von Trends realisiert
- Neben Sollwerten, Einführung von verschiedenen Zeitfunktionen für den Durchfluss, Strom und Spannung
- Gesamtzustand der Anlage kann über „Fitnesszustand“ abgerufen werden und ggf. Anlagenteile gezielt ausgetauscht werden

### **Entsalzung mit der mMCDI- Hanna Rosentreter & David Schödel (TUD-VTH):**

- Untersuchung der Monoselektivität in Abhängigkeit verschiedener Materialien und für unterschiedlicher Prozessparameter
- Experimente mit künstlichen und realen Grundwasser aus Nienburg und von Langeoog zur Nitrat-Reduktion bzw. Natrium/Chlorid-Reduktion
- Effiziente Ergebnisse zur selektiven Nitratentfernung im Labormaßstab werden bald veröffentlicht.
  - o Energieeffizienz für IEM von FUMATECH mit Neutralschicht oder PA Schicht vom IPF am besten
    - Hier ist auf Nitratentfernung normierter Energieverbrauch bei geringen elektr. Spannung/hohem Durchfluss geringer als simulierte Werte für NF und BWRO
  - o NF Membran zeigt höhere Monoselektivität aber hoher elektrischer Widerstand und somit höheren Energieverbrauch
- Selektivität in Praxisversuchen geringer aufgrund von Materialeinschränkungen und geringeren Zulaufkonzentrationen von Nitrat in Nienburg
  - o Scaling an Membranen und Elektroden identifiziert vor allem durch Calciumcarbonat und -hydroxid
  - o Dennoch sehr stabile Entsalzungsleistung
  - o Geringes Reinigungsintervall

- Strömungsmodellierung zeigt, dass Durchströmen durch Pilotzelle optimiert werden kann
  - o Tracerversuche zeigen Fahne mit längerer Aufenthaltszeit an Rändern
- Im Prozessmodell werden User Defined Functions (UDF) in ANSYS Fluent implementiert
- Aktuell gibt es keine etablierten Modelle für Lösungen mit verschiedenen und unterschiedlich geladenen Ionen aufgrund der komplexen Interaktionen → weitere Forschung notwendig
- Zukünftig wäre ein Einsatz der IEM in der ED zum Vergleich der Energieeffizienz notwendig. Außerdem muss Verwertung der Konzentrate standortspezifisch eruiert werden

### **Infiltration mit der mMCDI – Laura Bräunig (Carl von Ossietzky Universität Oldenburg):**

- Einfluss der Infiltration von Teilentsalztem und Vollentsalztem Wasser in Säulenversuchen und Modellen untersucht
  - o Höhere Arsenmobilisierung bei Infiltration von vollentsalztem Wasser beobachtet, Eisenoxid- Carbonatauflösung und Mobilisierung von Kolloiden bei Infiltration von vollentsalztem Wasser. Einfluss der Organik im Wasser auf Transportprozesse unklar. Organik und Färbung scheinen mit Arsen Transport zusammenzuhängen
  - o  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  im monovalent teilentsalzten Wasser stabilisieren As-DOM Komplexe
  - o Kationenaustausch in allen Böden beobachtet, weitere Lösungsprozesse und Adsorptionsprozesse variieren in den Bodenarten
  - o Süßwasserlinse kann durch Infiltration stabilisiert werden
    - Infiltration durch Sickerschlitze in der Graudüne favorisiert
- Anreicherung der Süßwasserlinse auf Langeoog durch teilentsalztes Wasser wird in Modellierungen betrachtet

### **Diskussion Session II:**

Wie viel wird in den Laborversuchen entsalzt?

- Rosentreter: Nitratkonzentration wird von 80 mg/L im Zulauf auf Grenzwert in TrinkwV auf unter 50 mg/L reduziert. Um den Energieverbrauch zur NF und BWRO zu vergleichen, der gleiche Rückhalt angenommen und ggf. durch Blending angepasst. Energieverbrauch wurde zum fairen Vergleich auf Nitratreduktion normiert.

