

Fakultät Umweltwissenschaften, Fachrichtung Hydrowissenschaften  
Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, Professur für Verfahrenstechnik in Hydrosystemen

# Selektive Entsalzung mit der mMCDI- Ergebnisse und Erfahrungen

## Online-Abschlusskonferenz von innovatION

Hanna Rosentreter, David Schödel und André Lerch

05.09.2024

# Begrüßung



TU Dresden – Prof. Dr. Ing. André Lerch,  
Hanna Rosentreter

# innovat|ON

Selektive Entfernung monovalenter Ionen aus salzhaltigen Wässern



... das sind 11 Partner aus Forschung und Praxis:



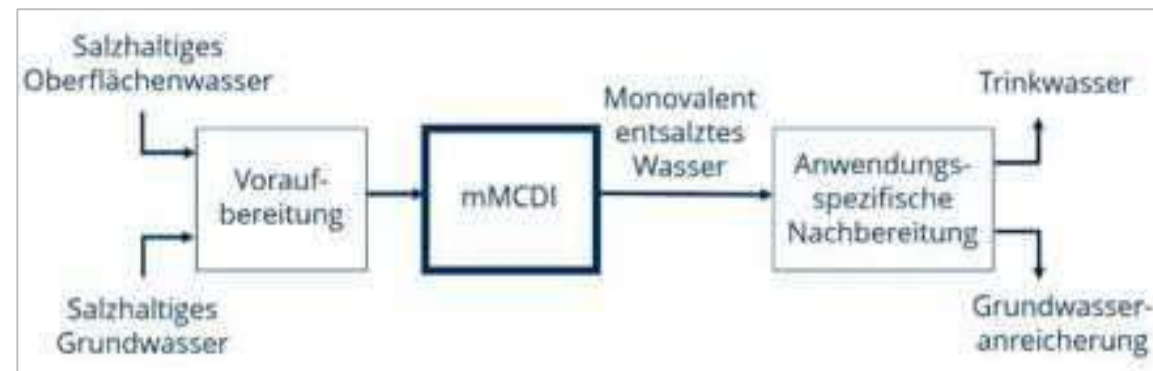
[www.innovat-ion.de](http://www.innovat-ion.de)



Präsenztreffen der innovat|ON-Partner in Nienburg an der Pilotanlage

# Ziele von innovatION

1. Entwicklung eines energieeffizienten, selektiven, **Entsalzungsverfahrens zur gezielten Entfernung monovalenter Ionen** aus salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser
2. Überprüfung **potenzieller Anwendungen und Einsatzgebiete** unter Berücksichtigung wasserchemischer, ökonomischer und ökologischer Aspekte.
3. Eruierung der **resultierenden Effekte** und Herausforderungen möglicher **Anwendungen**,
4. Entwicklung einer **ganzheitlichen** ökonomisch-ökologischen **Nachhaltigkeitsbewertung** zur Steuerung der betrieblichen **Ressourceneffizienz**.



Prinzip der Einbindung einer mMCDI zur direkten Aufbereitung salzhaltiger Wässer

# Programm für den 05.09.2024

- 9:00 Begrüßung
- 9:15 Impulsvorträge
- 9:45 Session I: Membran- und Anlagenherstellung  
Diskussion & Pause
- 11:15 Session II: Digitalisierung, Entsalzung, Infiltration mit der mMCDI  
Diskussion & Pause
- 13:30 Session III: Nachhaltige Anwendung und Implementierung der mMCDI  
Dialog mit Wasserversorgern über die Praxisphase mit der mMCDI  
Diskussion
- 14:20 Auswertung
- 14:40 Schlusswort

# Diskussionsforen am 7.3.22 beim Online Workshop "Anforderungen an die selektive Entsalzung in der Praxis"

## Praxisnahe Anwendungen für die selektive Entsalzung

- Welche Stoffe können entfernt werden?
- Welche Konzentratbehandlung?
- Scaling und Fouling auf Membranen?
- Verblockungen durch Eisen/Mangan?
- Kosten?



## Selektive Verfahrenstechnik und Werkstoffe

- Einfluss von Prozessparameter und Ioneneigenschaften auf Selektivität?
- Werkstoffe müssen für Trinkwasser zugelassen sein!



## Durch Selektivität Nachhaltigkeit fördern

- Lösungsmittel NMP ersetzen
- Wartungsanfälligkeit?
- Energieverbrauch?
- Kosten?
- Welche Methodik für Nachhaltigkeitsbewertung?





# Begrüßung



Projektträger Karlsruhe– Dr. Heiko Schwegmann

# Begrüßung



DECHEMA – Sabrina Giebner





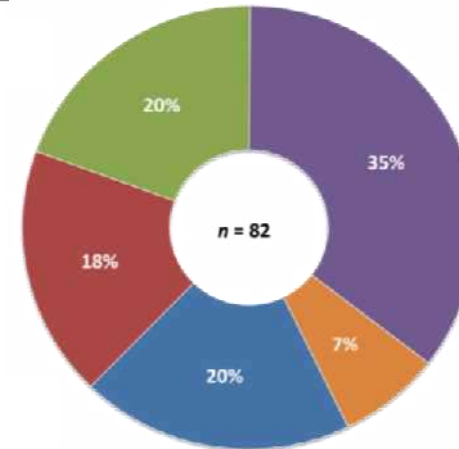
# BMBF-Fördermaßnahme „Wassertechnologien: Wiederverwendung“ (WavE II)

Sabrina Giebner & Christina Jungfer, DECHEMA e.V.  
05.09.2024, Online-Abschlusskonferenz „innovatION“

# Zukunftsfähige Technologien und Konzepte zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Wasserwiederverwendung und Entsalzung - WavE -



- Laufzeit: 2016-2021
- Fördervolumen: ~ 32 Mio. €
- 13 Verbundprojekte

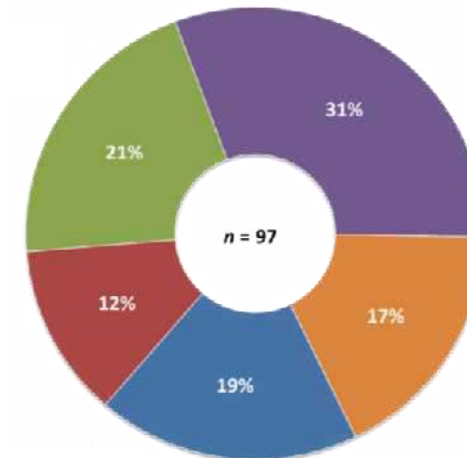


- Beteiligt:**
- Großunternehmen
  - KMU
  - Forschungseinrichtungen
  - Hochschulen und Universitäten
  - Sonstige (Verbände, Behörden und Vereine)

# Wassertechnologien: Wiederverwendung - WavE II -



- Laufzeit: 2021-2024
- Fördervolumen: ~ 28 Mio. €
- 14 Verbundprojekte



→ Vernetzungs- und Transfervorhaben (DECHEMA)

# WavE & WavE II

## Ziel

- Erhöhung der Wasserverfügbarkeit
- Reduzierung der Abhängigkeit von Frischwasser
- Verminderung von Nutzungskonflikten
- Beitrag für eine nachhaltige Entwicklung

## Strategie

- Innovative Technologien und Managementkonzepte:
  - Entwicklung und Demonstration
  - Referenzen und Vorbereitung für den Transfer in die Praxis



Untersuchungsstandorte in WavE II



# Themenfeldern in WavE & WavE II



## Themenfelder

Wasserwiederverwendung durch Nutzung von behandeltem kommunalem Abwasser



Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser



Aufbereitung von salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser



Untersuchungsstandorte in WavE II





# Abschlusskonferenz der Fördermaßnahme



## BMBF-FÖRDERMASSNAHME „Wassertechnologien: Wiederverwendung“

Eine Initiative des Bundesministeriums  
für Bildung und Forschung

**WavE**  
Wassertechnologien, Wiederverwendung

gefördert vom

 Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

WIRTSCHAFTSPARTNER

 **DECHEMA**  
Vereinigte Fachverbände für Technische Chemie  
und Verfahrenstechnik e.V.

### THEMENFELDER

- » Wasserwiederverwendung durch Nutzung von behandeltem kommunalem Abwasser
- » Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser
- » Aufbereitung von salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser

Die Teilnahme ist kostenfrei.  
Weitere Informationen  
und Anmeldung zur  
WavE-Abschlussveranstaltung unter:

[www.bmbf-wave.de](http://www.bmbf-wave.de)





# Impulsvorträge



## Nachhaltigkeit & Wasser - ein untrennbares Band

Prof. Dr. Daniel Karthe (UNU-FLORES)



## Vorstellung der Funktionsweise der Kapazitiven Deionisation

Prof. Dr.-Ing. André Lerch (TU Dresden)

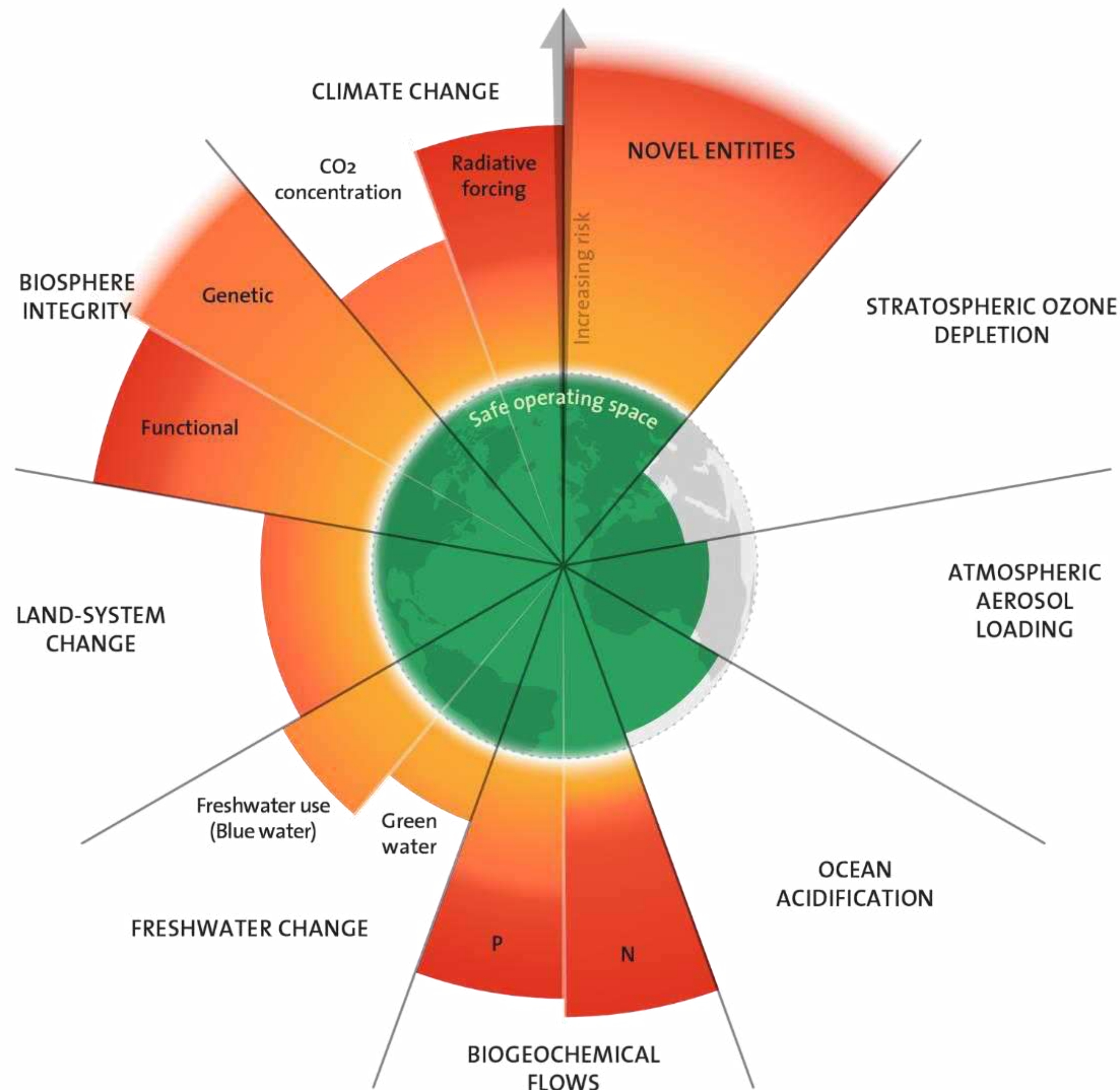




innovat|ON Workshop  
TU Dresden, 05. September 2024

# Entwicklung und Wasser - ein unzertrennbares Band

# Wasser als “planetare Grenze”?



Stockholm Resilience Center 2023



## Planetare Grenzen:

überschritten für Frischwasser?

4000 km<sup>3</sup>/Jahr Rockström et al. 2009

2800 km<sup>3</sup>/Jahr an Umweltströmen Gerten et al. 2013

4000 km<sup>3</sup>/Jahr “blaues Wasser”

(Süßwasser außer in Pflanzen, Boden, Niederschlägen) Glesson et al. 2020

Gibt es eine solche Grenze überhaupt?

Kann sie z.B. technisch erhöht werden?

Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 3455–3461, 2017  
<https://doi.org/10.5194/hess-21-3455-2017>  
 © Author(s) 2017. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 3.0 License.



## HESS Opinions: A planetary boundary on freshwater use is misleading

Maik Heistermann

Institute of Earth and Environmental Science, University of Potsdam, 14476 Potsdam, Germany

Heisterman et al. 2017



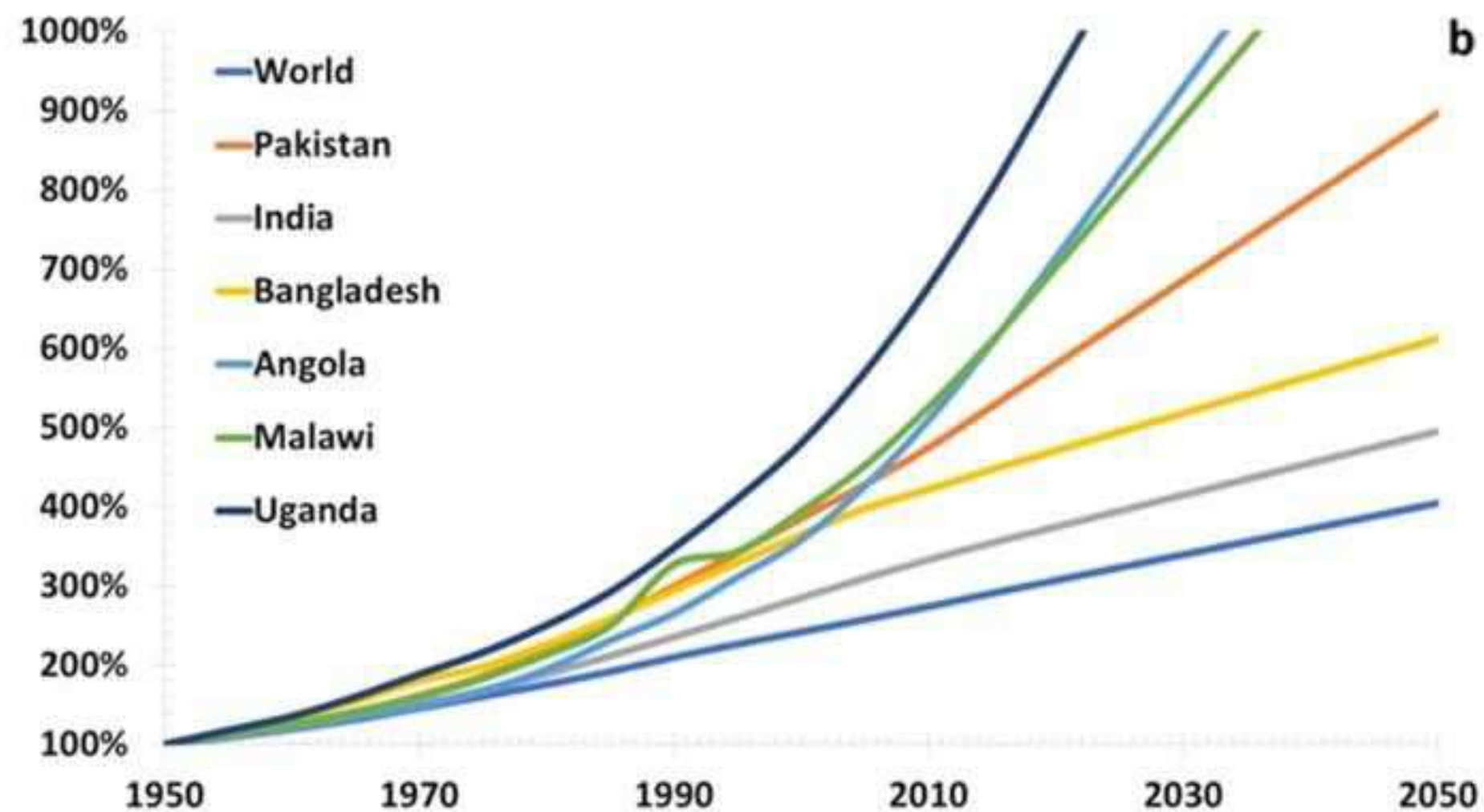
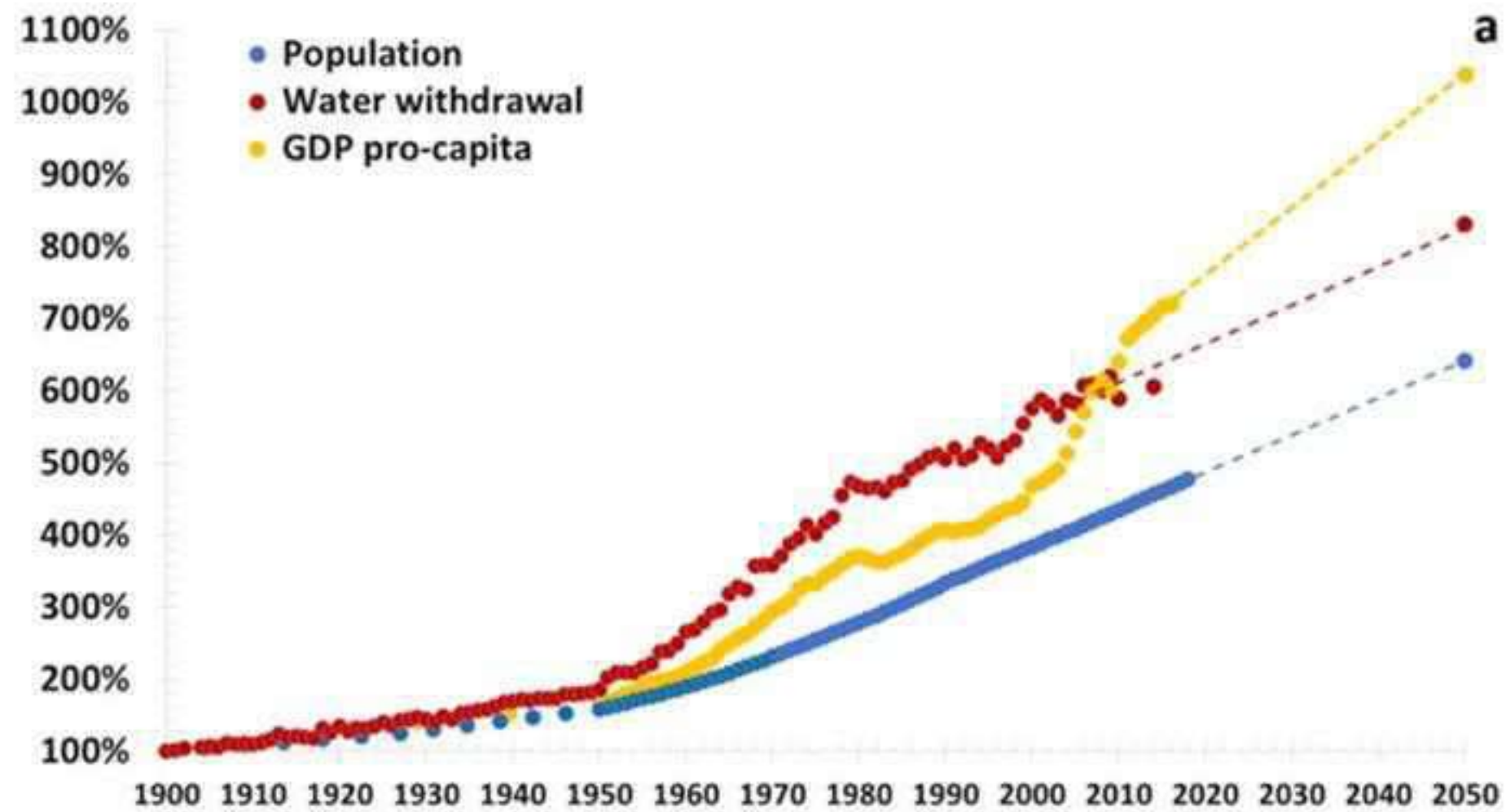
# Globaler Wasserbrauch: aktuelle Trends

Globale Frischwasserentnahme:

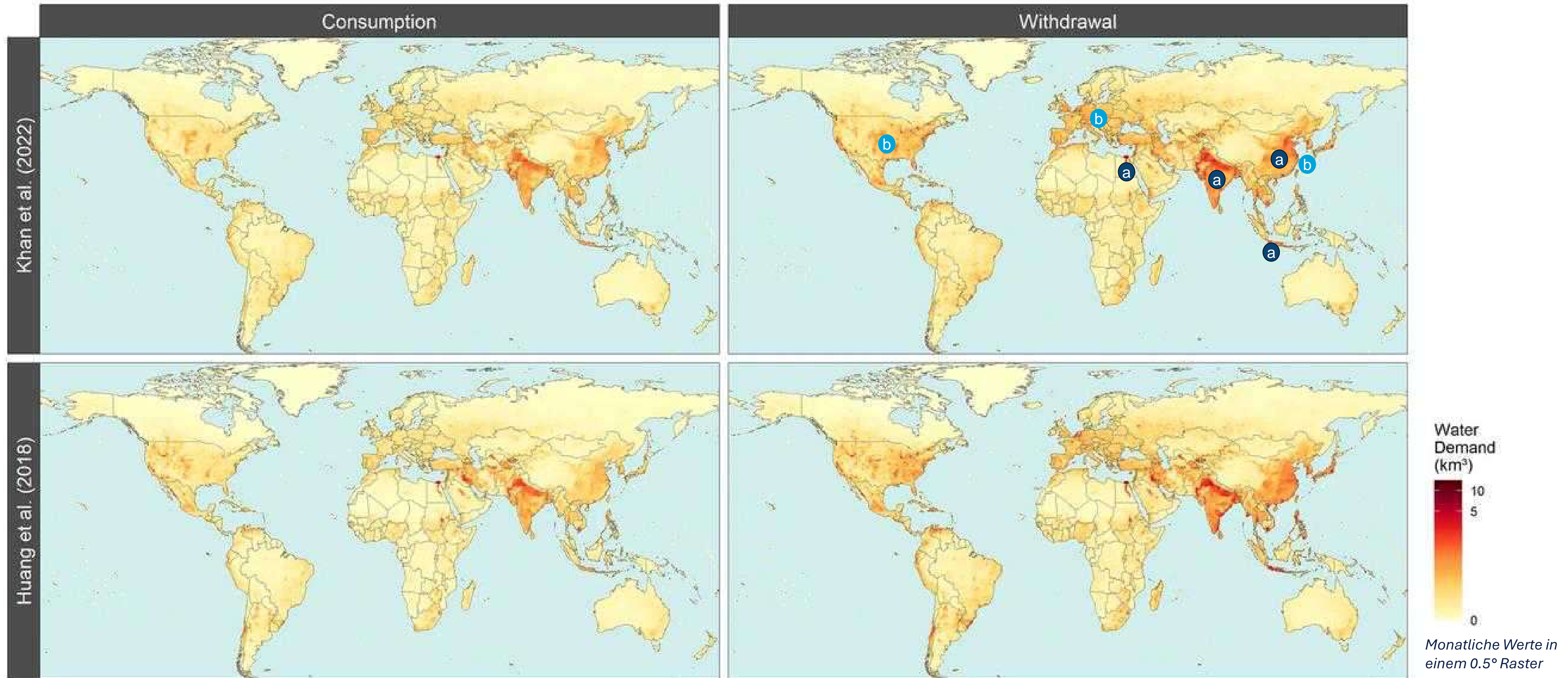
4000 km<sup>3</sup> jährlich, davon 70%  
landwirtschaftlich genutzt

Weitere Zunahme zu erwarten

... aber räumlich sehr ungleich verteilt, mit  
besonders hohen Werten in Afrika und  
Südasien



# Hotspots des Wasserverbrauchs und der Wasserentnahmen



- a** Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte
- b** Wirtschaftlich hoch entwickelte Regionen



# Wasserknappheit

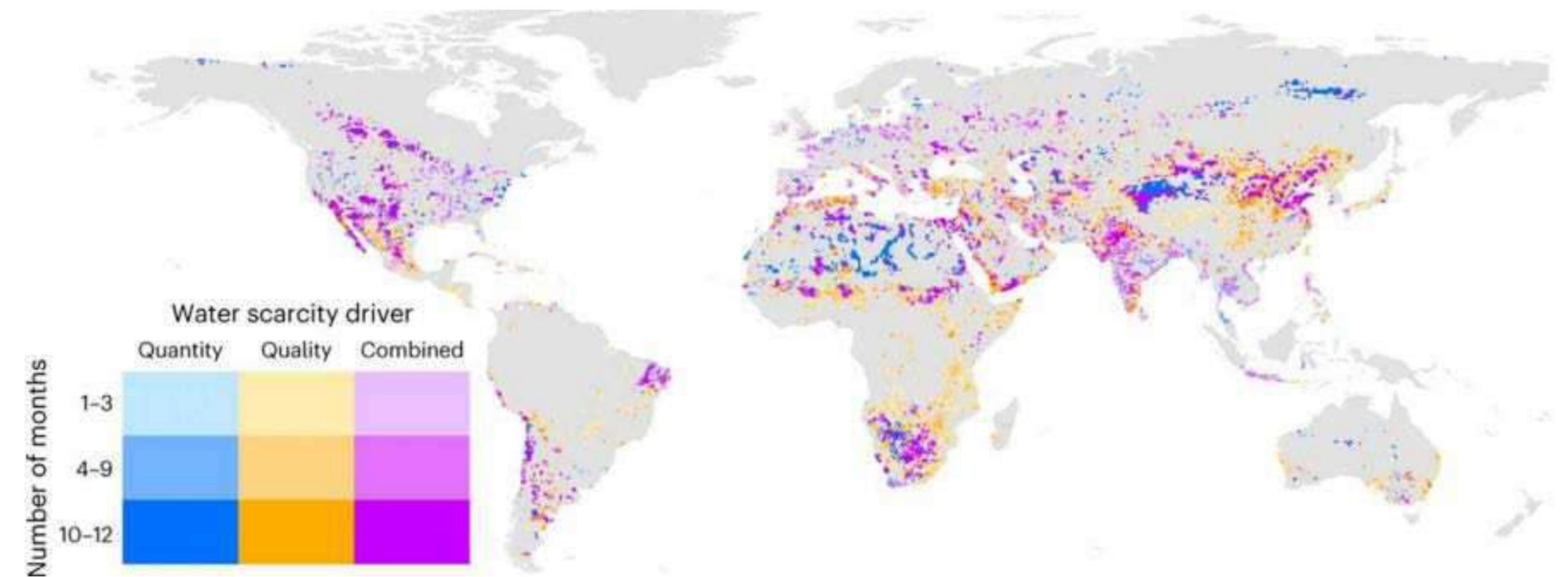
## Wasserbedarf

40 m<sup>3</sup> / Person u. Jahr im Haushalt

+ 800 m<sup>3</sup> / Person u. Jahr für  
Landwirtschaft, Industrie,  
Energieerzeugung

= 840 m<sup>3</sup> / Person u. Jahr

Verfügbarkeit	Interpretation
> 1,700 m <sup>3</sup>	Wassersuffizienz
< 1,700 m <sup>3</sup>	Wasserstress
< 1,000 m <sup>3</sup>	Wasserknappheit
< 500 m <sup>3</sup>	Absolute Wasserknappheit



Jones et al. 2024, Nature Climate Change

**Wasserknappheit** betrifft zahlreiche Regionen der Erde, bedingt durch physische Knappheit und unzureichende Wasserqualität



# Wasserknappheit

## Physische Wasserknappheit

bezieht sich auf die Menge des verfügbaren Frischwassers

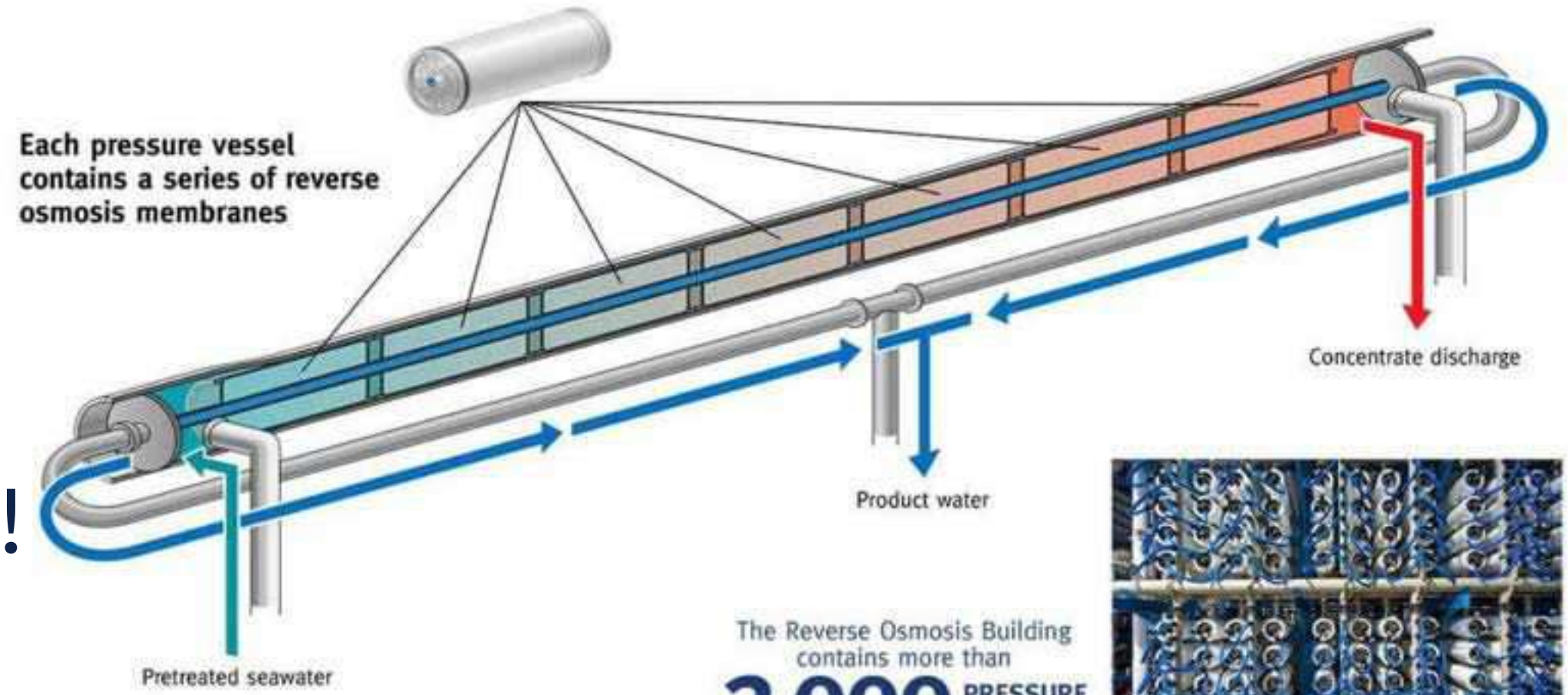
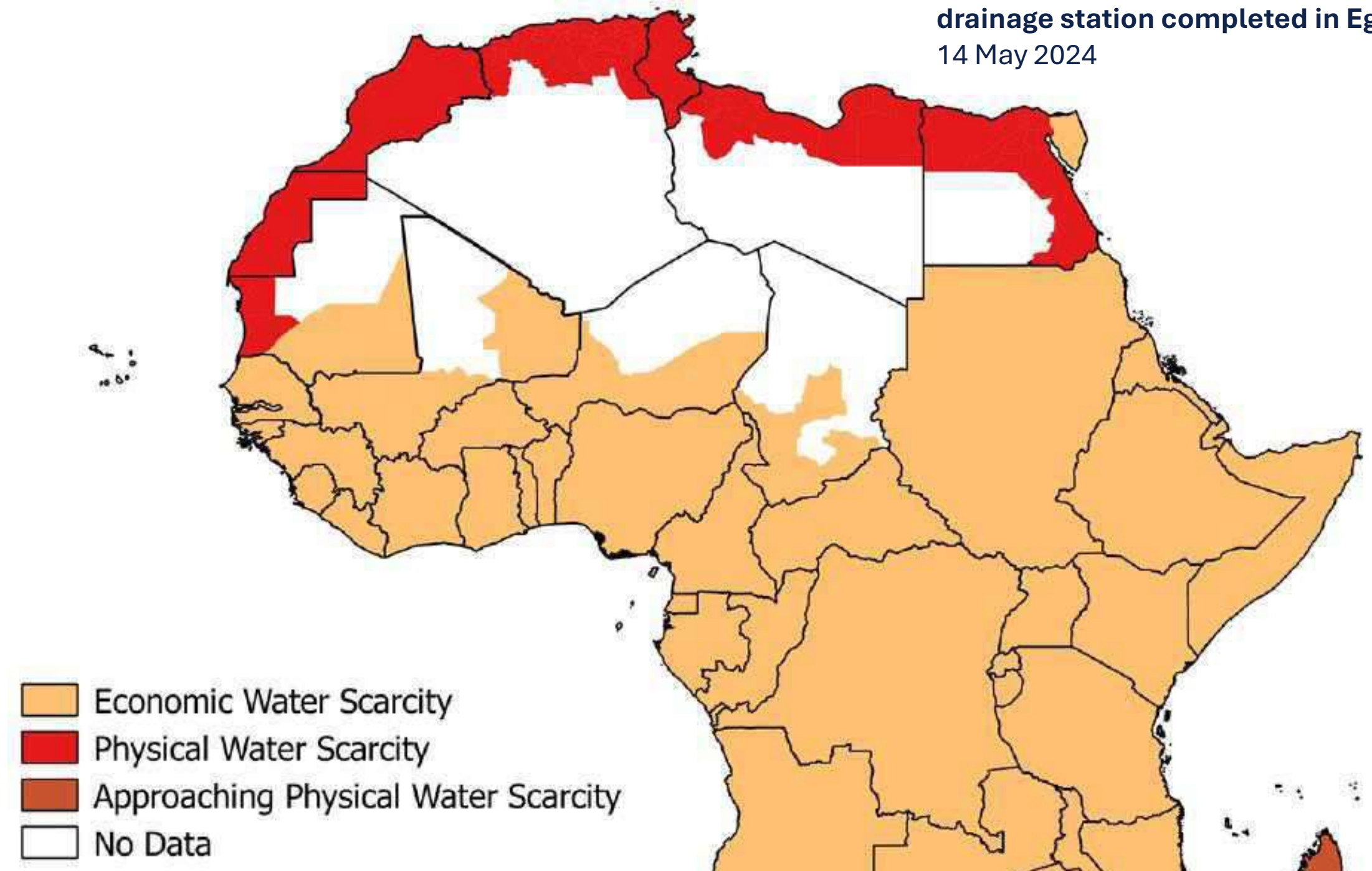
## Ökonomische Wasserknappheit

bezieht sich auf Zugänglichkeit zu Wasser  
→ limitiert z.B. durch unzureichende Versorgungssysteme

## Physische Wasserknappheit

bezieht sich nur auf Frischwasser;  
Salzwasser als Alternative!

**egypt**  
today  
World's largest water desalination,  
drainage station completed in Egypt  
14 May 2024



Damkjaer & Taylor 2017

San Diego County Water Authority 2024



# Wasser und Entwicklung

Wasser ist explizit in zwei SDGs (6, 14) enthalten, implizit auch in vielen anderen, z.B. SDGs 2, 5, 7, 9, 11, 12, 15, 16



# United Nations

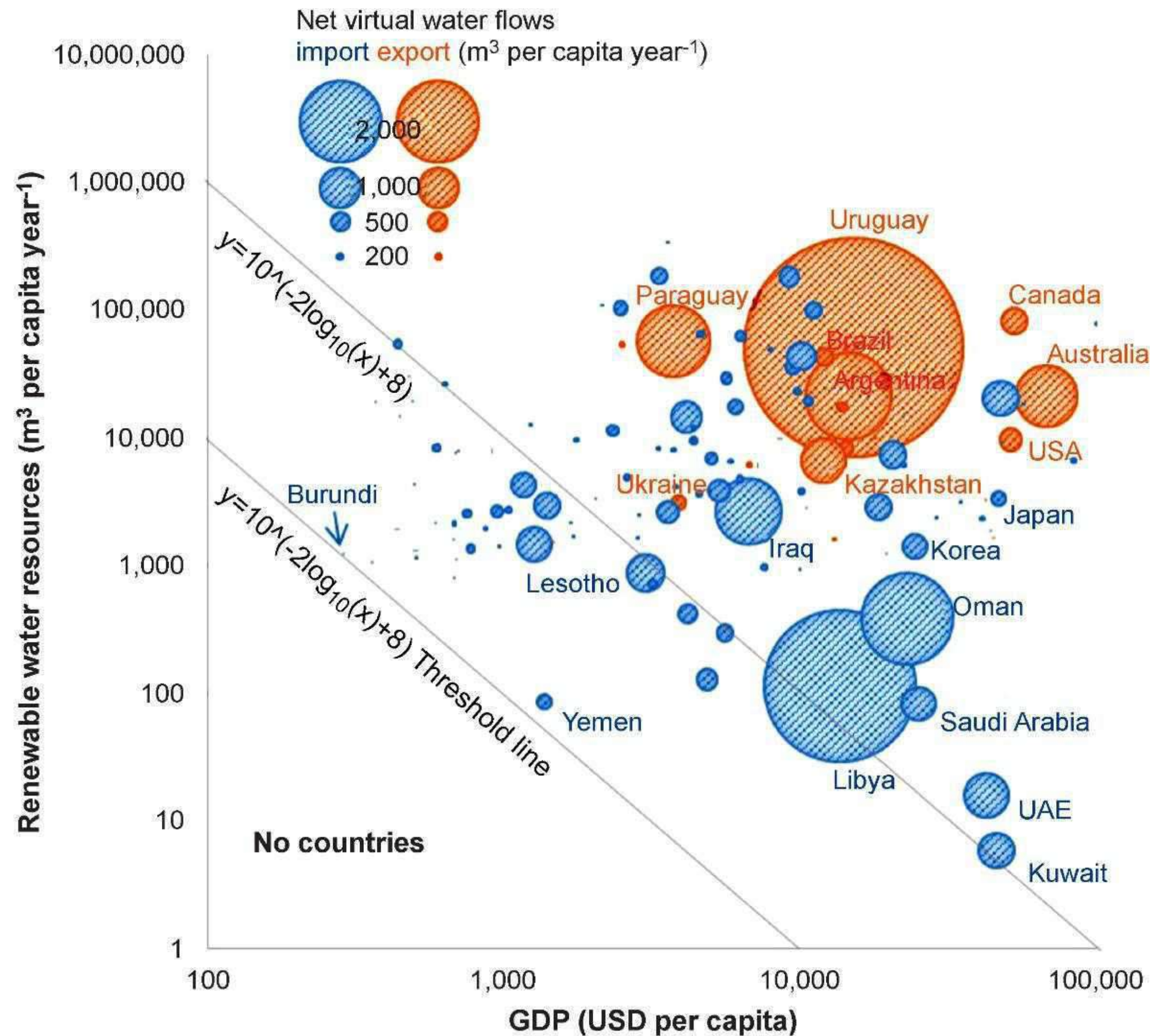
## ZIELE FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG



- 6.1 Zugang zu Trinkwasser
- 6.2 Zugang zu Sanitärversorgung
- 6.3 Reduzierung der Wasserverschmutzung
- 6.4 Effiziente Wassernutzung
- 6.5 IWRM
- 6.6 Schutz und Rehabilitation aquatischer Ökosysteme



# Wasser und Entwicklung



Oki et al. 2017

Bedeutet Wassermangel Armut und niedrige soziale Entwicklung?

- Nicht unbedingt – siehe z.B. VAE – HDI 0.937; Kuwait – HDI 0.847 bei ca. 10 m<sup>3</sup> Frischwasser/Person/Jahr
- ... aber häufig doch, siehe z.B. Yemen - HDI 0.455 bei ca. 100 m<sup>3</sup> Frischwasser/Person/Jahr
- Staaten mit niedrigem HDI bzw. BIP und begrenzten Frischwasserressourcen v.a. in Nord- und Ostafrika, Mittlerer Osten, Zentralasien



# Wasser in der Entwicklungszusammenarbeit der UN



**UN**  
**2023 WATER**  
**CONFERENCE**

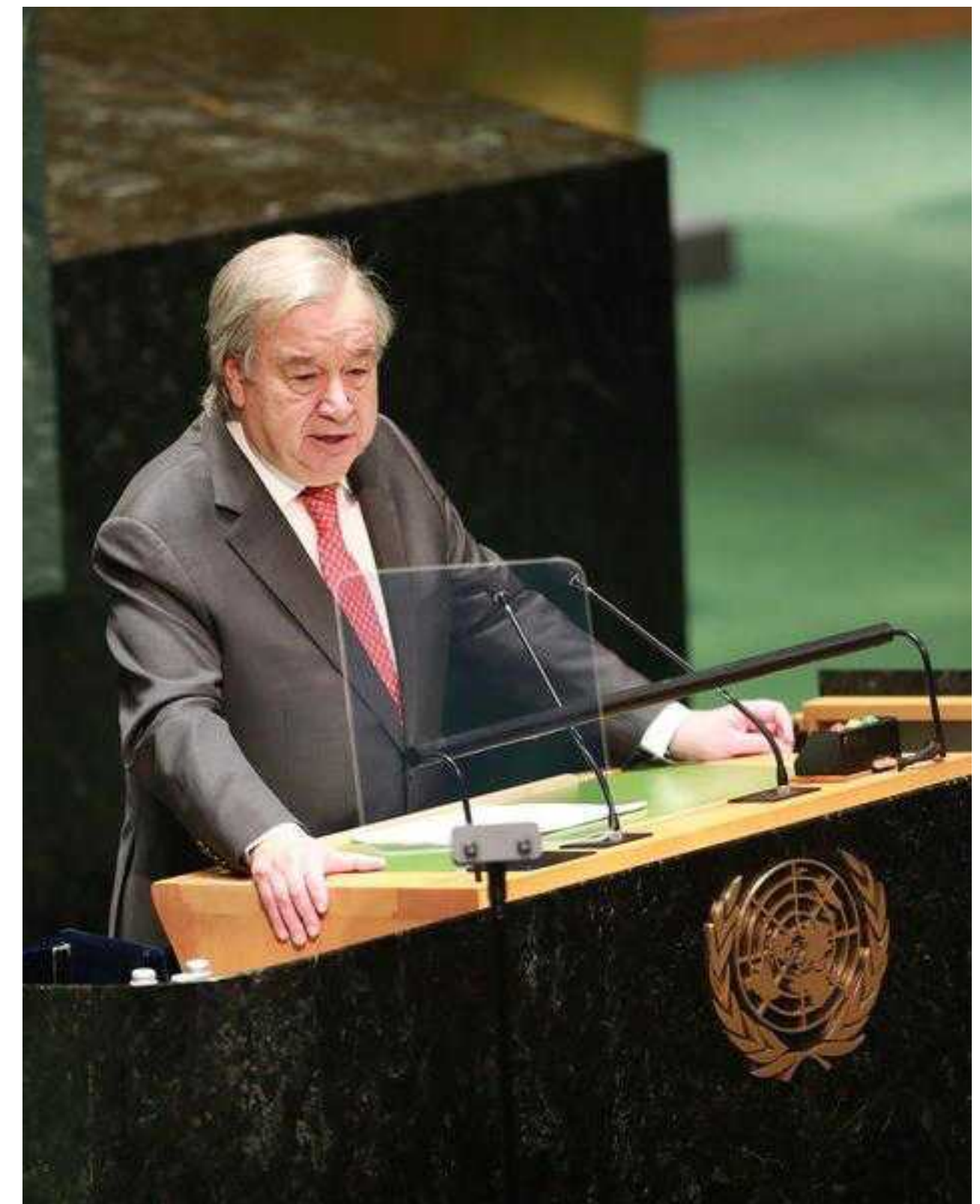
NEW YORK  
22-24  
MARCH  
2023

**UN Wasserkonferenz 2023** fokussierte erstmals wieder seit 1977 (Mar del Plata, Argentinien) alleine auf das Thema Wasser

*Water is humanity's lifeblood, from the food we eat to the ecosystems and biodiversity that enrich our world to the prosperity that sustains nations, to the economic engines of agriculture, manufacturing and energy generation to our health, hygiene and survival itself.*