Welche Parameter haben Einfluss auf Entsalzungsperformance? Wie hoch ist die Ausbeute?

- Rosentreter: Temperatur hat theoretisch einen Einfluss, konnte aber durch Erwärmung in Ventilen nicht getestet werden. Durchfluss und Spannung hat einen Einfluss. Druck wahrscheinlich auch (Höherer Druck führte jedoch zu Leckagen). Des Weiteren spielt Zulaufkonzentration entscheidende Rolle. Zusätzlich wurde auch Pulsverfahren untersucht.

Ursache sinkender Selektivität durch Membranschädigung oder durch zu hohe Spannung?

- Rosentreter: Wir haben versucht Redoxreaktionen bei der Entsalzung zu Minimieren. Höhere Zellspannungen waren bei Einsatz von zusätzlichen Widerständen (IEM) möglich. pH-Wert wurde überprüft. Entsalzungsleistung war relativ konstant im Vergleich zum steigenden Scaling. Modellierung sollte zusätzliches Verständnis bringen. Weitere Forschung notwendig.

### **Session III: Nachhaltige Anwendung und Implementierung der mMCDI – Dr. Christoph Scope (TUD-NBU):**

- Nachhaltigkeit hat verschiedene Dimensionen: ökonomisch und ökologisch
- Verwendete Materialien haben hohen Einfluss auf Nachhaltigkeit
  - o Datenaggregation für Bewertung erforderlich
  - o Lösungsmittel für Membranherstellung, wie Isopropanol und NMP schädlichen Einfluss auf Umwelt
- Ziel ist die aggregierte Bewertung (Zusammenführung der unterschiedlichen Dimensionen)
- Leitfaden zur Implementierung von Innovationen in Arbeit
- Hinweis: Wertschöpfende Energie in Konzentratfluss (gekennzeichnet als Materialverlust → ggf. zukünftiger Nutzen?)

### **Interview mit Yannick Tiemann (Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband):**

- Welche Herausforderung gibt es beim OOWV/Langeoog bezüglich Wasserqualität und -quantität?
  - o Pirolatal ist das Wassergewinnungsgebiet für die Trinkwasserversorgung und muss vor Versalzung geschützt werden. Seeseitig steigt der Druck auf die Insel. Strandlinie im Bereich des Pirolatals wird schmaler. Natürliche Salzwasserintrusion an den Küsten. Bedarf teilweise stark schwankend durch Tourismus. Ggf. müssten Trinkwasserbrunnen in den Osten versetzt werden, wenn Versalzungsgefahr im Norden weiter zunimmt.
- Wäre eine Umkehrosmose/mMCDI eine Alternative zur TW-Produktion auf Langeoog?
  - o Ggf. zur Spurenstoffentfernung, aber für Entsalzung bisher nicht notwendig. Dagegen sprechen zudem der Konzentratanfall und somit eine höhere Belastung der Süßwasserlinse.

- Es muss getestet werden, ob PFAS auch mit mMCDI entfernt werden könnte.
- Genehmigungen müssten beachtet werden (Langeoog ist Naturschutzgebiet)
- Welche Mengen müssten mit der mMCDI aufbereitet werden?
  - Gefährdeter Bereich im Pirolatal betrifft 6 Brunnen. Entsprechend der genehmigten Grundwasserentnahme und Gesamtbrunnenanzahl würde es ca. 150.000 m<sup>3</sup>/Jahr betreffen.
  - mMCDI würde nur eingesetzt werden, wenn positive längere Pilotphase mit ausreichender Wasserqualität und -quantität+ Wirtschaftlichkeit.
- mMCDI wird im Batch betrieben. Bis zu 50% Konzentrat kann entstehen, Einleitung ins Meer möglich?
  - Bsp.: Größerer Vorfluter, der ebenfalls den Gezeiten und Salzwasser ausgesetzt ist, wird für behandeltes Abwasser als Vorfluter genutzt.
  - Konzentrate mit geringerer Salinität als Meerwasser sollten theoretisch kein Problem darstellen. Einzelfallbetrachtung mit allen relevanten Behörden erforderlich. Einleitsituation aufgrund der Gezeiten und Dünen ggf. schwierig.
- Wird mehr Hilfestellung von den Gesetzgebern/Behörden gewünscht?
  - Zumindest Mindeststandards für die Einführung einer selektiven Entsalzung wären gut