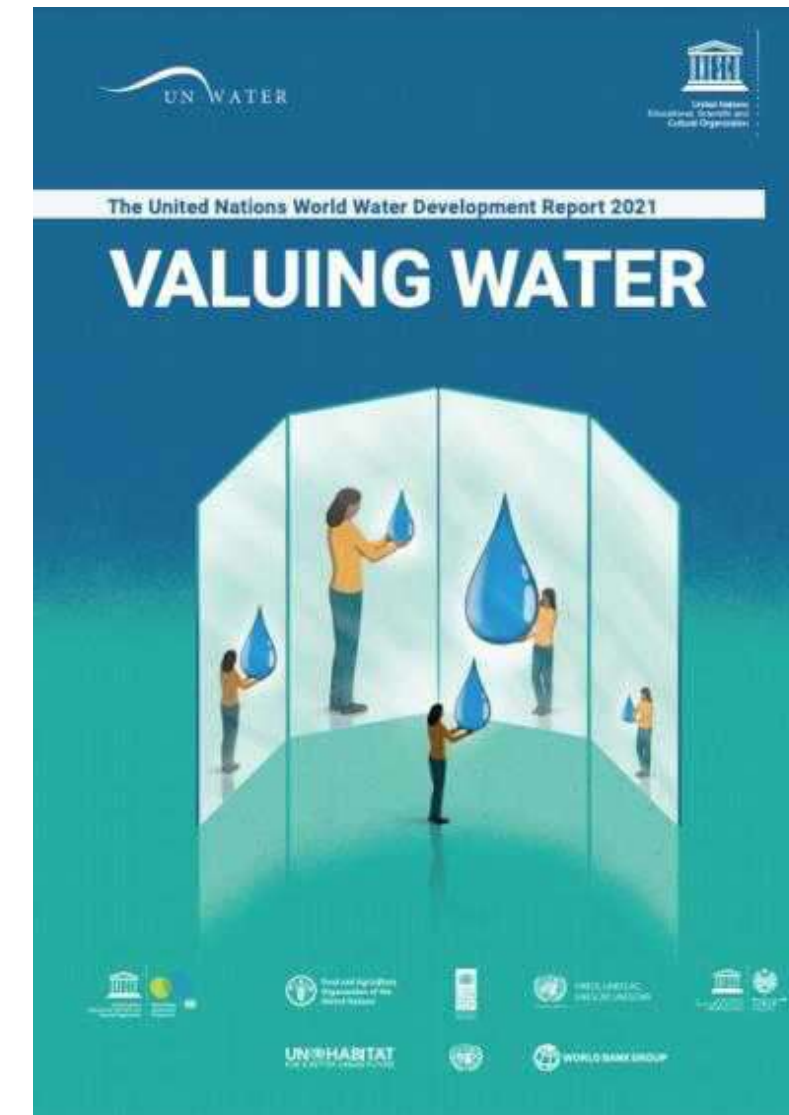
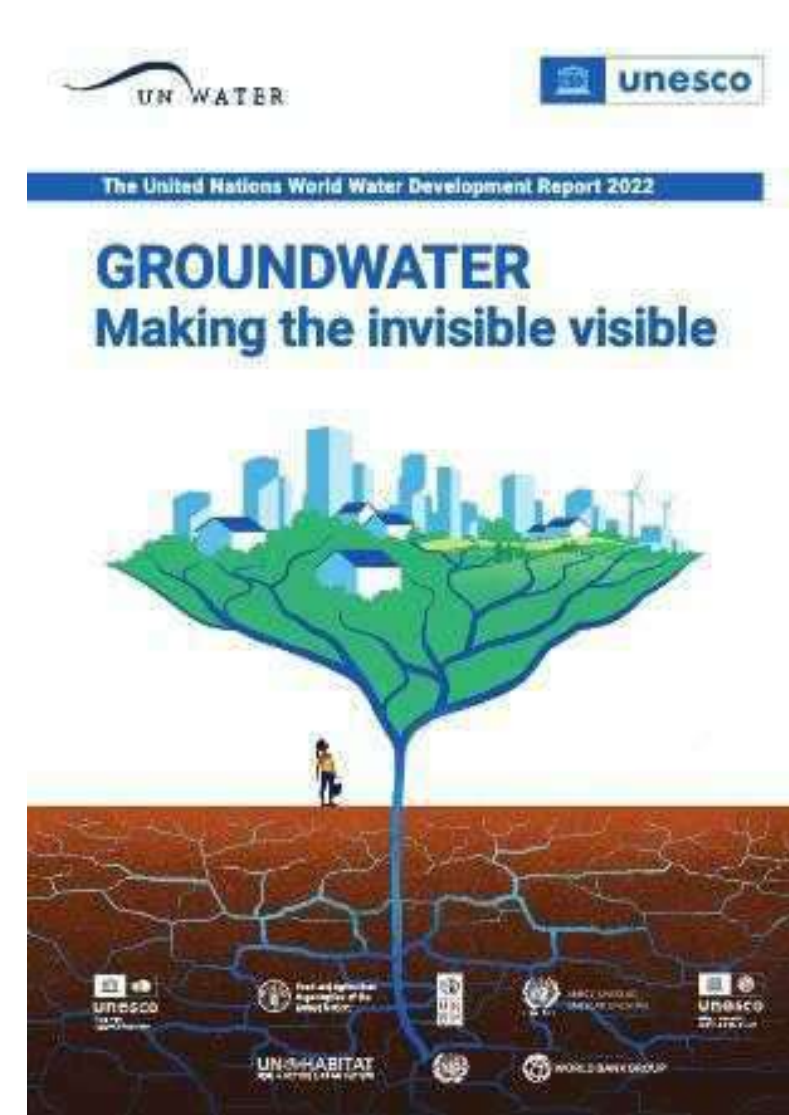
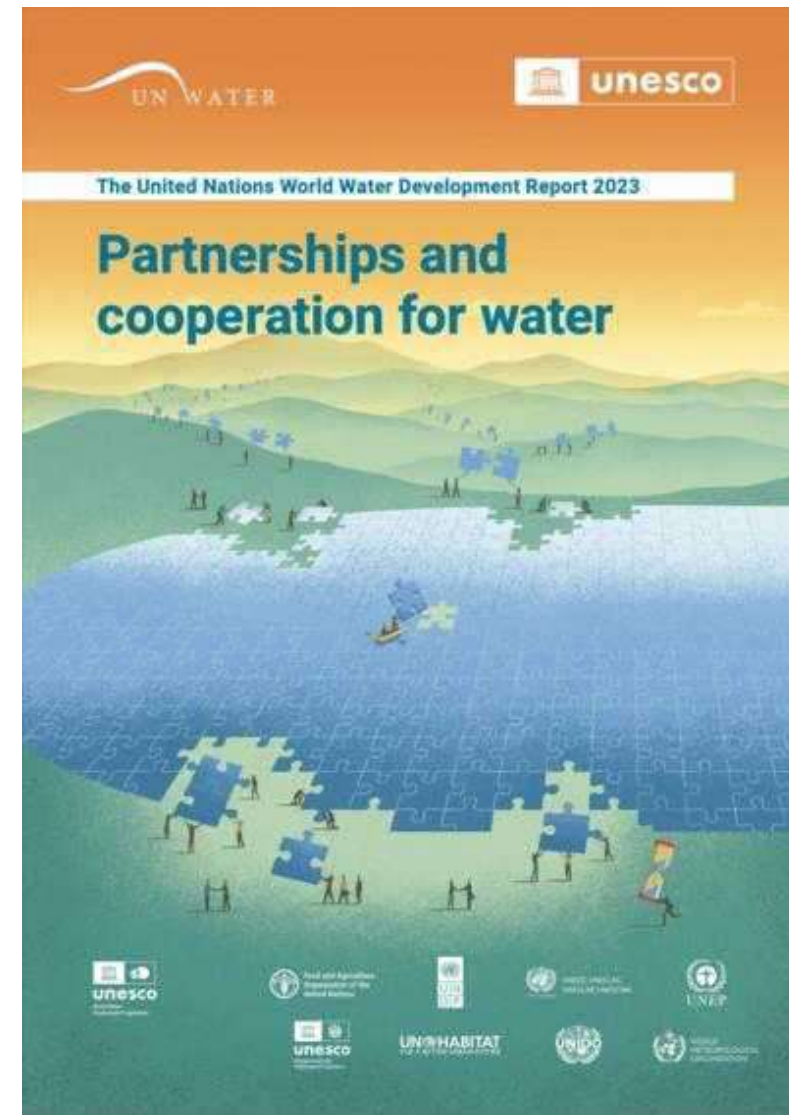
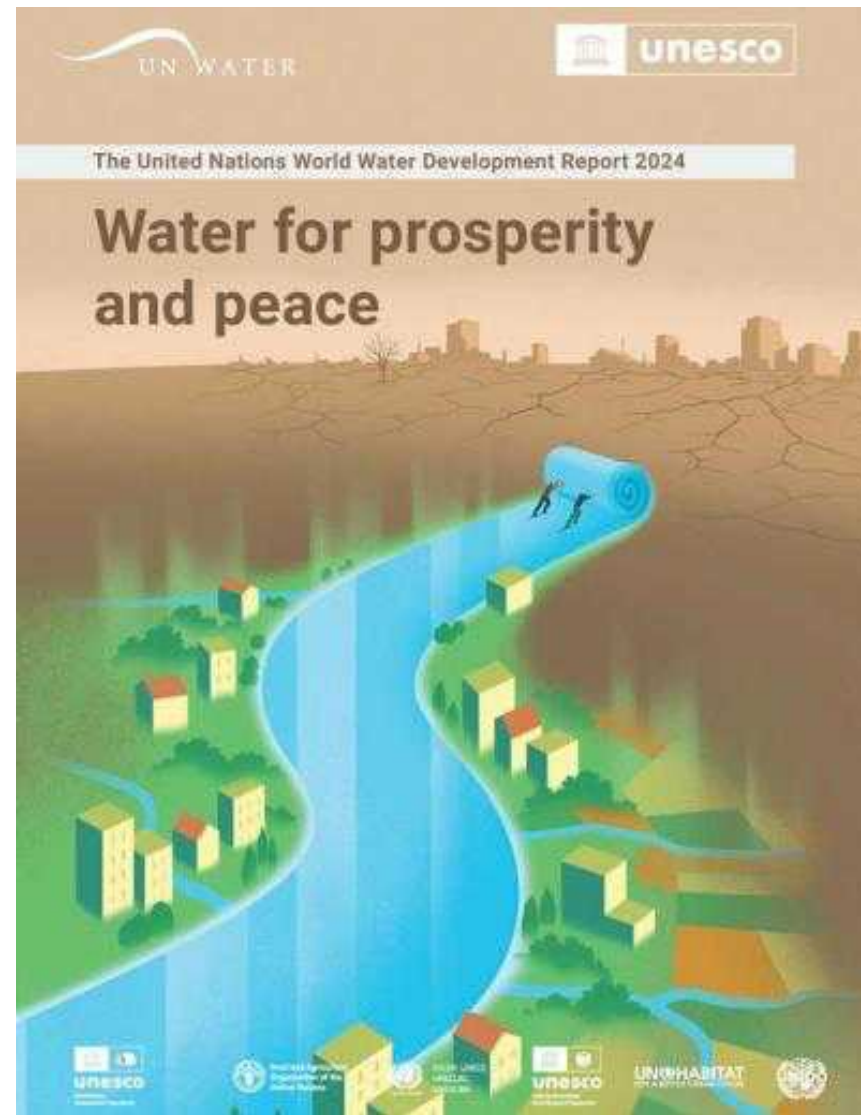
*Water is a human right — and a common development denominator to shape a better future. But water is in deep trouble. We are draining humanity's lifeblood through vampiric overconsumption and unsustainable use.*

UN Generalsekretär António Guterres, UN Wasserkonferenz 2023





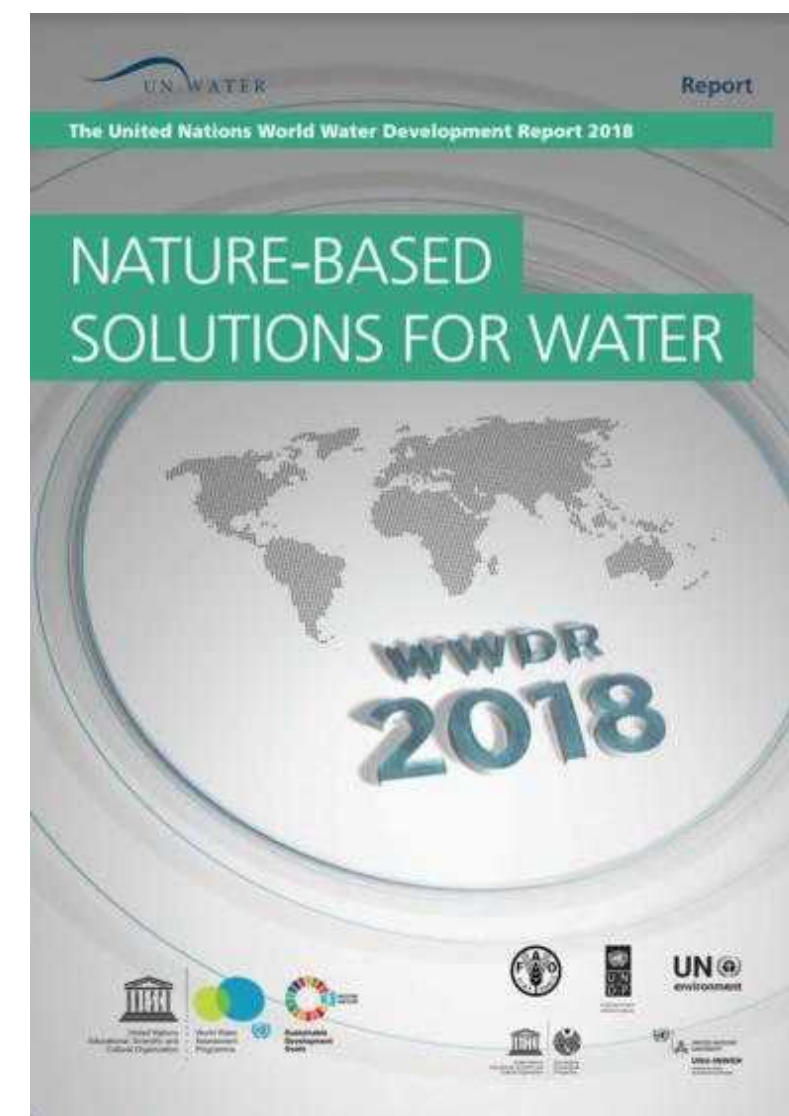
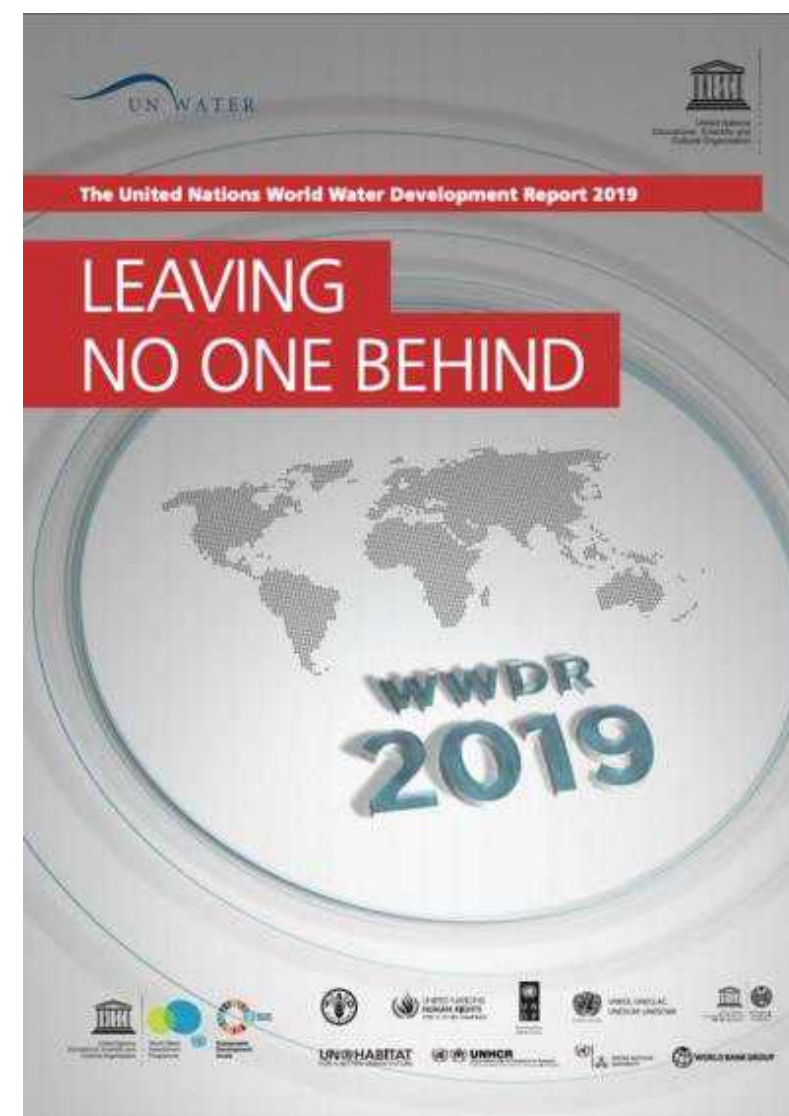
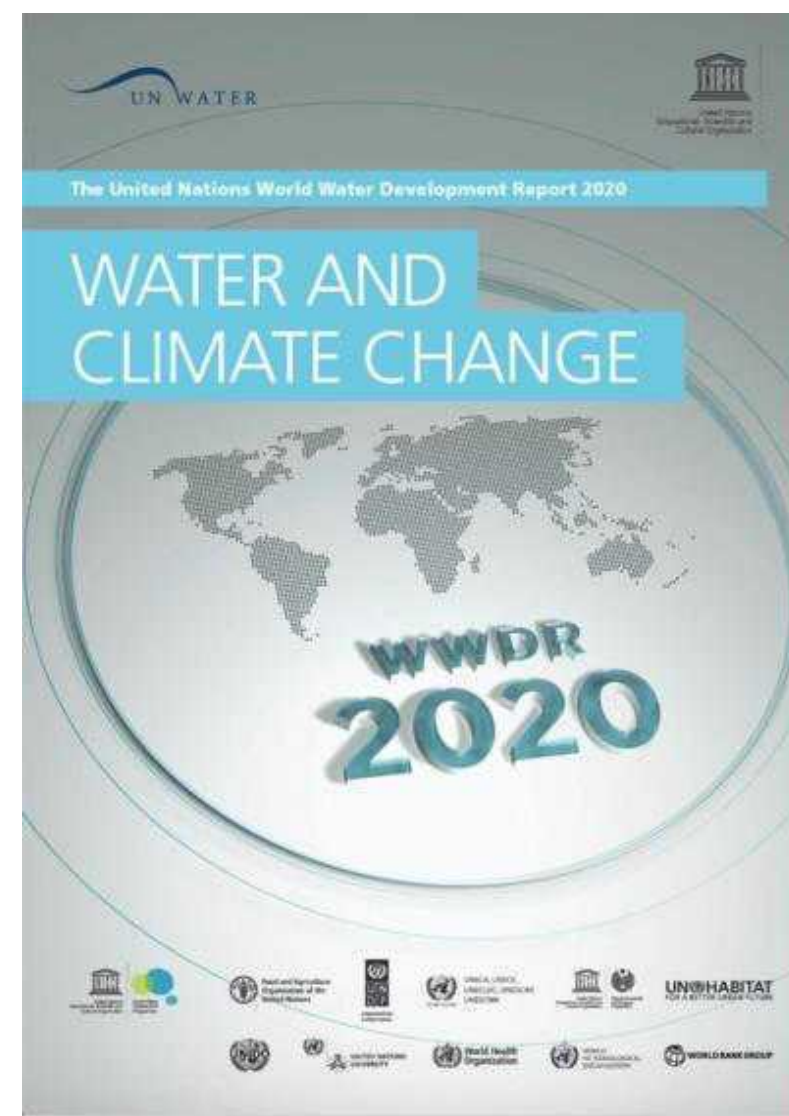
# Wasser in der Entwicklungszusammenarbeit der UN



Weltwassertag (22. März)

themengleich mit

*World Water Development Report*



zeigt die Vielseitigkeit der Betrachtungen von Wasser innerhalb der UN

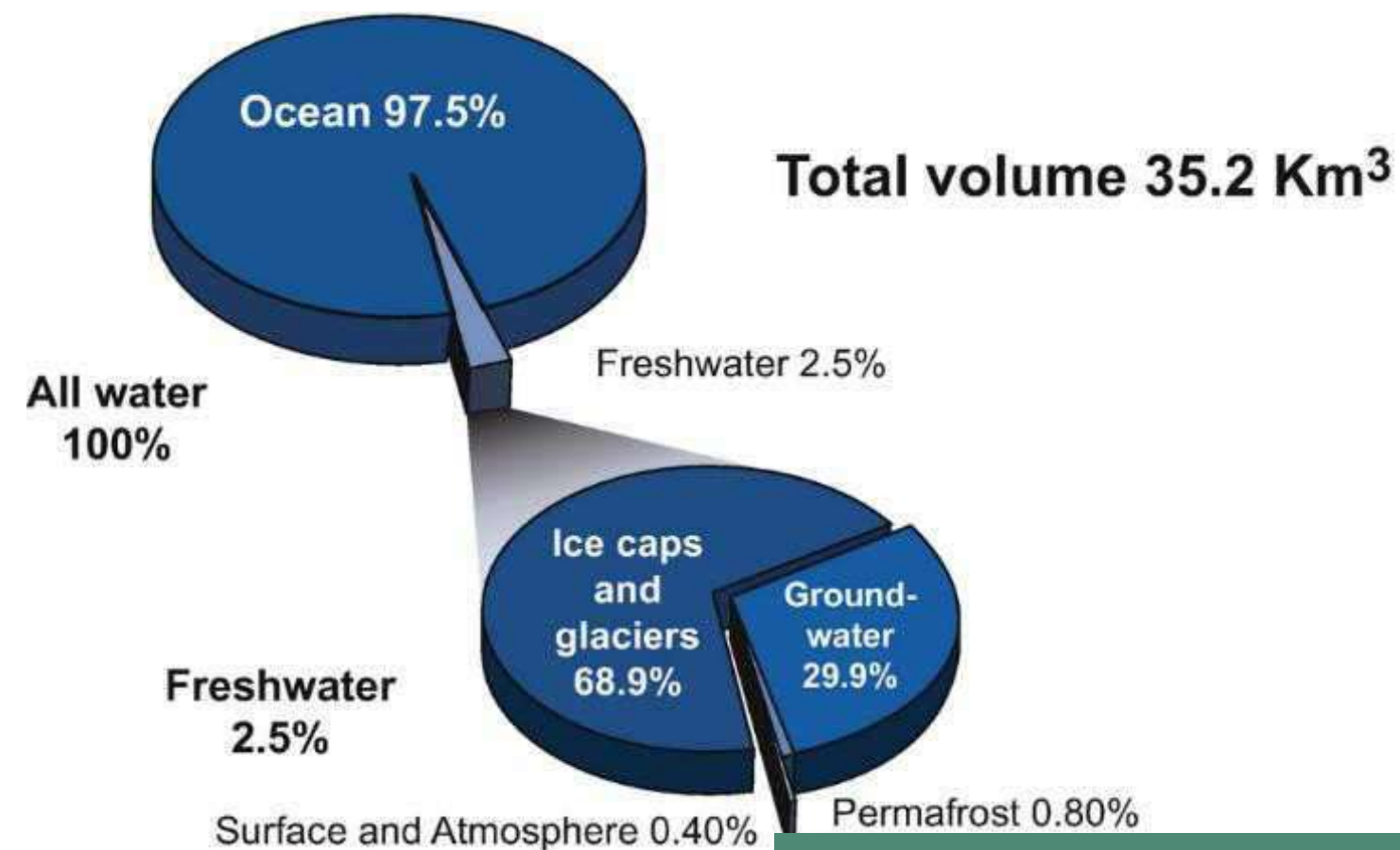


# Unkonventionelle Wasserressourcen – die Zukunft der globalen Wassersicherheit?

Aktuell

über 16,000 Entsalzungsanlagen in Betrieb,  
Kapazität > 100 Mio. m<sup>3</sup>/Tag  
7% Wachstum jährlich

- Thermische Verfahren (Distillation) seit den 1930ern, rückläufig
- Membranbasierte Verfahren, v.a. Umkehrosmose seit 1965 aktuell marktbeherrschend
- Hohe Bedeutung monovalenter Ionen, z.B. Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>



Accessible surface  
Freshwater 1%

Alsarhan & Rizk (2020)

Manzoor Qadir  
Vladimir Smakhtin  
Sasha Koo-Oshima  
Edeltraud Guenther Editors

## Unconventional Water Resources



Springer

Eke et al. 2020

innovat|ON

Eine Initiative des Bundesministeriums  
für Bildung und Forschung

WavE

Wassertechnologien: Wiederverwendung



innovat|ON Workshop  
TU Dresden, 05. September 2024

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.**

**Entwicklung und Wasser  
- ein unzertrennbares Band**

# Literatur

Alsharhan, A.S. & Rizk, Z.E. (2020): Overview on Global Water Resources. In: Alsharhan, A.S. & Rizk, Z.E. (Eds.): Water Resources and Integrated Management of the United Arab Emirates, p. 17-61. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland.

Boretti, A. & Rosa, L. (2019): Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water* 2:15. DOI:10.1038/s41545-019-0039-9

Damkjaer, S., & Taylor, R. (2017): The measurement of water scarcity: Defining a meaningful indicator. *Ambio* 46(5):513–531. DOI:10.1007/s13280-017-0912-z

Eke, J.; Yusuf, A.; Giwa, A. & Sodiq, A. (2020): The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination* 495:114633. DOI:10.1016/j.desal.2020.114633.

Gerten, D.; Hoff, H.; Rockström, J.; Jägermeyr, J.; Kummu, M. & Pastor, A.V. (2013): Towards a revised planetary boundary for consumptive freshwater use: role of environmental flow requirements. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5(6):551-558. DOI:10.1016/j.cosust.2013.11.001

Gleeson, T.; Wang-Erlandsson, L.; Zipper, S.C.; Porkka, M.; Jaramillo, F.; Gerten, D.; Fetzer, I.; Cornell, S.E.; Piemontese, L.; Gordon, L.J.; Rockström, J.; Oki, T.; Sivapalan, M.; Wada, Y.; Brauman, K.A.; Flörke, M.; Bierkens, M.F.P.; Lehner, B.; Keys, P.; Kummu, M.; Wagener, T.; Dadson, S.; Troy, T.J.; Steffen, W.; Falkenmark, M. & Famiglietti, J.S. (2020): The Water Planetary Boundary: Interrogation and Revision. *One Earth* 2(3):223-234. DOI:10.1016/j.oneear.2020.02.009

Heistermann, M. (2017): HESS Opinions: A Planetary Boundary on Freshwater Use is Misleading. *Hydrology and Earth Systems Science* 21:3455-3461. DOI:10.5194/hess-21-3455-2017

Jones, E.R.; Bierkens, M.F.P. & van Vliet, M.T.H. (2024): Current and future global water scarcity intensifies when accounting for surface water quality. *Nature Climate Change* 14:629–635. DOI:10.1038/s41558-024-02007-0

Khan, Z.; Thompson, I.; Vernon, C.R.; Graham, N.T.; Wild, T.B. & Chen, M. (2023): Global monthly sectoral water use for 2010–2100 at 0.5° resolution across alternative futures. *Scientific Data* 10:201. DOI:10.1038/s41597-023-02086-2

Oki, T.; Yano, S. & Hanasaki, N. (2017): Economic aspects of virtual water trade. *Environmental Research Letters* 12(4):044002. DOI: 10.1088/1748-9326/aa625f



Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, A.; Chapin, F.S.; Lambin, E.F.; Lenton, T.M.; Scheffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, H.J.; Nykvist, B.; de Wit, C.A.; Hughes, T.; van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sörlin, S.; Snyder, P.K.; Costanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Corell, R.W.; Fabry, V.J.; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P. & Foley, J.A. (2009): A safe operating space for humanity. *Nature* 461:472-475. DOI:10.1038/461472a



# Impulsvortrag

## Vorstellung der Funktionsweise der Kapazitiven Deionisation



Prof. Dr.-Ing. André Lerch, **Hanna Rosentreter** (TU Dresden)



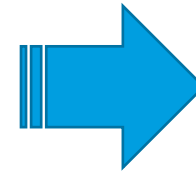
# Problematik



Anstieg des  
Wasserbedarfs



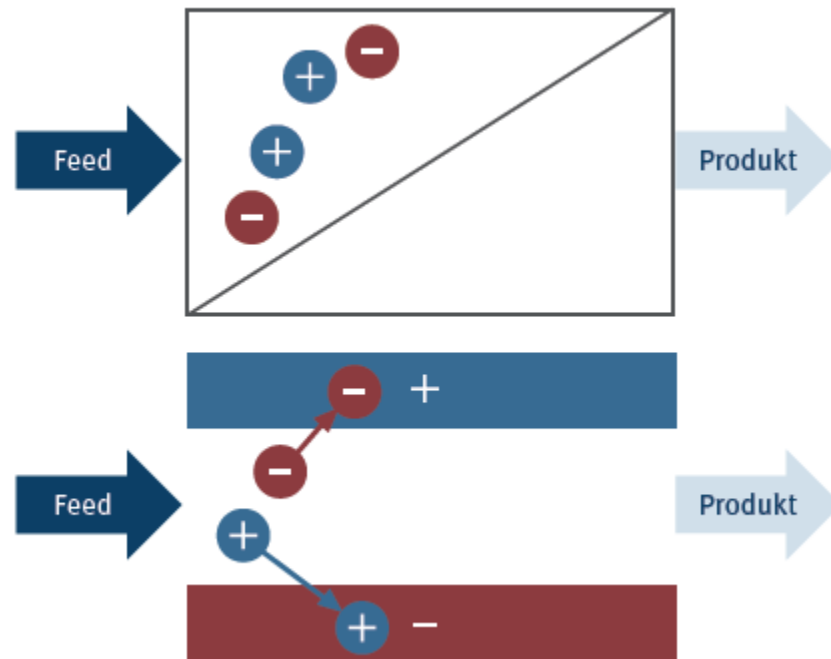
Sinkende  
Süßwasser-  
ressourcen



weltweites Interesse an  
effizienten  
Entsalzungsverfahren

- Reverse osmosis= „Gold standard“ für Meerwasserentsalzung
- **Aber was ist mit Brackwasserentsalzung wenn keine Vollentsalzung benötigt wird?**

# Vergleich thermischer, druckbetriebener und elektrochemischer Entsalzung



Konventionelles Verfahren (oben, „Wasser aus Lösung“) und elektrochemisches, kapazitives Verfahren (unten, „Salz aus Lösung“) im Vergleich. [aus dem Fact Sheet]

## Thermische oder druckbetriebene Entsalzung:

- Lösungsmittel Wasser wird mittels Druck von bis zu 60 bar bei der Umkehrosmose oder über Temperaturen von bis 120° C bei der Verdampfung von den Salzen abgetrennt.

→ Effizient für Meerwasserentsalzung und Konzentraten >3...10 g/L TDS

## Elektrochemischer Entsalzung:

- Ionen werden aus der Lösung entfernt und zwischengespeichert
- Energiebedarf skaliert linear mit der zu entfernen Salzmenge → meist effizienter bei geringerer Anzahl zu transportierender Ionen

→ z.B. Elektrodialyse oder Kapazitive Deionisation

*Al-Amshawee et al. (2020): Electrodialysis desalination for water and wastewater: A review, Chemical Engineering Journal.*

*Patel et al. (2024): The potential of electrodialysis as a cost-effective alternative to reverse osmosis for brackish water desalination, Water Research.*

# Vergleich druckbetriebener und elektrochemischer Brackwasserentsalzungsverfahren

## Druckbetrieben

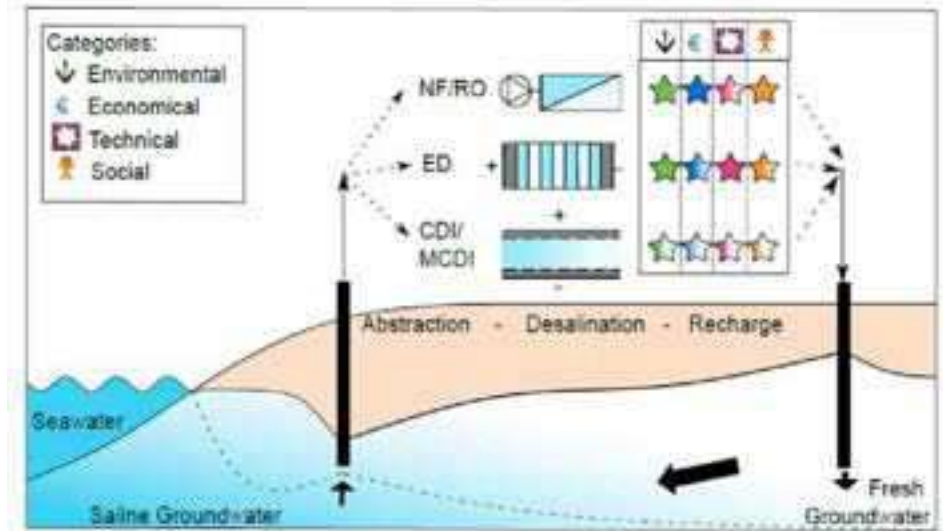
- Für Entsalzung von Brackwasser und Meerwasser geeignet
- Einsatz von chemischen Zusatzstoffen notwendig
- Wenig flexibel

## Elektrochemisch

- Für Entsalzung von Brackwasser mit  $< 5\text{g/L}$  TDS geeignet
- Flexibel in der Anwendung
- geringer Einsatz chemischer Lösungen
- Durch Anwendung von Ionenaustauscher-membranen selektiv

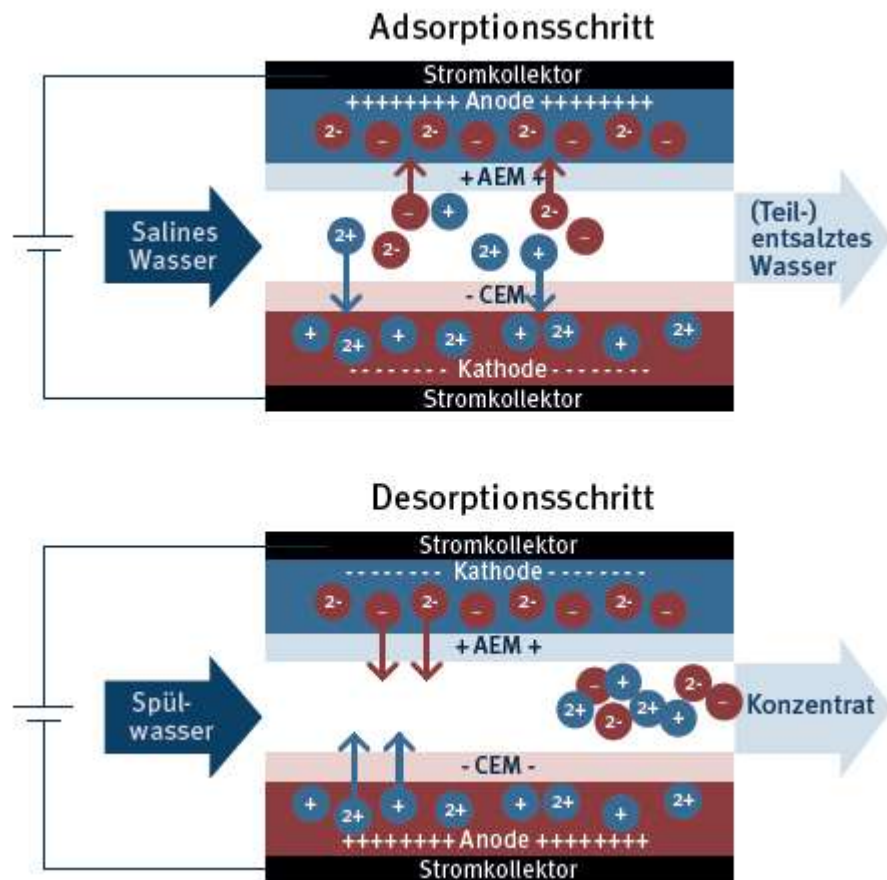


Rosentreter, H.; Walther, M.; Lerch, A. (2024): Assessing the suitability of desalination techniques for hydraulic barriers. *npj Clean Water*



Vergleich unterschiedlicher Entsalzungsverfahren für die Sanierung von Salzwasserintrusion beeinflussten Grundwasserleitern

# Membrangestützte Kapazitive Deionisation



## Membrane Capacitive Deionization (MCDI):

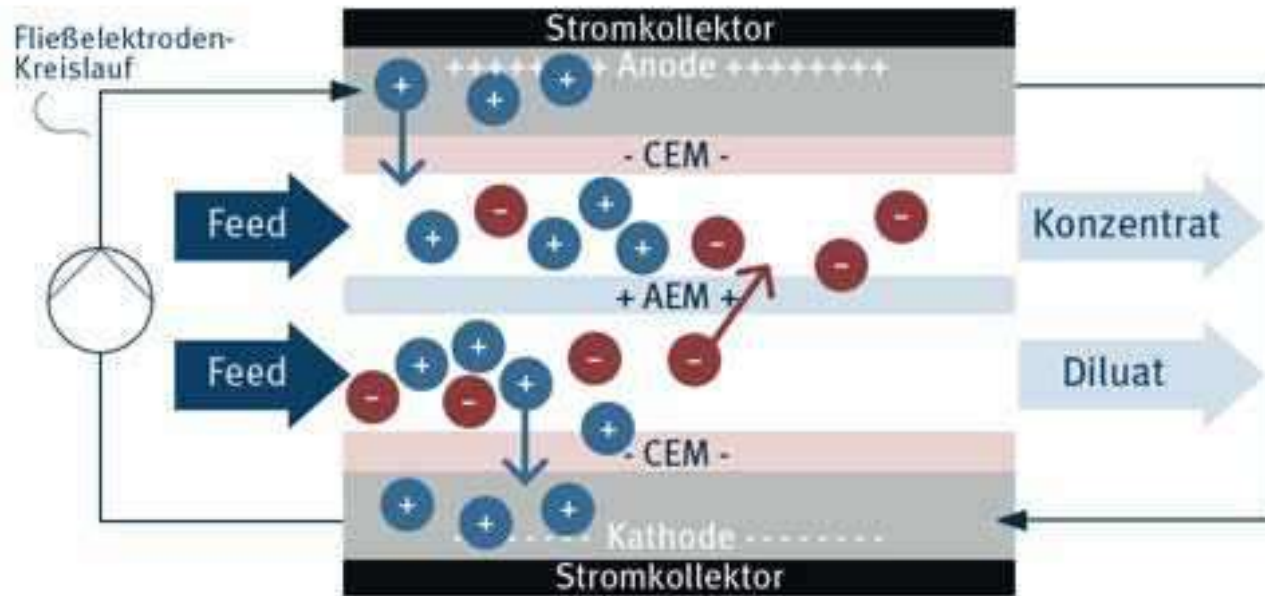
- basierend auf dem Prinzip der Elektroabsorption
- Nutzung von Ionenaustauschermembranen führen im Vergleich zur „einfachen“ Kapazitiven Deionisation zu
  - Einer höheren Salzadsorptionskapazität
  - Höhere Energieeffizienz und geringerer Energieverbrauch
  - Höhere Lebensdauer der Elektroden
  - Verbesserte Regeneration

→ Verbundprojekt WEISS\_4.0  
 (<https://www.sms-group.com/innovation/funding-projects/weiss-4pn>)

Prinzip der konventionellen MCDI; oben: Adsorptionsschritt; unten: Desorptionsschritt. [aus dem Fact Sheet]



# Fließelectroden Kapazitive Deionisation



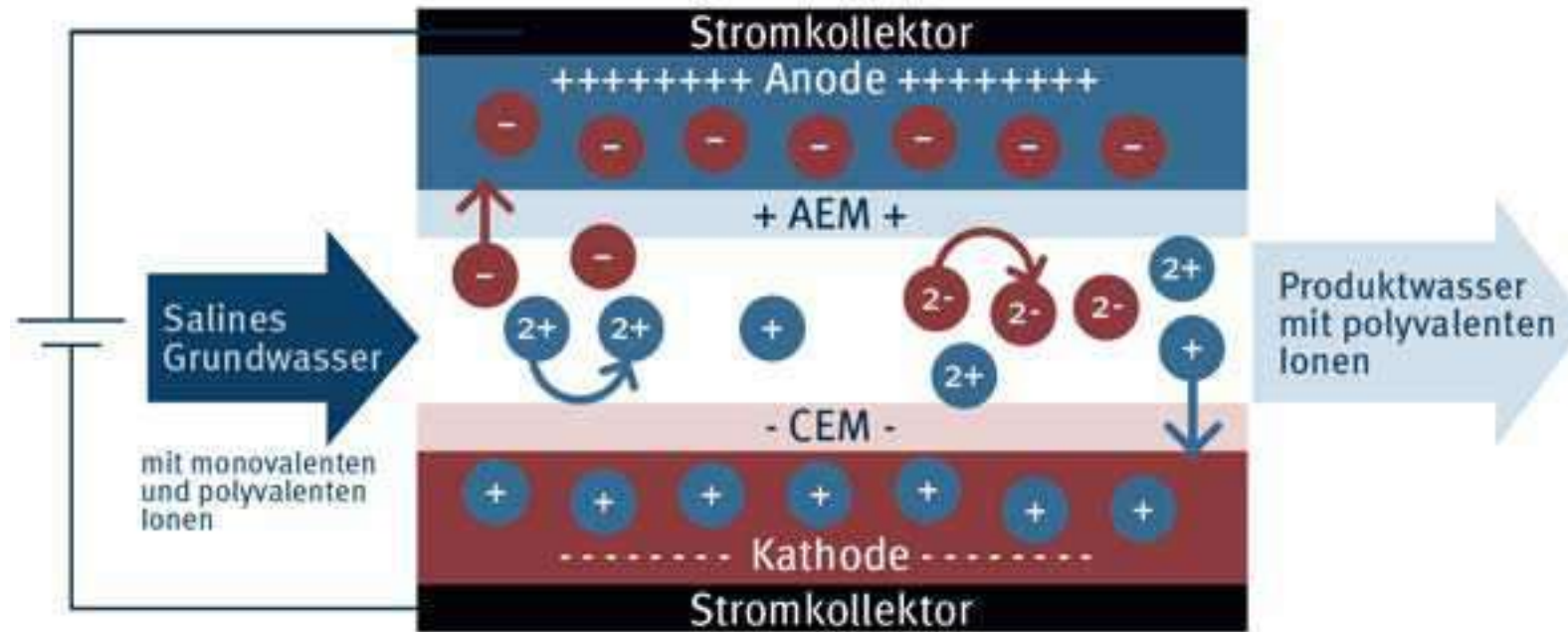
Prinzip von FCDI im Single Module Aufbau mit simultaner Entsalzung und Aufkonzentration.  
[aus dem Fact Sheet]

## Flow Electrode Capacitive Deionization (FCDI):

- kontinuierliche Trennung und Aufkonzentrierung über Fließelectroden möglich

→ Verbundprojekt RIKovery  
([www.rikovery.rwth-aachen.de](http://www.rikovery.rwth-aachen.de))

# Monovalent selektive membrangestützte kapazitive Deionisation (mMCDI)



monovalent Membrane Capacitive Deionization (mMCDI):

- Entfernung von einwertigen Ionen (wie z.B. Natrium oder Chlorid) aus der Lösung
- Nutzung von selektiven Ionenaustauschermembranen

Selektive Entsalzung durch den Einsatz monovalent-selektiver Membranen in der CDI (Projekt innovatION). [aus dem Fact Sheet]

→Verbundprojekt innovatION ([www.innovat-ion.de](http://www.innovat-ion.de))

# Fact Sheet

**WavE**

**(Membrangestützte) Kapazitive Deionisationsverfahren**

**ABSTRACT**

**1. Einleitung**

**2. Membrangestützte Kapazitive Deionisationsverfahren (MCDI)**

**3. Membrangestützte Kapazitive Deionisationsverfahren (MCDI) mit Elektroden**

**4. Membrangestützte Kapazitive Deionisationsverfahren (MCDI) mit Elektroden**

**5. Membrangestützte Kapazitive Deionisationsverfahren (MCDI) mit Elektroden**

**WavE**

**1. Einleitung**

**2. Membrangestützte Kapazitive Deionisationsverfahren (MCDI)**

**3. Membrangestützte Kapazitive Deionisationsverfahren (MCDI) mit Elektroden**

**4. Membrangestützte Kapazitive Deionisationsverfahren (MCDI) mit Elektroden**

**5. Membrangestützte Kapazitive Deionisationsverfahren (MCDI) mit Elektroden**

**WavE**

**1. Einleitung**

**2. Membrangestützte Kapazitive Deionisationsverfahren (MCDI)**

**3. Membrangestützte Kapazitive Deionisationsverfahren (MCDI) mit Elektroden**

**4. Membrangestützte Kapazitive Deionisationsverfahren (MCDI) mit Elektroden**

**5. Membrangestützte Kapazitive Deionisationsverfahren (MCDI) mit Elektroden**

Parameter	Einheit	Wert	Einheit	Wert
...	...	...	...	...

Fact Sheet [Veröffentlichung im September 2024]



# Session I: Membran- und Anlagenherstellung



**Herstellung der Elektroden, der Labor- und Versuchsanlagen**

DEUKUM GmbH – Dr.-Ing. Hans-Jürgen Rapp



**Herstellung der selektiven Ionenaustauschermembranen**

FUMATECH BWT GmbH – Dr. Michael Jeske



Institut für Polymerforschung Dresden e. V. – Tim Oddoy



## Online-Abschlusskonferenz von innovatION am 05.09.2024

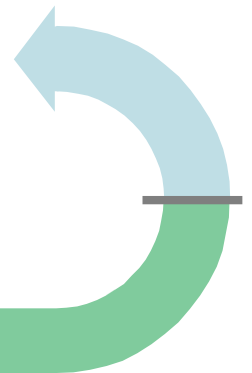
GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Aktivitäten der Deukum GmbH im Projekt:

- Entwicklung und Bau eines Labormoduls
- Entwicklung und Bau zweier Laboranlagen
- Entwicklung und Bau eines Pilotmoduls
- Entwicklung und Bau einer Pilotanlage

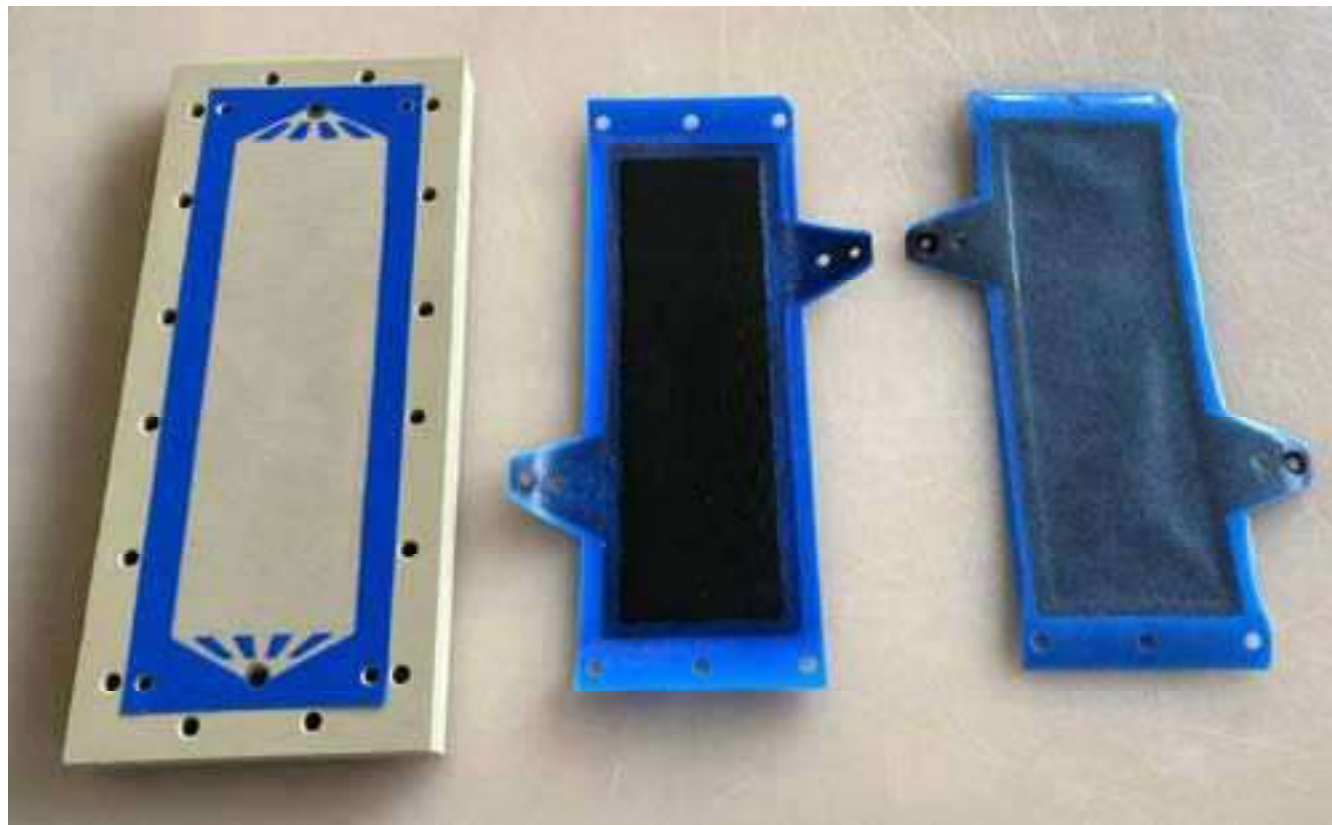


## Entwicklung und Bau eines Labormoduls – CDI 500



### Komponenten:

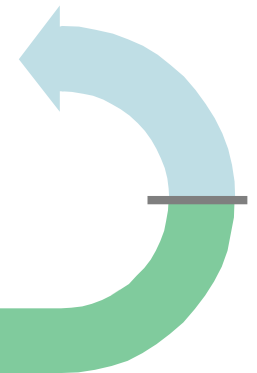
- Endplatten
- Kapazitive Elektroden
- Spacer