### **Interview mit Joachim Oltmann (Kreisverband für Wasserwirtschaft Nienburg (KWN)):**

- Welche Herausforderung gibt es beim KWN bezüglich Wasserqualität und -quantität? Neben hohen Nitratkonzentrationen
  - Hoher landwirtschaftlicher Einfluss, trotz Bemühungen und Kooperationen Überschreitung des Grenzwerts
  - Metabolite, PFAS, Trifluoressigsäure sind neue Parameter, die Qualität bestimmen
  - Quantität gefährdet durch Dürreperioden
- Wäre eine Umkehrosmose eine Alternative, um Wasserqualität und -quantität zu gewährleisten?
  - Durch neue Entwicklungen der Grenzwerte und der Qualität des Wassers sind Wasserversorger dazu gezwungen drüber nachzudenken. Eigentlich sollte aber immer erst die Eingabe der Stoffe in den Grundwasserleiter reduziert werden. Natürlich kommen mehr Kosten für Entsalzung und Entsorgungskosten für Konzentrate mit dazu. Notwendigkeit ist zukünftig da
- Könnte das nitratreiche Konzentrat auch als Dünger verwendet werden?
  - Vorgaben müssen beachtet werden wie WRRL, Düngeverordnung, etc. Behörden müssen mit in Überlegungen integriert werden. Bisher wurden auch nur 100 L/h behandelt. In Realität wären das ca. 100 m<sup>3</sup>/h. Gibt's Abnehmer und Genehmigungen für Konzentrat?
- Wie dringend ist der Bedarf für den Einsatz einer (selektiven) Entsalzung?

- Je eher desto besser, aber Konzentrat Verwertung muss geklärt werden, weiterer Forschungsbedarf aber notwendig.

### **Diskussion Session III:**

Die mMCDI ist flexibel im Prozess und passt sich ggf. an den Strombedarf an. Wie kann dies bei der Nachhaltigkeitsbetrachtung mit berücksichtigt werden?

- Scope: Kann über Rechnung und Parametrisierung mit berücksichtigt werden. Insgesamt kann durch „Aufladung des Kondensators und Entladung“ Strom generiert werden. Strombedarf trotzdem konstant vorhanden. Berücksichtigung in Energierkosten. Aufbereitungsziel muss hier immer klar definiert werden. Positiv ist aber, dass mMCDI Durchfluss auf Stromdargebot angepasst werden kann. Flexible Prozess und Bewertung müsste weiter betrachtet werden.

Wie einfach ist es erneuerbare Energien bei Praxispartnern umsetzen zu können?

- Tiemann: erneuerbare Energien sind langfristiges Projekt, schwierig da Naturschutzgebiet, ggf. nru PV auf Dächern direkt auf der Insel möglich.
- Jeske: Chemische Speicher als erneuerbare Energie auch möglich.

### **Auswertung- Hanna Rosentreter (TUD):**

- Durch fast 4 jährige Forschung, können wir viele der anfänglichen Fragen (aus 1. Workshop von 2022) beantworten und Pilotanlage unter realen Bedingungen testen, aber noch kein verkaufsfertiges Produkt erschaffen, weitere Forschung notwendig.
- Innovative Fortschritte in der Elektroden- und Membranherstellung, sowie in der Digitalisierung, Entsalzung, Modellierung, Infiltration und Nachhaltigkeitsbetrachtung

### **Abschlussworte Prof. Dr.-Ing. André Lerch (TUD)**

- Danksagung für positive Zusammenarbeit
- Verweis auf Abschlussveranstaltung von WavE bei der DECHEMA und Veröffentlichung des Abschlussberichts von innovat|ON