## Kapazitive Elektroden

### Komponenten:

- „Stromverteiler“ -Graphitfolie
- Dichtrahmen (Silikon, gewebeverst.)
- „Ladungsspeicher“ – Aktivkohle
- Ionenaustauscherschicht

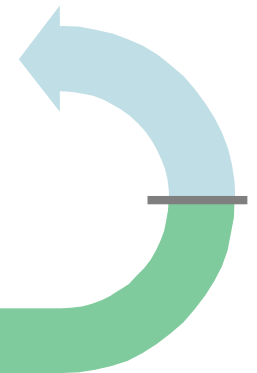




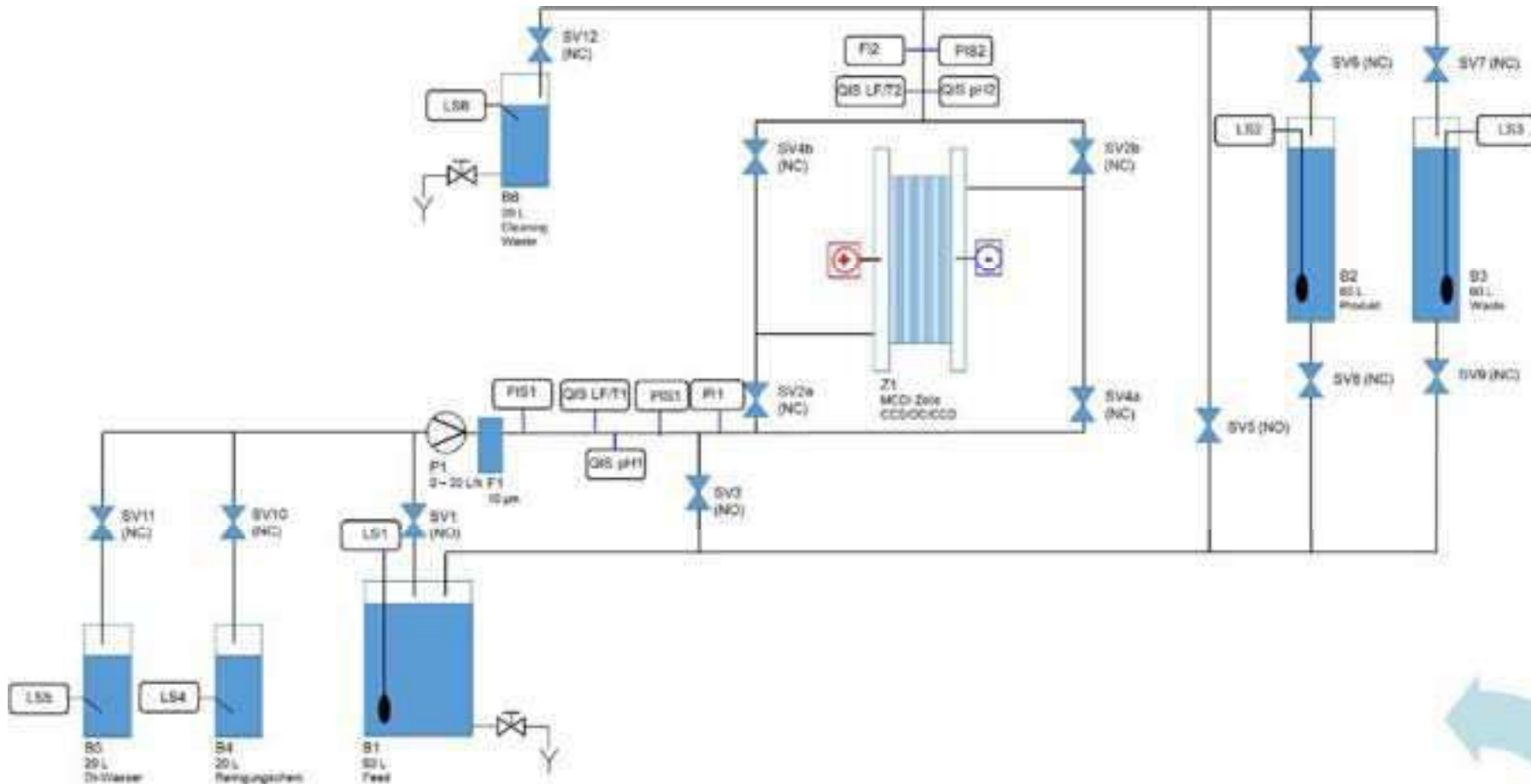
## „Ladungsspeicher“ – Aktivkohle - slurry

### Komponenten:

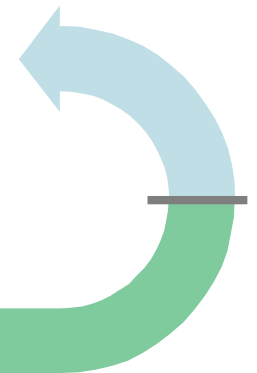
- Wasserlösliches Polymer
- Aktivkohle



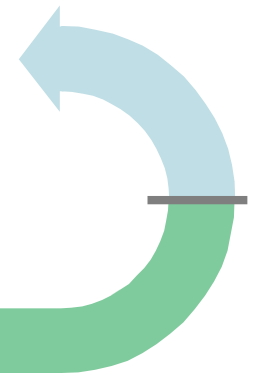
# Entwicklung und Bau zweier Laboranlagen



## Entwicklung und Bau zweier Laboranlagen



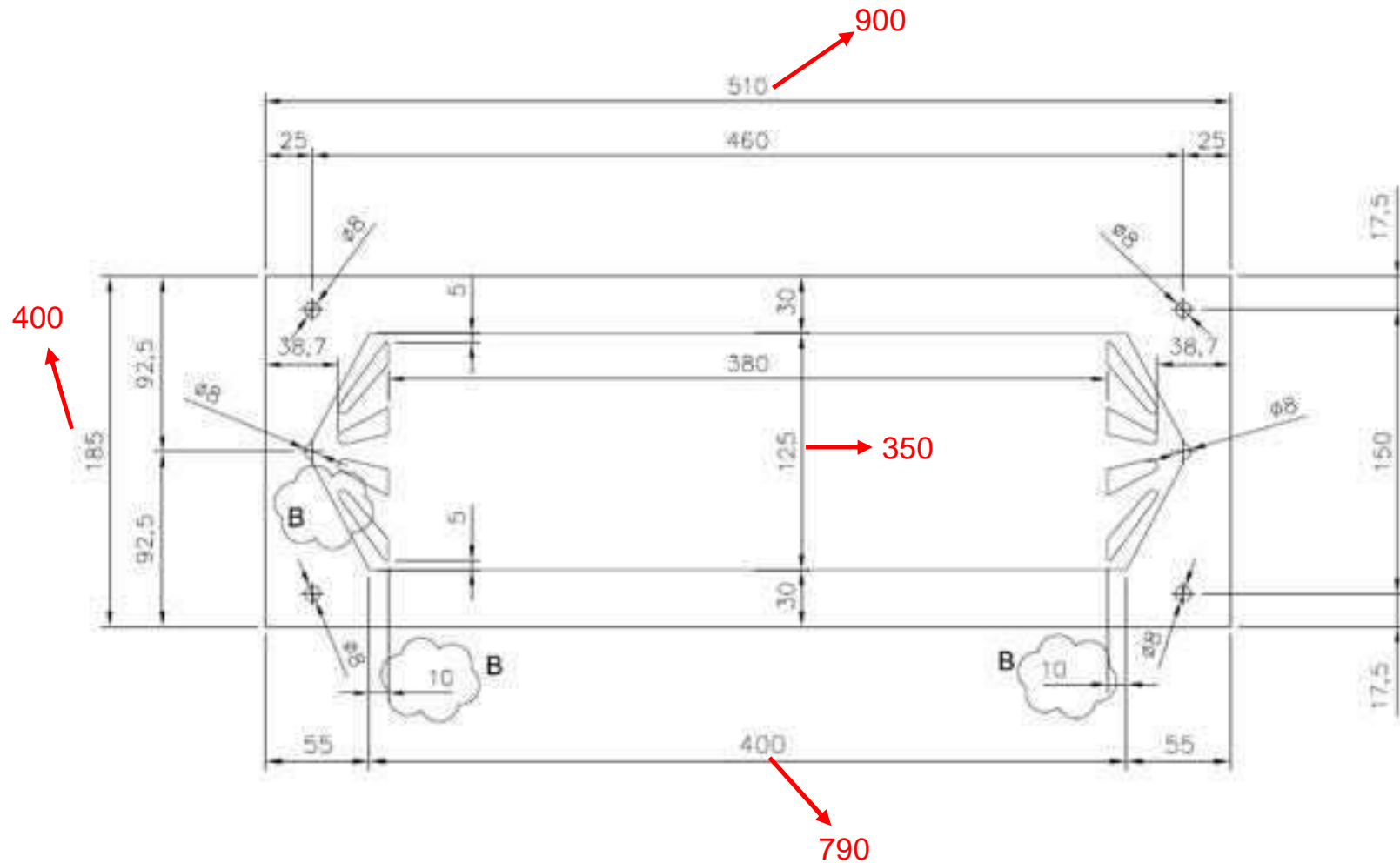
## Entwicklung und Bau zweier Laboranlagen



# Entwicklung und Bau eines Pilotmoduls

## Pilotmodul – Vergrößerung der Kapazität/Fläche

CDI 500 wird zu CDI 2765 – Faktor 5,53

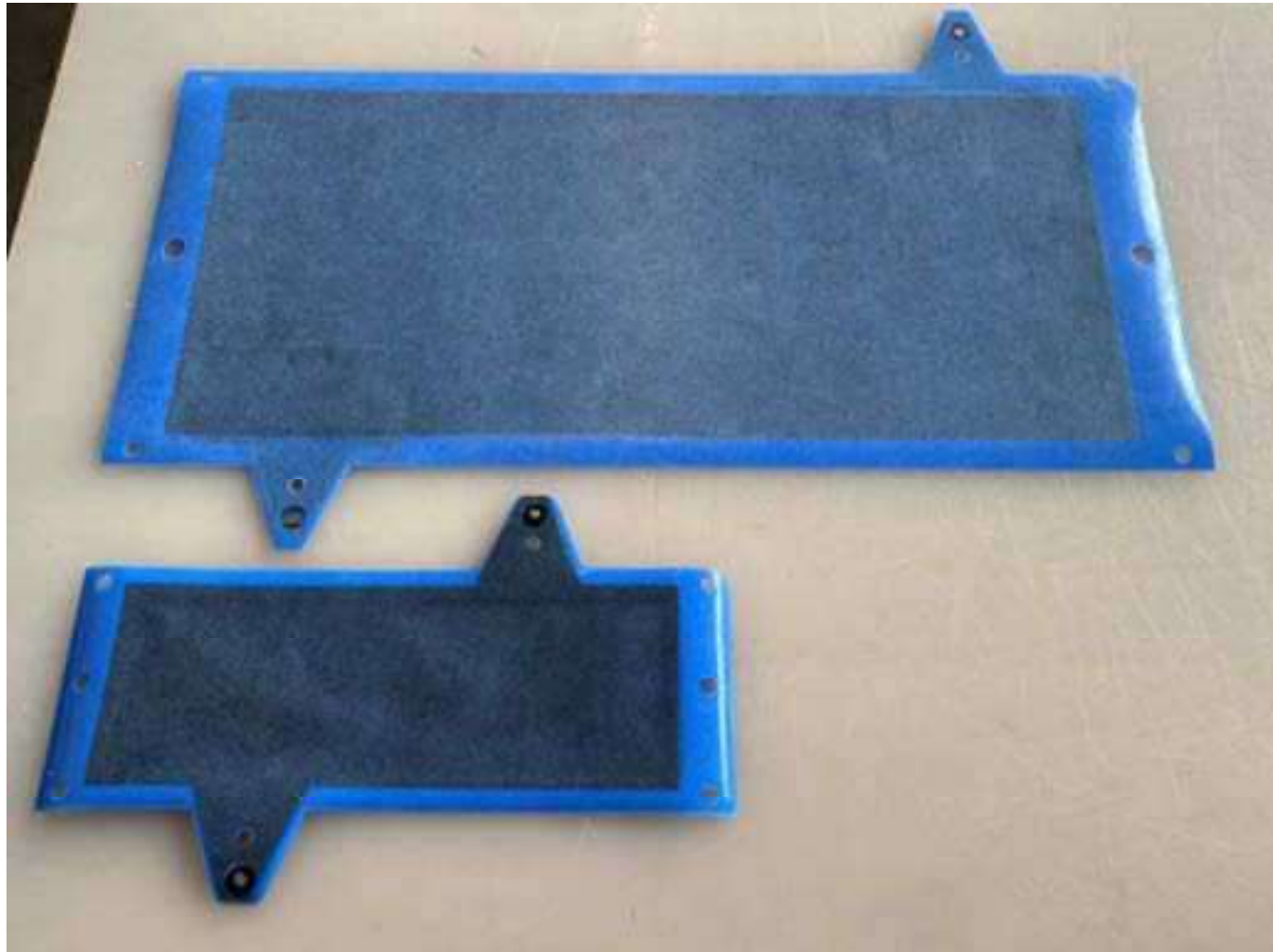




## Entwicklung und Bau eines Pilotmoduls

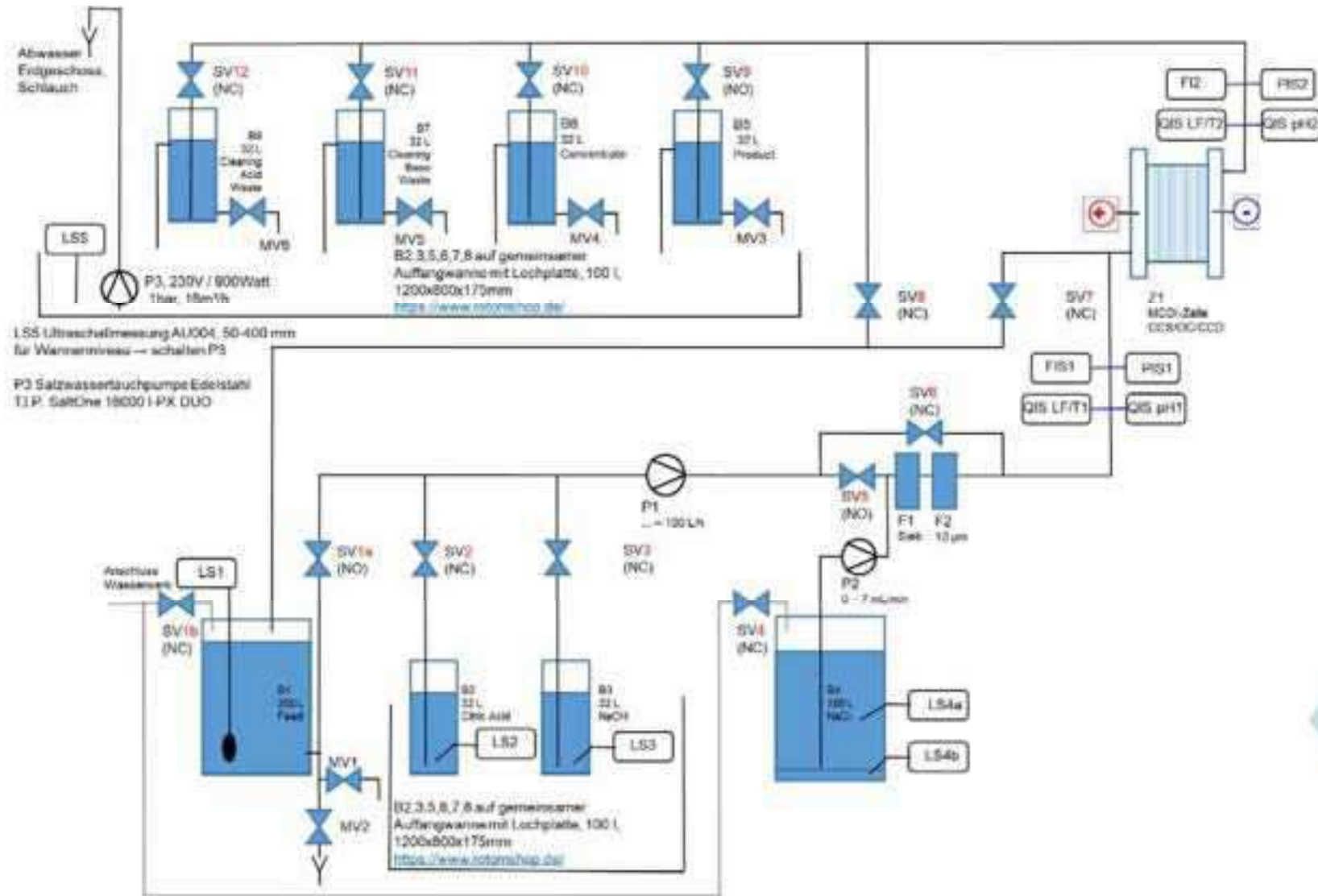
Pilotmodul – Vergrößerung der Kapazität/Fläche

CDI 500 wird zu CDI 2765 – Faktor 5,53

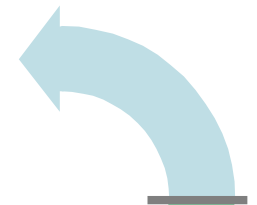


# Entwicklung und Bau einer Pilotanlage

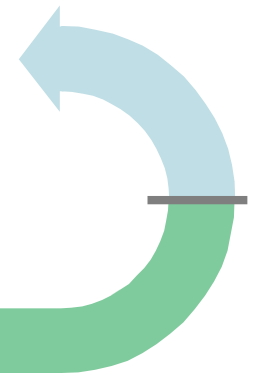
## Pilotanlage – R&I



# Entwicklung und Bau einer Pilotanlage



# Entwicklung und Bau einer Pilotanlage





**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit 😊**

**Thank you very much for your attention 😊**

**Grazie, gracias, merci, .....😊**




# Projekttreffen innovatIOn

05.09.2024 Dresden

Karl Danz

Michael Jeske



Workshop innovatIOn

## POLYMERE 1

---

### Polymere für Elektrodenmaterial:

- Sowohl Anionen- als auch Kationentauscher-Polymerlösungen wurden entwickelt und hergestellt
- Einsatz als „Ionomer“ in der Elektrodenherstellung beim Projektpartner DEUKUM

## POLYMERE 1

---

### Polymere für Elektrodenmaterial:

- Vom Labormaßstab (250 ml-Glaskolben) bis in Edelstahl-Rührkessel (50-Liter-Volumina)
- Zwischengröße von 15 bis 20-Liter in Glasrührkessel getestet. Dadurch visuelle Überprüfung zum Verhalten der Polymerlösungen möglich
- Mit diesen Erfahrungswerten dann Übergang in die Edelstahlkessel



## Polymere für Membranen:

- Aufskalierung der Polymere ebenfalls über Glaskolben (250 ml bis 5 Liter) zu Glasrührkessel bis 50-Liter Volumina und schließlich Übergang in Edelstahlkessel mit 200-Liter-Volumina
- Ebenfalls Anionen- und Kationentauscher
- Versuche mit unterschiedlichen Lösungsmitteln
- Variation der Funktionalisierungsgrade
- Variation der Konzentration (Polymeranteil)



200-Liter-Edelstahl-Rührkessel

## Membranentwicklung und Herstellung

Übersicht zu den Entwicklungsansätzen:

### Ansatz 1

- Reziproke Beschichtungen
  - => VM-FAS als Basis => darauf dünne Kationentauscherschicht
  - => VM-FKS als Basis => darauf dünne Anionentauscherschicht

### Ansatz 2

- Beschichtung mit Neutralschichten
  - => Beschichtung mit Siloxanschicht (Siliziumorganische Verbindungen)

### Ansatz 3

- Membranen mit eingebundenem Zeolith-Material
  - => z.B. ZSM-5 homogen in die Polymermatrix eingebunden

### Ansatz 4

- VM-FAS und VM-FKS mit Polyamid-Beschichtung des Projektpartners IPF

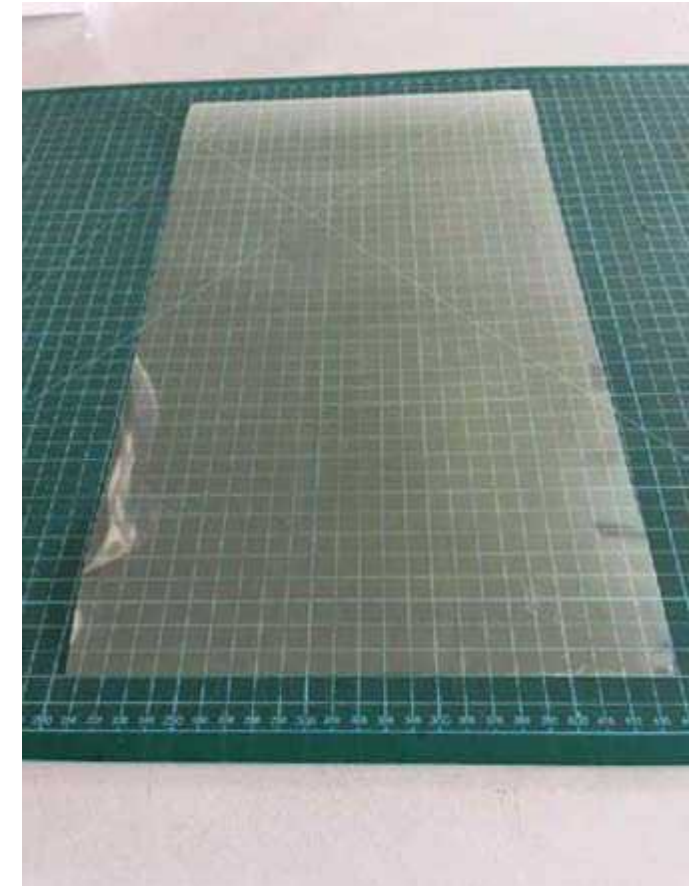


# MEMBRANEN

Entwicklung beginnt mit Ziehversuchen im Labor

Beispiel: Herstellung einer VM-FAS mit Siloxan-Neutralschicht

Labcoater-System



Muster auf der Labcoater-Anlage hergestellt

## Versuchsproduktionen auf der kleinen Produktionslinie

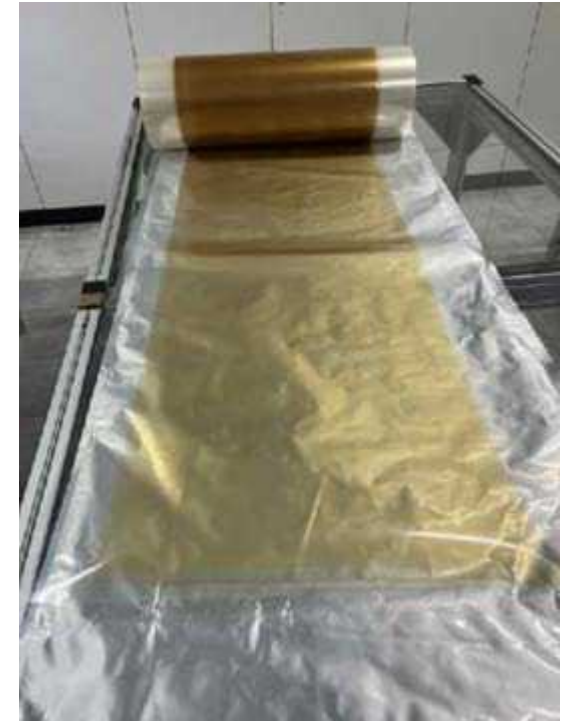
Beispiel: Herstellung der Versuchsmembranen mit Zeolith für die  
Technikumsversuche an der TUD / Membrantypen mit der Bezeichnung VM-FAS-Z  
und VM-FKS-Z

Membranbreite bis 550 mm möglich

Herstellung über Casting-Prozess



Für beide Membrantypen rund 50 LFM produziert



Rolle mit der VM-FAS-Z

# HERSTELLUNG DER MEMBRANEN

---

## Membranen für den Demonstrator auf Langeoog

Geometrie: 900 x 480 mm



VM-FKS + N nach der Entnahme aus dem  
Wasserbad

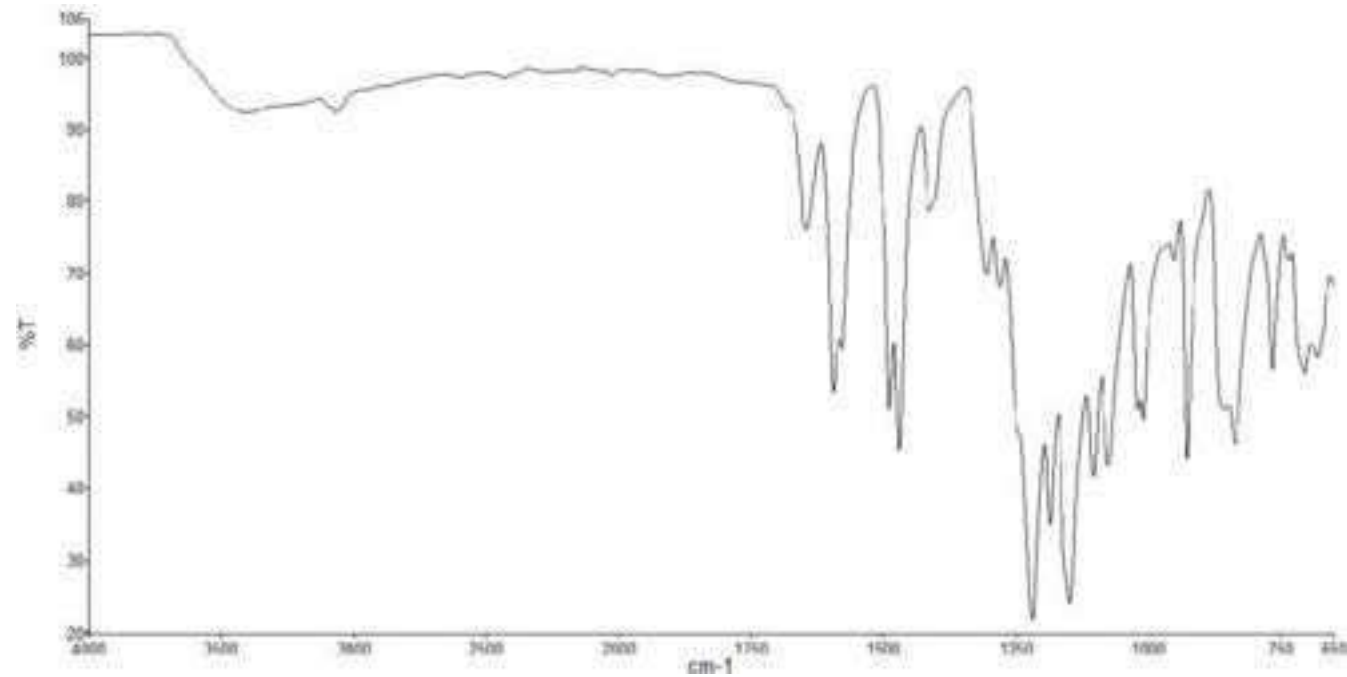


VM-FAS + N => Vorbereitung zum Verpacken

## Analytik

- Nasschemische Untersuchungen: Dickenmessung / Ionenleitfähigkeit / Flächenwiderstand / Permselectivität / Ionenaustauschkapazität / Quellungsverhalten
- FT-IR-Untersuchungen / Mikroskopie / TGA-Messungen / Zug-Dehnung zur Überprüfung der mechanischen Eigenschaften
- FUMATECH-Teststand zum schnellen Screening der monoselektiven Eigenschaften der Membranen
- Technikumsversuche in einem Testmodul an der TUD und Einsatz in der Demonstratoranlage => Entsprechende Bemusterungen mit aussichtsreichen Membranproben wurden durchgeführt

## Beispiel: FT-IR-Messung zur VM-FAS-Z



### Banden und Peaks in $\text{cm}^{-1}$ :

3.500 – 3.200 => O-H-Valenz aus gebundenem Wasser

3.100 => N-H-Valenz

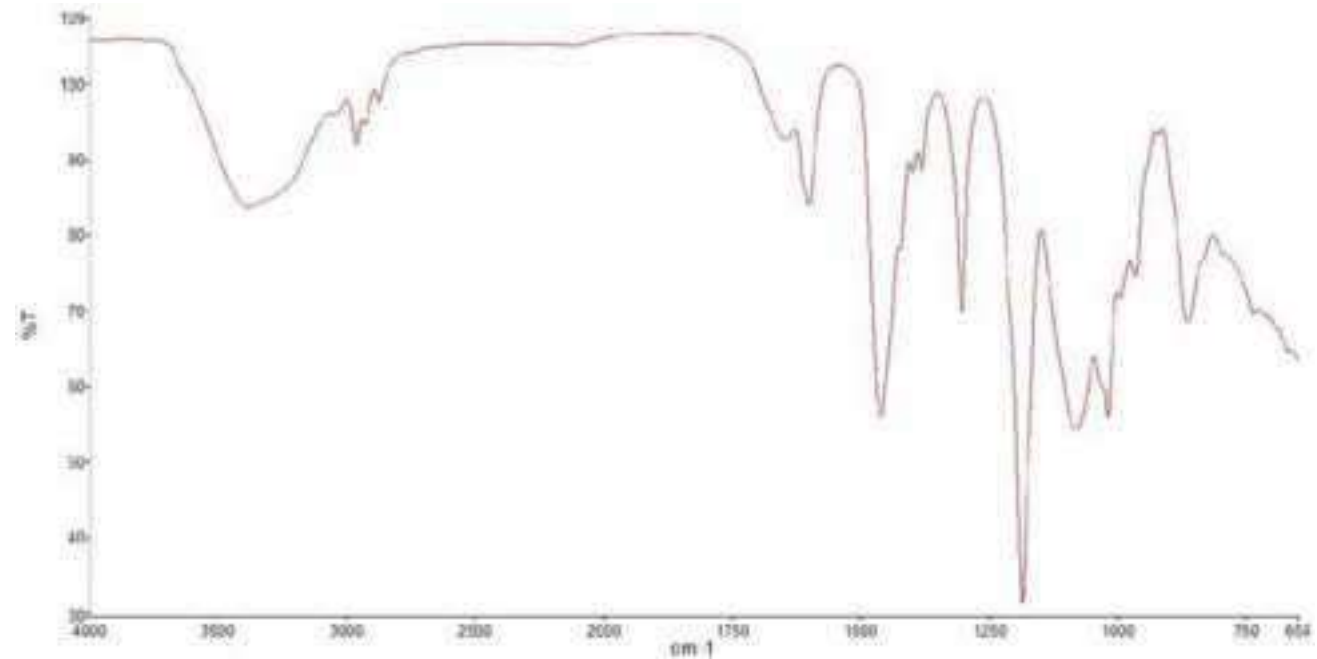
1.650 – 1.620 =>  $\text{NH}_2$ -Deformation

1.500 – 1.480 => Ringschwingung der Aromaten

1.200 – 1.050 => C-N-Valenzen



## Beispiel: FT-IR-Messung zur VM-FKS-Z



### Banden und Peaks in $\text{cm}^{-1}$ :

3.500 – 3.200 => O-H-Valenz aus gebundenem Wasser / Sulfonsäuregruppen

3.000 – 2.800 => C-H-Valenz aus Kohlenwasserstoffresten

1.690 – 1.650 => C=O-Valenz des Ketons

1.500 – 1.480 => Ringschwingung der Aromaten

1.300 – 1.275 => C-O-C-Valenz der Ethergruppe

1.200 – 1.150 => C-O-C-Valenz der Ethergruppe

# MIKROSKOPIE



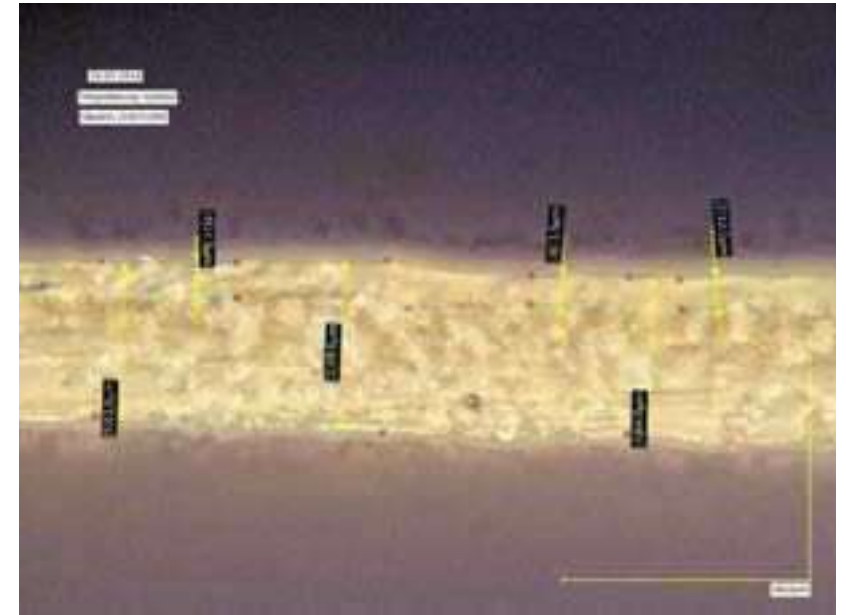
Membran VM-FAS+Neutralschicht

Membran VM-FAS-Z



Oberfläche 500fach

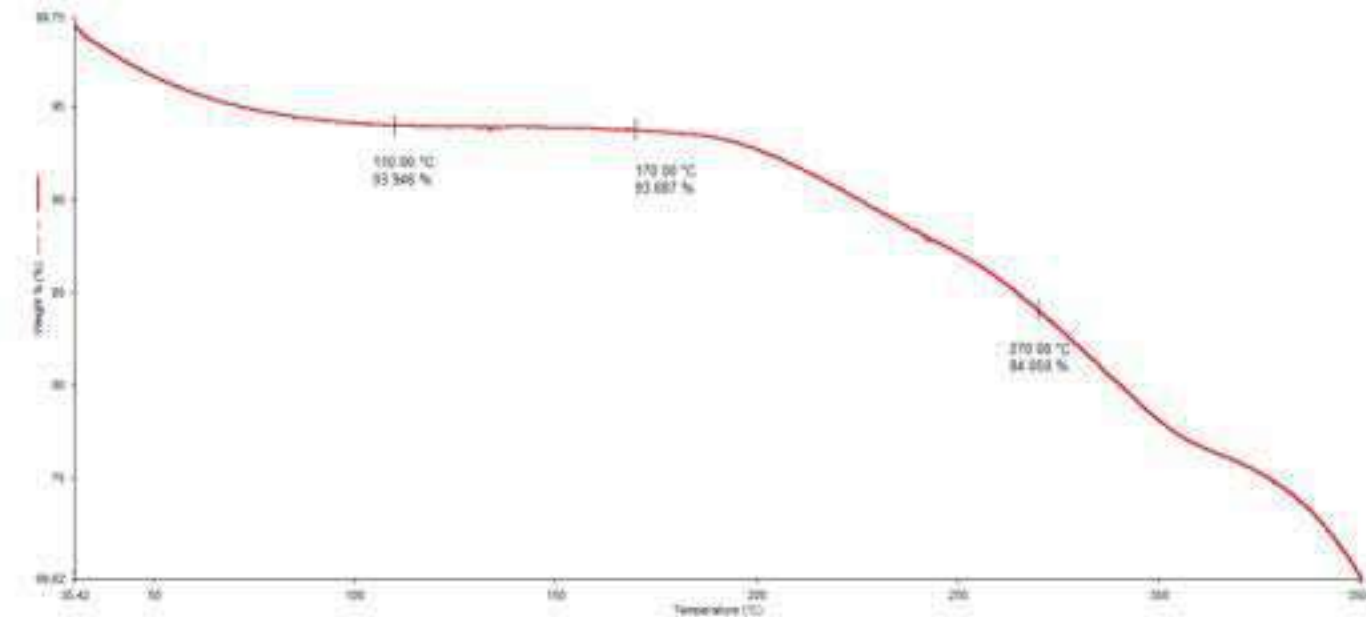
Membran VM-FAS-Z



Schnitt 1000fach

Beispiel:

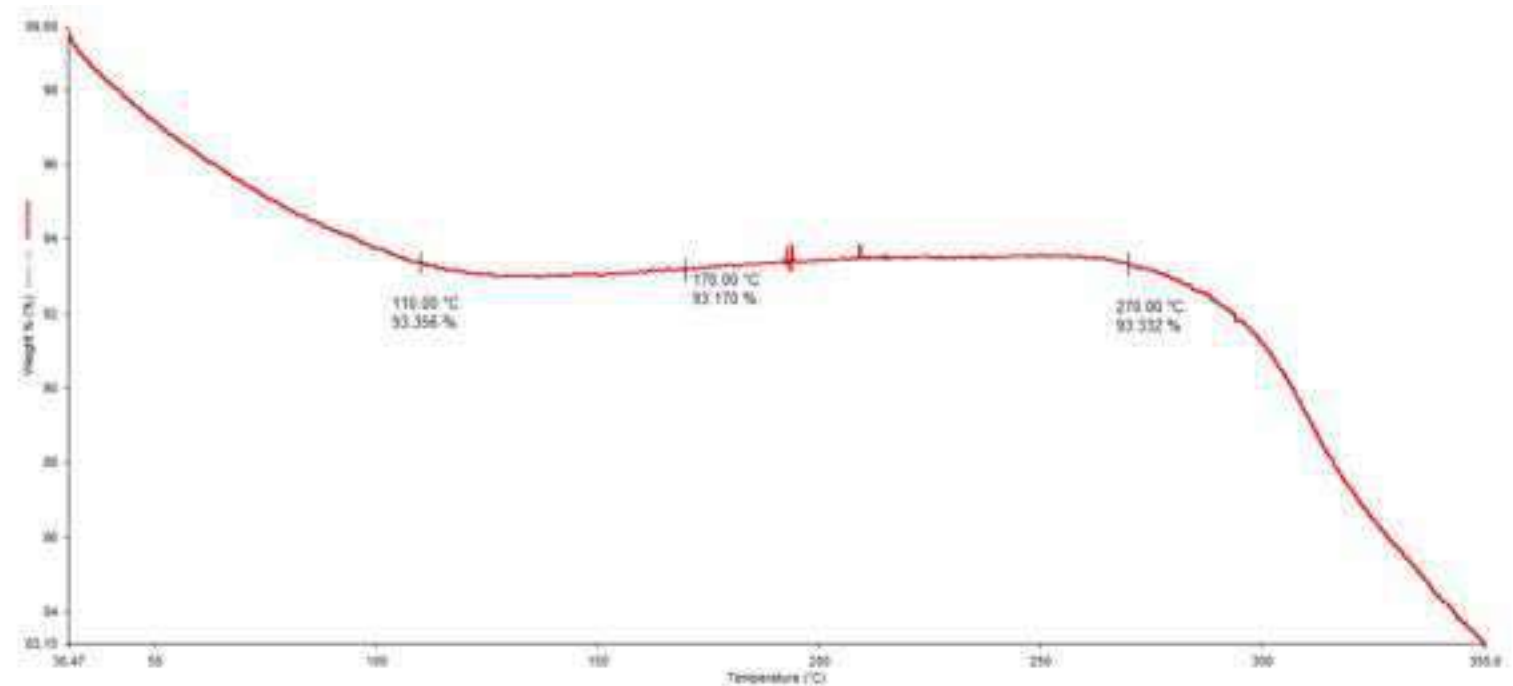
Messung der VM-FAS + FKS-Schicht (Reziproker Ansatz)



Heizrate 10°C / min.

Beispiel:

Messung der VM-FKS + FAS-Schicht (Reziproker Ansatz)



Heizrate 10°C / min.

## Nasschemische Messergebnisse

Ermittlung wichtiger Membranparameter:

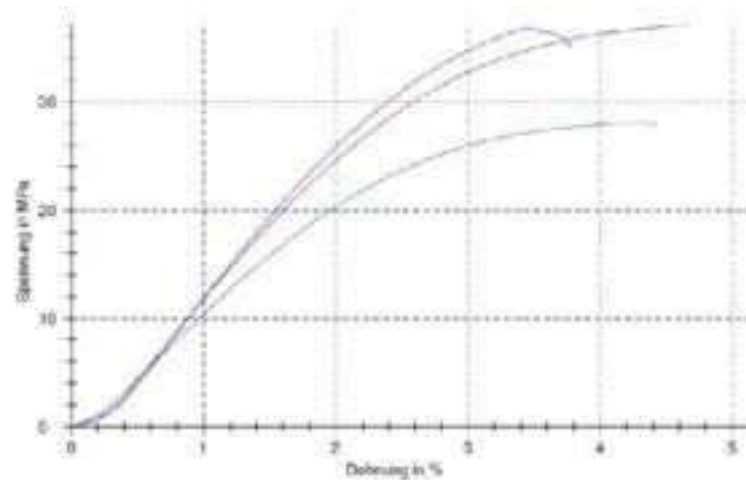
Membran	Dicke (µm)	LF (mS/cm)	FW (Ω/cm <sup>2</sup> )	PS (%)	IEC (mmol/g)	Quell. LxB (%)	Quell. Masse (%)
VM-FAS-DPhS-001	43 - 44	9 - 17	0,25	95,5	0,90	9,9	25
VM-FKS-DPhS-001	34	68 - 70	0,05	99,8	1,43	5,6	28
VM-FAS-DPhS-002	27 - 39	13 - 26	0,10	90,9	1,35	12 - 14	47
VM-FKS-DPhS-002	34	66	0,51	100	1,48	8,3	20
VM-FAS-20	17 - 23	52	0,03	90,8	1,56	14 - 15	31
VM-FKS-30	35	57	0,06	99,8	1,14	6 - 7	22



# Mechanische Untersuchungen

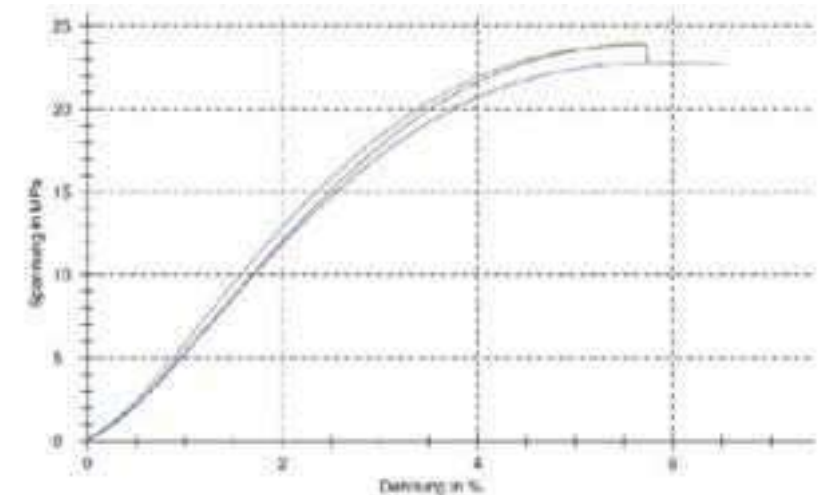
## Beispiel: VM-FAS-Z und VM-FKS-Z

### ZUG-DEHNUNG



VM-FAS-Z

Legende	Nr	a0 mm	E-Modul MPa	$\nu$ MPa	$\sigma_M$ MPa	$\epsilon_M$ %	$\sigma_B$ MPa	$\epsilon_B$ %
<span style="color:red">■</span>	1	0,052	1521,19	0,11	37,04	4,68	37,04	4,68
<span style="color:green">■</span>	2	0,054	1200,08	0,03	28,05	4,33	27,73	4,41
<span style="color:blue">■</span>	3	0,0535	1570,37	0,11	36,80	3,45	34,83	3,79



VM-FKS-Z

Legende	Nr	a0 mm	E-Modul MPa	$\nu$ MPa	$\sigma_M$ MPa	$\epsilon_M$ %	$\sigma_B$ MPa	$\epsilon_B$ %
<span style="color:red">■</span>	1	0,075	571,75	0,10	23,94	5,61	22,83	5,74
<span style="color:green">■</span>	2	0,075	671,97	0,12	23,89	5,71	23,88	5,74
<span style="color:blue">■</span>	3	0,075	607,93	0,12	22,81	5,98	22,68	6,55

Zweck: Schnelltest zur Ermittlung monoselektiver Eigenschaften

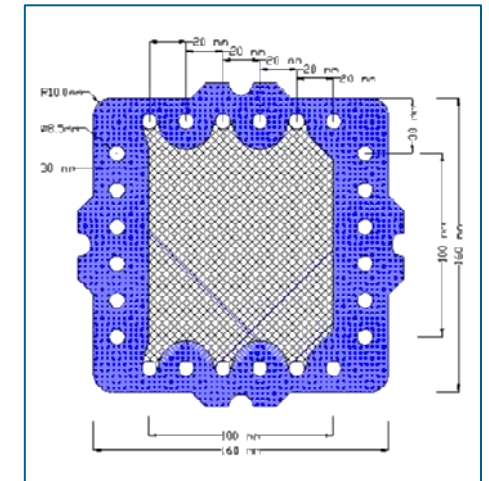
Teststand wurde im Rahmen von zwei Masterarbeiten konzipiert und in Betrieb genommen



Neu konzipierter Teststand



ED 100-Modul



Geometrie des  
Spacermaterials

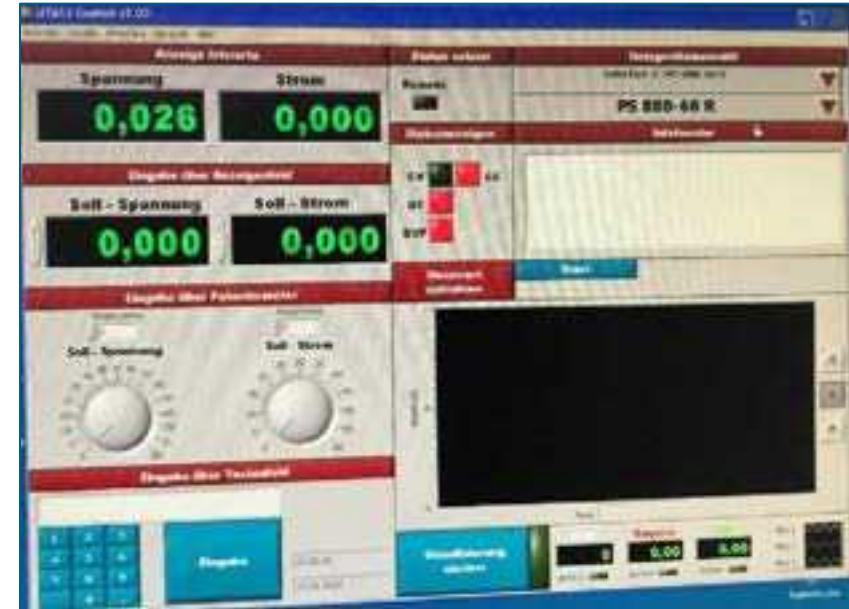
- Teststand komplett neu konzipiert und aufgebaut
- Verwendung eines Elektrodialysemoduls vom Typ ED 100
- Spacer auf Basis von Polypropylen
- Membrancharakterisierung auf Basis der elektrolytischen Leitfähigkeit

## Leitfähigkeitsmessung

Messung der LF in beiden Prozesskreisläufen



Neu konzipierter Teststand



Messwert-Aufnahme im 30-Sekunden-Takt

- Einsatz von Messgeräten mit Schreiberfunktion
- Messung der LF in mS/cm
- Parallel auch Aufnahme der Betriebsparameter Stromstärke und Spannung

## Modul-Bauteile

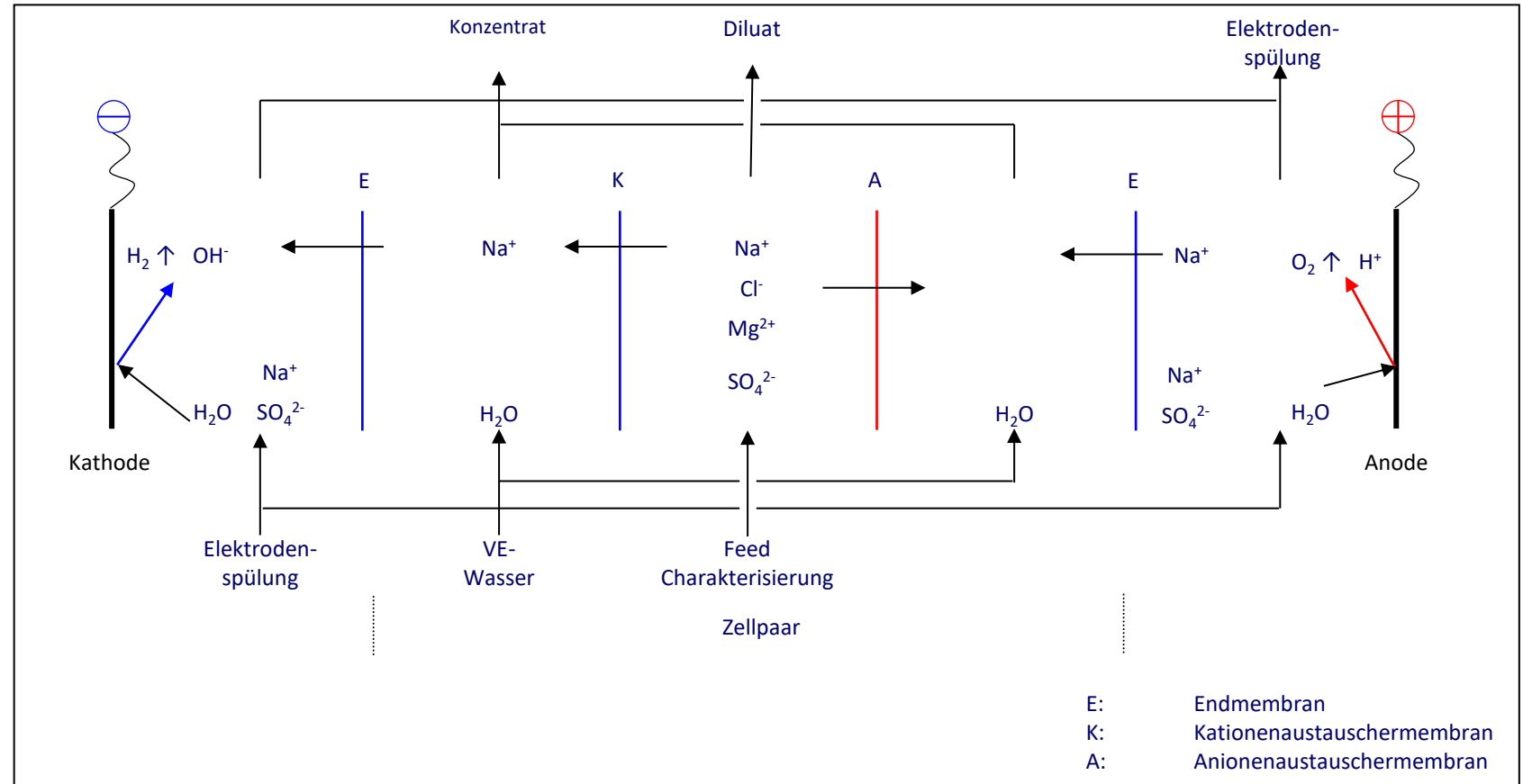
### Stapelbare Membranelektrolysezelle Typ ELECTROCELL MP-Cell



- Aufbau erlaubt schnellen Austausch der Membranmaterialien und zahlreiche Zellkonfigurationen

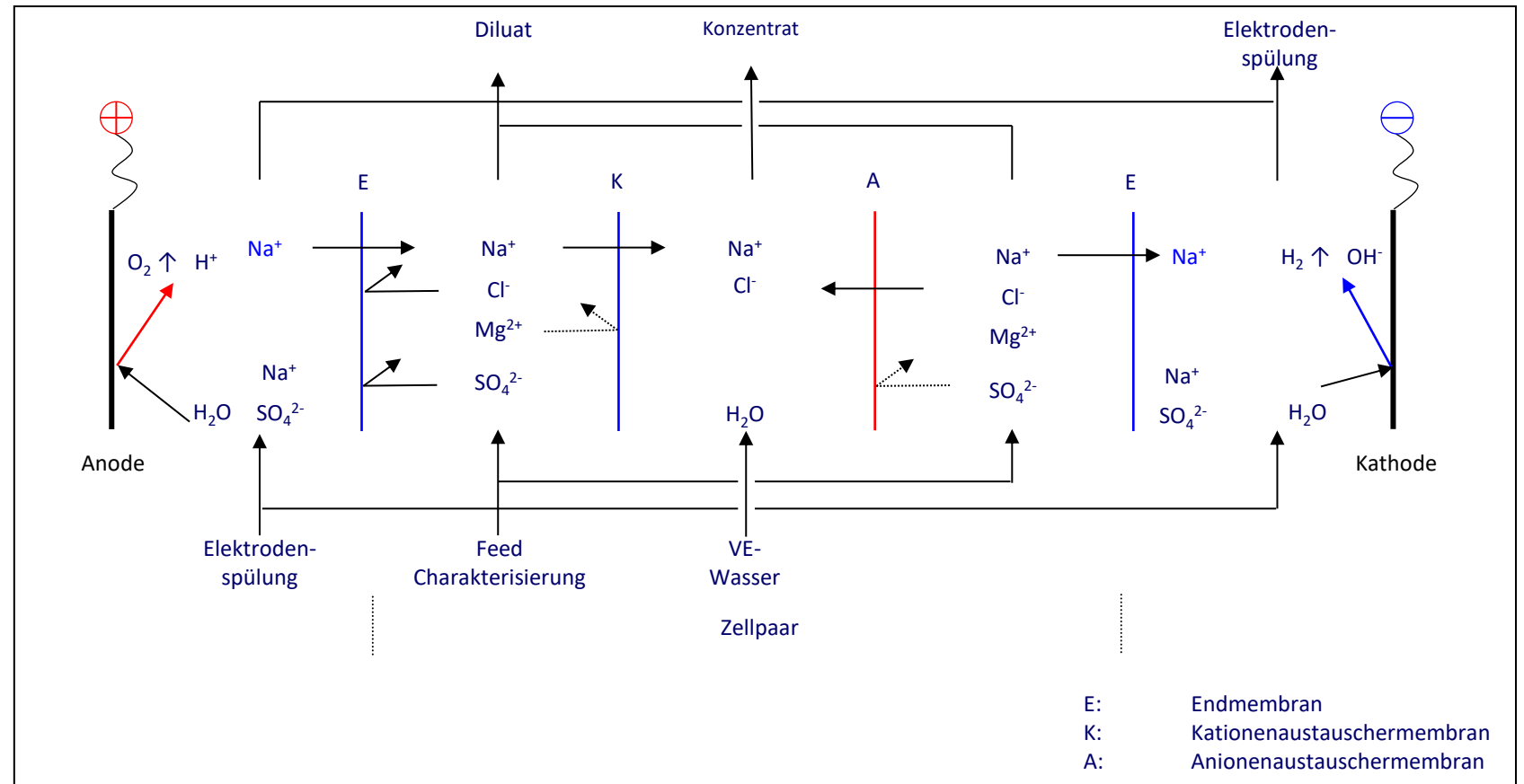


Variante 1: 2 Konzentrat-Halbzellen



Reaktionsschemata

Variante 2: 2 Diluat-Halbzellen



## FAZIT

---

- Polymere und Membranen aufskalierbar
- Reziproke Ansätze: Tendenz zur Monoselektivität. Aber weitere Versuchsreihen notwendig
- Neutralschichtansätze: Hier zum Teil sehr gute Ansätze im Sprühverfahren. Casting-Verfahren bisher nicht so gute Ergebnisse. Sprühverfahren müsste auf die Produktionslinie übertragen werden
- Zeolith-modifizierte Membranen: Ebenfalls gute interne Ergebnisse. Zeolith-Anteile und Typ sind noch variabel
- Kombination FT + IPF-Membran: Sehr gute Resultate. Prozesstechnik müsste auf Produktionslinien übertragen werden



Gefördert durch:



FOR YOU AND PLANET BLUE.





## innovatION Abschlusskonferenz

*Selektive Entfernung monovalenter Ionen aus salzhaltigen Wässern für die Grundwasseranreicherung und Trinkwasseraufbereitung*

innovatION – Präsenz-Meeting, 9-7-2024

---

**Jochen Meier-Haack, Tim Oddoy**

*Leibniz Institut für Polymerforschung Dresden e.V.*

## Agenda

1. Startphase
2. Membranentwicklung über die Projektlaufzeit
3. Ergebnisse zum Projektende
4. Allg. Stand der Membranentwicklung zum Projektende
5. Ausblick auf zukünftige Arbeiten

# Projektstart

## Thema und die Zielstellung für die Membranentwicklung



<https://www.ostsee.de/schon-gewusst/salz.php>



Nitrat soll < 0,005 %

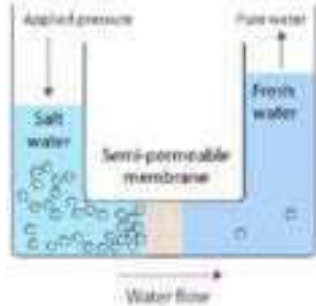


<https://www.wibro-wassertechnik.de/entnitratisierung/wibro-entnitratisierung-typ-n-cl.html>

<https://www.bund-naturschutz.de/landwirtschaft/nitrat-im-grundwasser>

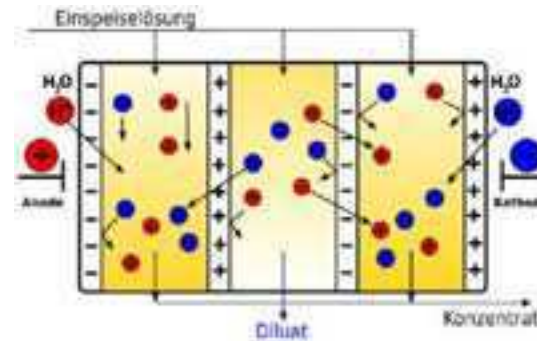
## Thema und die Zielstellung für die Membranentwicklung

RO - Verfahren



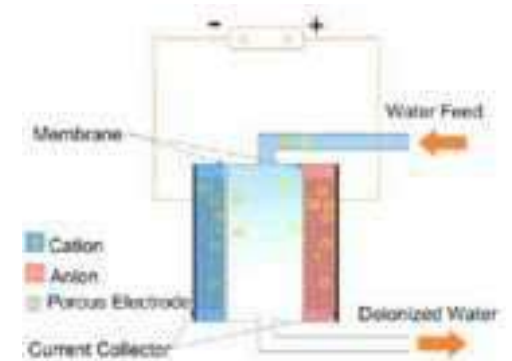
[https://www.avidityscience.com/en\\_gb/news/what-is-reverse-osmosis](https://www.avidityscience.com/en_gb/news/what-is-reverse-osmosis)

ED - Verfahren



<https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Elektrodialyse.svg>

CDI - Verfahren

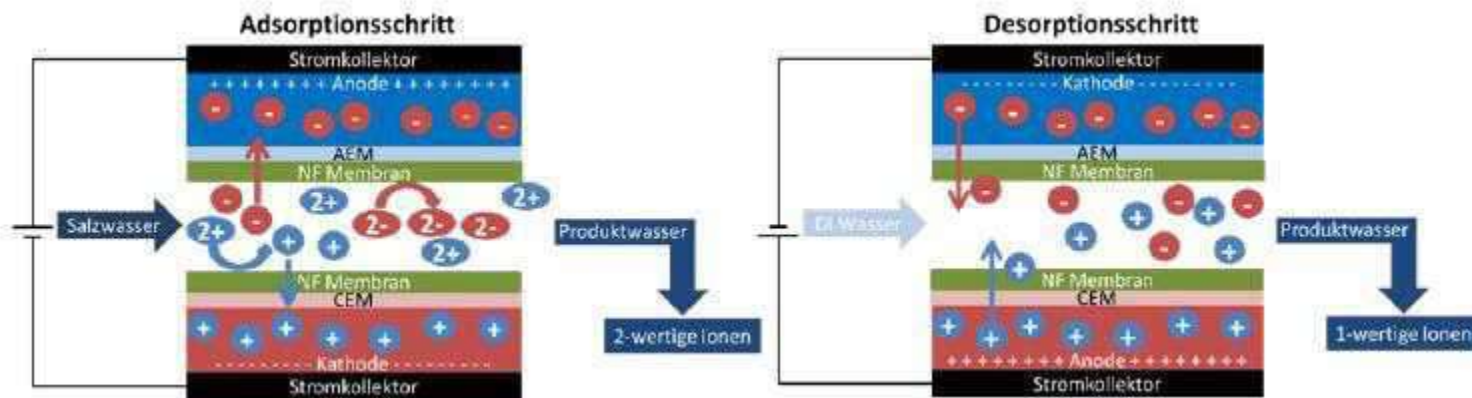


[https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitive\\_deionization#/media/File:Capacitive\\_Deionization.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitive_deionization#/media/File:Capacitive_Deionization.png)



## Thema und die Zielstellung für die Membranentwicklung

mMCDI - Verfahren



Vorhabenbeschreibung\_innovat|ON\_“Selektive Entfernung monovalenter Ionen aus salzhaltigen Wässern für die Grundwasseranreicherung und Trinkwasseraufbereitung“

## Ansätze zur Entwicklung neuartiger monovalenter IEMs

1. Applikation einer NF-Membran auf neu zu entwickelnden porengefüllten IEMs (a) oder bestehenden IEM oder Ionenaustauscher-Aktivkohle-Elektrodenmaterialien mittels Grenzphasenpolymerisation
2. Applikation der IEM in der Stützschiicht einer NF-Membran
3. Herstellung einer integralen NF-IEM durch Verwendung funktionalisierter Monomere (z. B. 2,4-Diaminobenzolsulfonsäure oder 5-Trimethylammoniumisophthalsäure) und weitere Oberflächenmodifizierung mit hochgeladenen Polymeren/Polyelektrolyten
4. Beschichtung einer AEM bzw. CEM mit einer dünnen, nanoporösen und hochvernetzten Anionen- bzw. Kationenaustauscherschicht nach einem Nass- bzw. Lösungsbeschichtungsverfahren
5. 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

Vorhabenbeschreibung\_innovat|ON\_“Selektive Entfernung monovalenter Ionen aus salzhaltigen Wässern für die Grundwasseranreicherung und Trinkwasseraufbereitung”

## Basismembranen und Polyamid-Beschichtung

Basismembranen  
= Ladungs-Barriere

Polyamid-Beschichtung  
= monoselektive Barriere

### IEM-Materialien (vorrangig)

rakeln oder rollen

### Trägermaterialien

AEM:

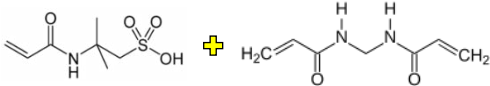


- Non-woven NT2484
- MF-400 membrana
- NF Fumatech

+ Photoinitiator (TPO) in Lösemittelgemisch aus Wasser und Ethanol im Verh. 4:1

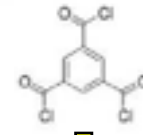
UV-Vernetzung

CEM:



+ Photoinitiator (AAPH) in Lösemittelgemisch aus Wasser und Ethanol im Verh. 4:1

Interfacial polymerisation



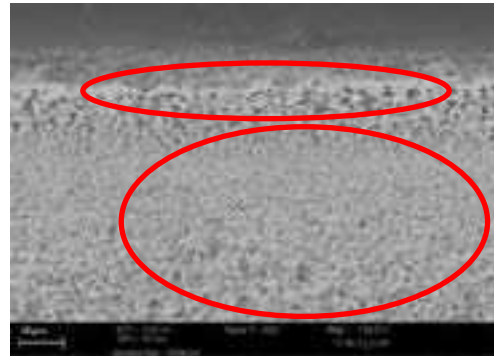
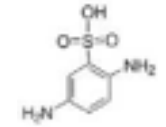
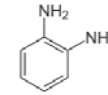
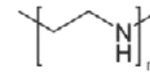
mit TMC vernetzte Aminoverbindungen



PEI

DAB

2,5-DABSS



Novel Hybrid NF-IEM

## Charakterisierungsmethoden

**Impedanz**

Membranwiderstand  $R_{tp}$



**Potenzialdifferenzmessung**

Bestimmung Permelektivität PS



Spannungsdifferenzmessung

**Elektrodialyse**

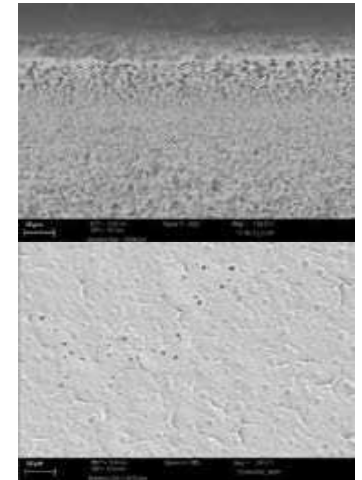
Bestimmung Valenzselektivität VS



Konzentrationsdifferenzen

**REM**

Querschnitt und auf Oberfläche

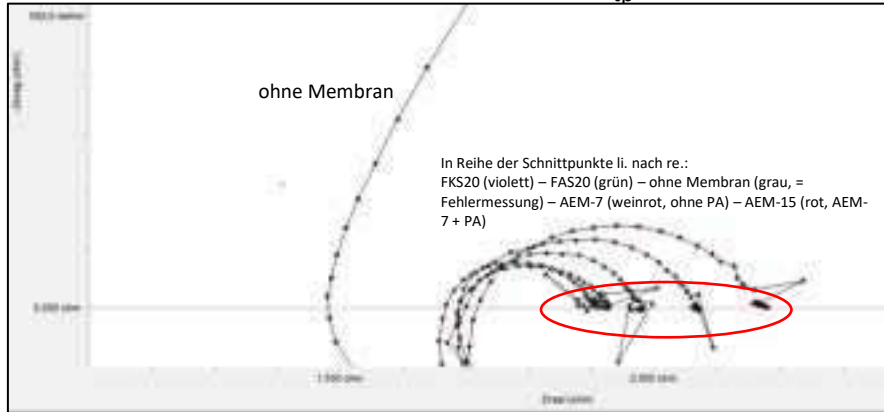




## Methodenentwicklung

### Impedanz

Membranwiderstand  $R_{tp}$



#### signifikante Faktoren:

- Temperatur → mehrere 100mOhm/°C (0,5 M NaCl)
- Abstand Sense-Elektrodenflasch
- Leitfähigkeits-Niveau Elektrolytlösung
- Leitfähigkeitsschwankungen Elektrolytlösung
- Exp. Sauberkeit (Salz und Lufteinschlüsse)

### Elektrodialyse

Bestimmung Valenzselektivität VS



ICP-OES /  
UV-Vis-Küvettest



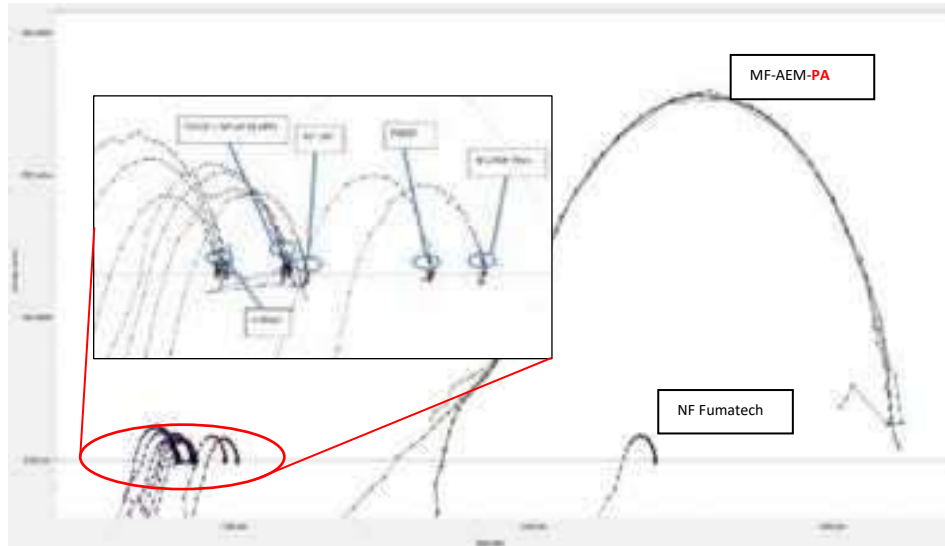
#### signifikante Faktoren für hohe Entsalzungsleistung:

- Elektrodenabstand
- Versuchsdauer, abh. Von  $R_{tp}$
- Permeatvolumen

## Membranergebnisse

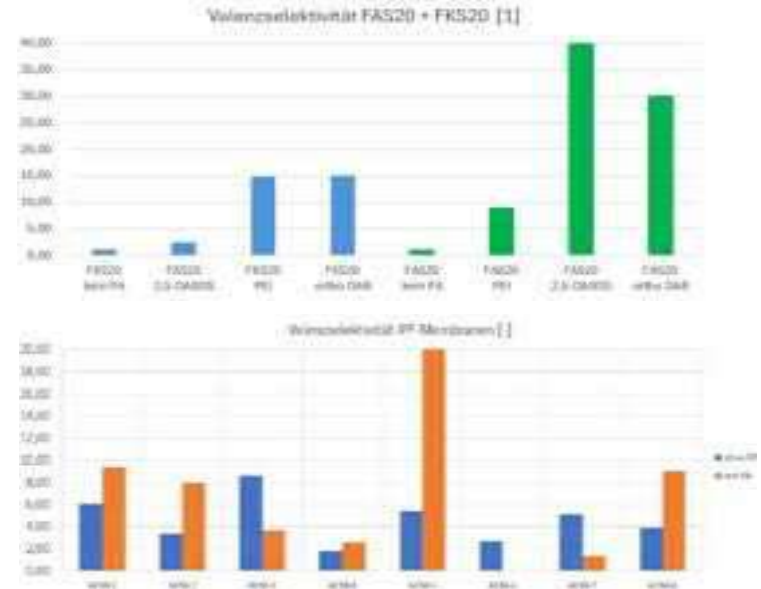
Impedanz

Membranwiderstand  $R_{tp}$



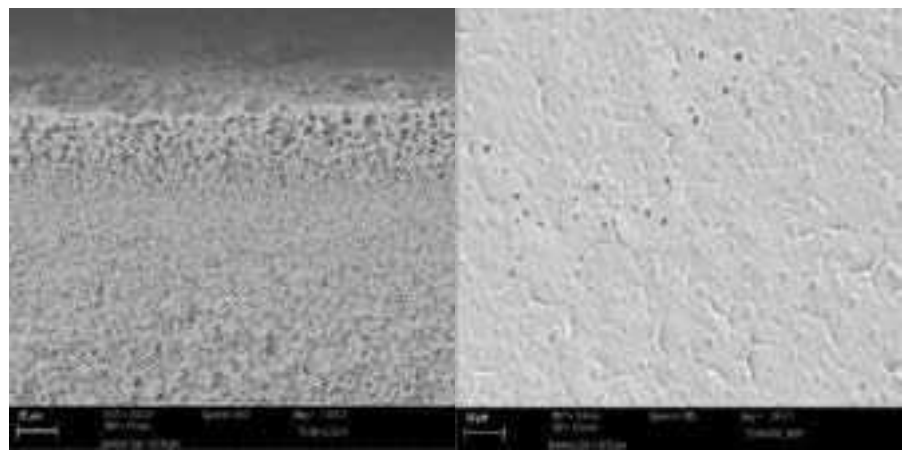
Elektrodialyse

Bestimmung Valenzselektivität VS

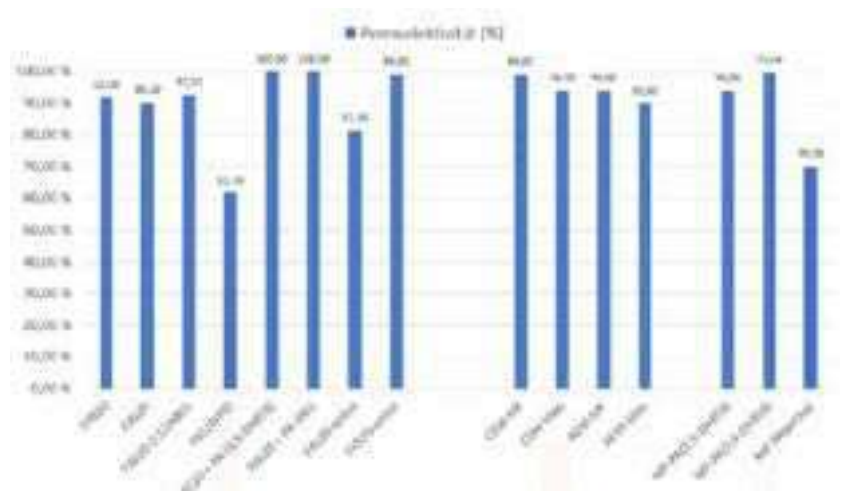


## Membranergebnisse

REM  
Innere Struktur



Potenzialdifferenzmessung  
Permselectivität



## *Allg. Status Membrantentwicklung zum Projektende*

### ***Was haben wir erreicht?***

#### *Bereich Membranen*

- Neuartige IEM-Materialien
- Neuartige IEM in MF-Mem als Basismembranen mit vergleichbaren Eigenschaften wie kommerzielle Produkte
  - Polyamidbeschichtung mit effektiver Wirkung für Mono-Selektivität
  - Modifizierung kommerzieller Membranen zu Mono-Selektivität

#### *Bereich Methoden*

Messaufbau und Methodik zur Impedanz-Spektroskopie von Membranen

- Messaufbau und Methodik zur Bestimmung der Valenz-Selektivität durch Elektrodialyse



1. Optimierung der Membranen → vorrangig Polyamid-Beschichtung
2. Optimierung der Messmethoden → Elektrodialyse und Impedanzmessung
3. Neue Anwendung suchen für spezifische Entsalzung (andere Ionen)

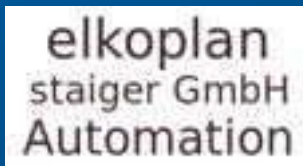
# Danke für die Aufmerksamkeit

---

# PAUSSE

... bis 11:15 Uhr

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



## Digitalisierung

elkoplan staiger GmbH – Axel Staiger



## Entsalzung mit der mMCDI

TU Dresden – Hanna Rosentreter & David Schödel



## Infiltration mit der mMCDI

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg – Laura Bräunig





Axel Staiger  
elkoplan staiger GmbH  
+49 1511 9391693

- generelle Überlegungen beim Entwurf des Automatisierungssystem
- Mobilfunknetzabdeckung auf Langeoog und in Nienburg (Standorte der Pilotanlage)
- VPN - Monitoring der Labor- und Pilotanlagen

Im Projekt entwickelte kleine Highlights

- Webvisualisierung zur Anlagenbedienung
- Bestimmung der Kondensatorzeitkonstante  $\tau$  des MCDI-Stacks im laufenden Prozess
- Sollwertführung für MCDI-Spannung / -Strom und Pumpendrehzahl
- Optimierungen der CIP-Sequenzen
- Ermitteln der Anlagen-Fitness als Surrogatparameter

- **Bedienerfreundlich**

- bestenfalls selbsterklärende Visualisierung
- einfache Interaktionen an der MCDI-Anlage

→ Webseite

→ Drucktaster „Ein (Betrieb) / Aus (Standby)“

- **Reduktion von Komponenten**

- geringere Kosten und Ressourcenverbräuche
- weniger zum „upgraden“ / „hochrüsten“ bei „Retrofit“
- geringere Fehleranfälligkeit

→ reduzierte elektromechanische Verbindungstechnik

→ Verzicht auf klassisches HMI  
neue Geräte üblich nach 5-8 Jahren

→ industrieerprobte Technik  
Verfügbarkeit > 10 Jahre

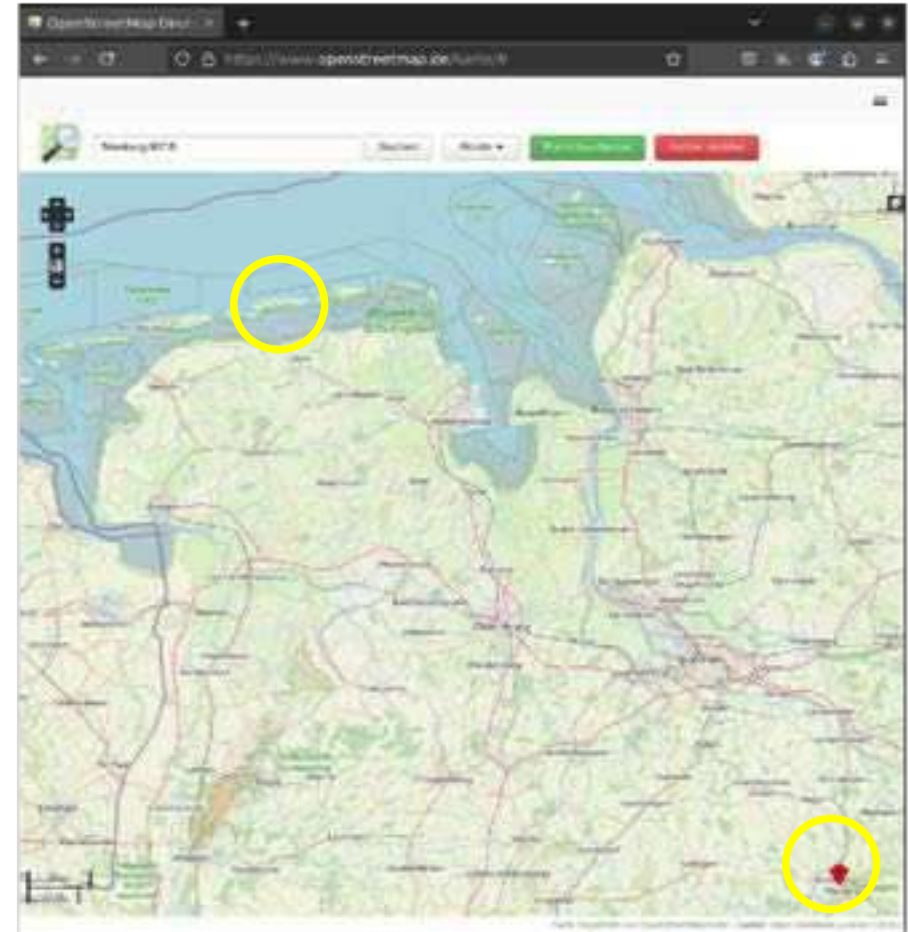
- **Reduktion von Abhängigkeiten bei Software**

- benötigte Softwarekomponenten sind 100% „vor Ort“
- erzeugter Quellcode muss exportierbar sein

→ kein Nachladen aus „Content Delivery Networks“ (Javascript Libs...) wie „im Web“ üblich

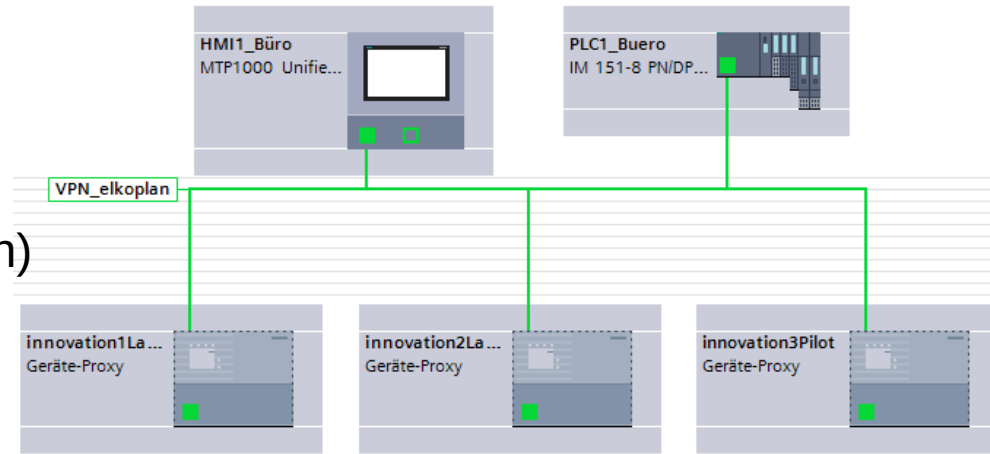
→ HTML, css, javascript „textbasiert“  
plc-Code in SCL statt KOP / FUP

- <https://gigabitgrundbuch.bund.de/>
- generelle Erreichbarkeit per 4G / 5G Mobilfunk deutschlandweit gegeben (mit kleinen „weißen Flecken“)
- worst-case fallback auf 2G/Edge (Praxis 220kBit/s  $\sim$  27kByte/s) ...
- relevante Bereiche auf Langeoog bzw in Nienburg erreichbar per 4G (Praxis 50MBit/s  $\sim$  6,2MByte/s), Einbindung Pilotanlage in VPN gut machbar
- Einbindung Laboranlagen über lokale kabelgebundene Internet-Zugänge bzw. per WiFi (Router als Client gegenüber WLAN)





- VPN basierend auf openVPN (Server extern)
- Teilnehmer „direkt“ verbunden
- Prozessbeobachtung und Eingriffe über Webbrowser auf PC's / Smartphones (openVPN-Client)
- klassisches HMI (MTP1000) exemplarisch als übergeordnete Leitechnik, Kopplung zu PLC's über OPC-UA-Protokoll herstellerunabhängig machbar
- PLC's liefern Webseiten zur ortsunabhängigen Bedienung/Visualisierung über integrierten Webserver aus



# VPN - Monitoring

- exemplarisch übergeordnete Leittechnik als zentrale Übersicht
- Anzeige der „nötigsten“ Werte ( 15 Variablen )
- Verlinkung zu „WebVisu“ der einzelnen Anlagen

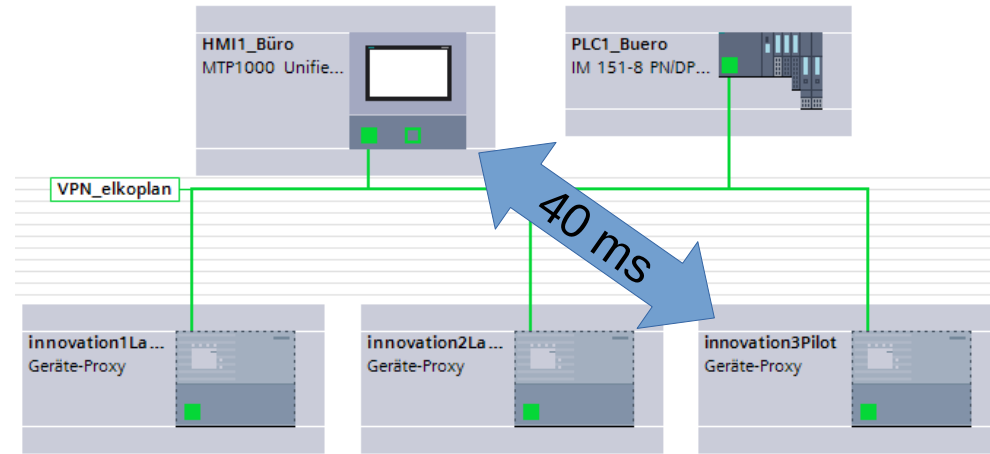


		Monitoring						
Innovation 1 - Labor Dresden	Step 777	Measurement	Value	Unit	Measurement	Value	Unit	<a href="#">GO TO...</a>
	stepTime	Measurement	Value	Unit	Measurement	Value	Unit	
Innovation 2 - Labor Dukum	Step 777	Measurement	Value	Unit	Measurement	Value	Unit	<a href="#">GO TO...</a>
	stepTime	Measurement	Value	Unit	Measurement	Value	Unit	
Innovation 3 - Pilotanlage	Step 777	Measurement	Value	Unit	Measurement	Value	Unit	<a href="#">GO TO...</a>
	stepTime	Measurement	Value	Unit	Measurement	Value	Unit	
Test-PLC Büro	Step 777	Measurement	Value	Unit	Measurement	Value	Unit	
	stepTime	Measurement	Value	Unit	Measurement	Value	Unit	

- Variablen Aktualisierungszeit ~ 1000 Millisekunden

# VPN - Monitoring

- Ping-Laufzeiten Teilnehmer untereinander im VPN bei 40 ... 150 Millisekunden



# VPN - Monitoring

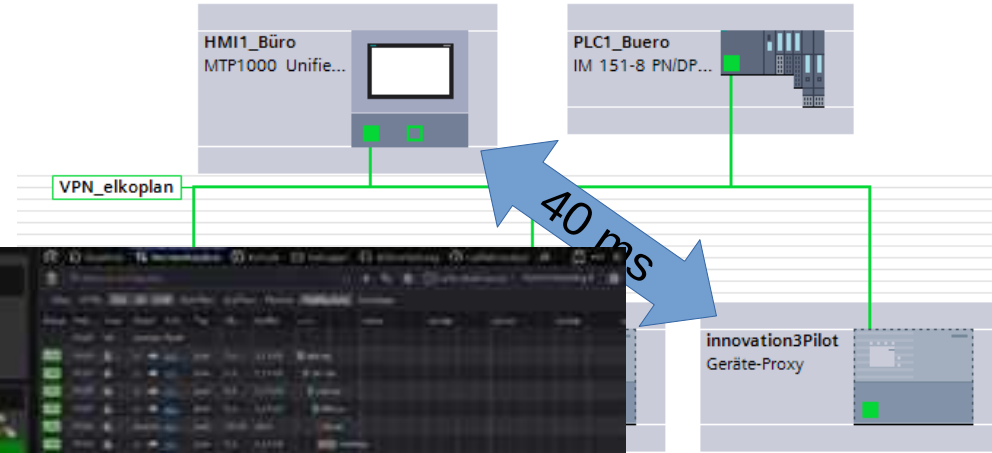
- Ping-Laufzeiten Teilnehmer untereinander im VPN bei 40 ... 150 Millisekunden
- Webvisualisierung TU Dresden ↔ VPN ↔ Browser typisch 600 Millisekunden





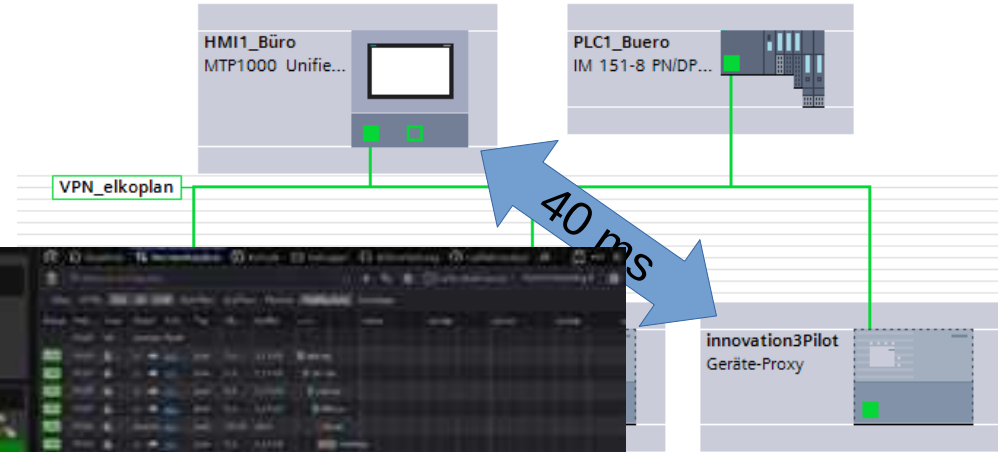
# VPN - Monitoring

- Ping-Laufzeiten Teilnehmer untereinander im VPN bei 40 ... 150 Millisekunden
- Webvisualisierung Nienburg ↔ VPN ↔ Browser typisch 3500 Millisekunden



























# VPN - Monitoring

- Ping-Laufzeiten Teilnehmer untereinander im VPN bei 40 ... 150 Millisekunden
- Webvisualisierung Nienburg ↔ VPN ↔ Browser typisch 3500 Millisekunden
- Webvisualisierung WiFi ↔ Browser direkt vor Ort ca. 500 - 1200 Millisekunden



- Überwachung der VPN-Clients als Teilnehmer im Netz über externen Anbieter des openVPN-Servers
- konfigurierbare Alarmierung (e-mail) bei „Ping-Verlust“ zu Teilnehmern
- Im Projektverlauf nur für Betrieb der Pilotanlage verwendet

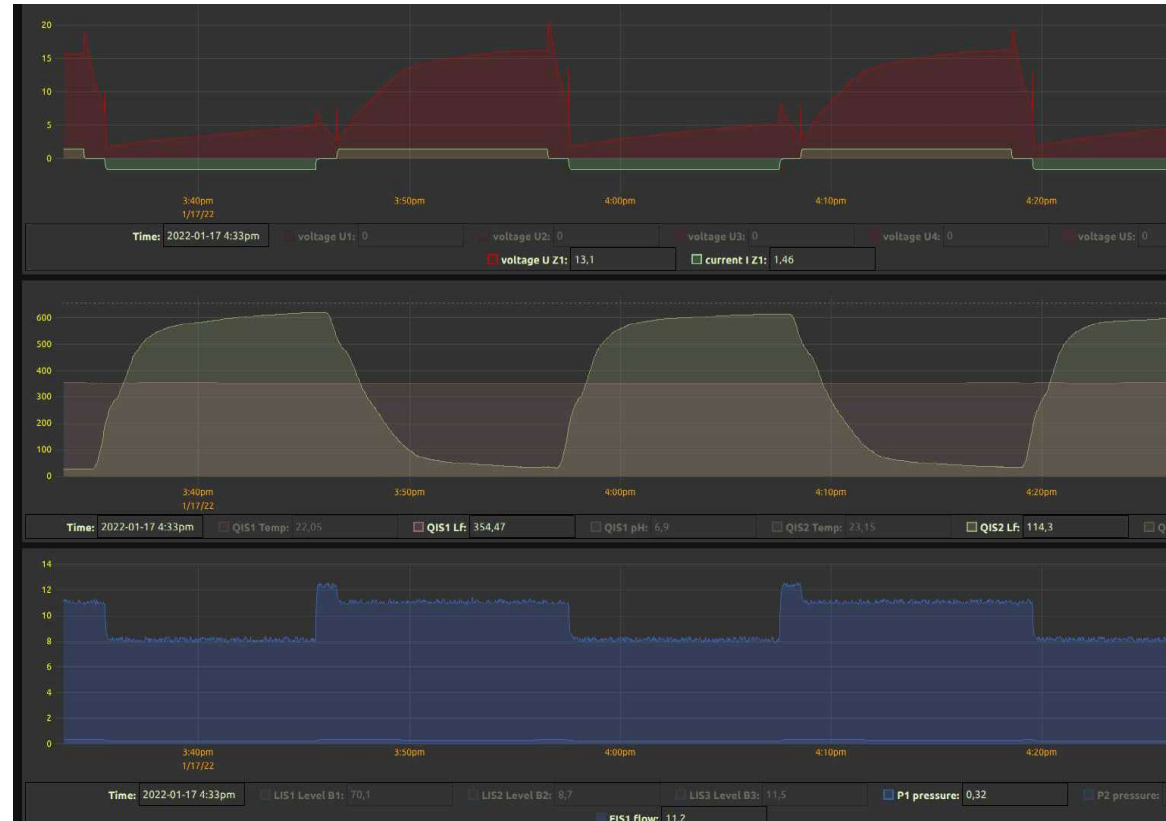
innovatION									
		RUT240_1101945848_Innovation1				 online	2023-12-22 08:04:59	10.18.77.1	
		RUT240_1102299324_Innovation2				 offline	2022-03-23 11:11:57	10.18.78.1	
		RUT240_1116307813_Innovation3				 offline	2023-12-22 10:13:07	10.18.79.1	
TU_Dresden									
		TUDresden4innovatION				 online	2023-12-22 13:20:22	10.18.76.1	

- Gesamtübersicht WebVisu Pilotanlage vor Benutzeranmeldung
- Bezeichnungen und Beschriftungen werden mit Login aktualisiert (String-Variablen in plc)
- einfachere Aktualisierung bei kleinen Änderungen  
→ Aktualwert einer Variablen statt Quellcode + Hochladen

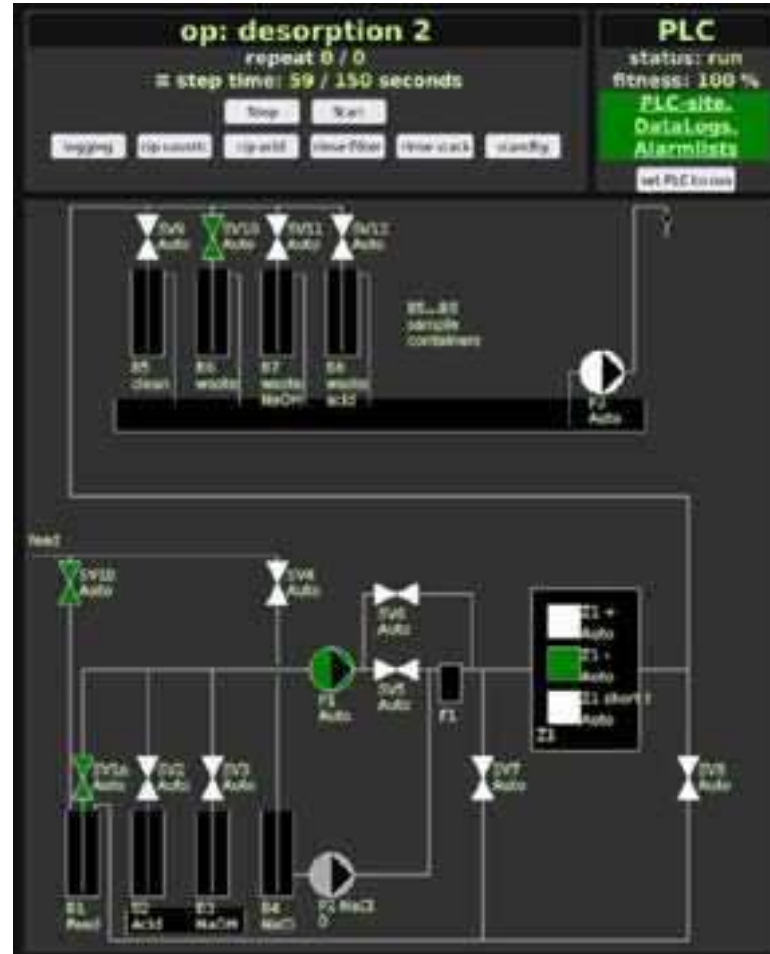




- Trends im unteren Bereich der WebVisu



- 16 Aktoren, 22 echte Messungen, 15 Prozessschritte
- ca. 5,3 KB zyklische Update-Daten für WebVisu (ca. 120 Variablen)
- Update-Daten für WebVisu im JSON-Format
- angefordert per Javascript via HTTP-Get im Webbrowser
- Fließbild über SVG-Elemente erzeugt
- insgesamt ca. 580 Variablen, ca. 250 Prozessmeldungen



- weitgehende Anpassbarkeit
  - typische Prozesswerte wie
    - Leitwerte
    - Differenzdrücke
    - Betriebsmengen
    - Betriebszeiten
    - Durchflussraten
- als Kriterien für Umschalt- und Reinigungsvorgänge
- basierend auf fortlaufend im Prozess ermittelten "max"-Werten  
→ adaptives Gesamtsystem

process settings	
± electrodes area in cm <sup>2</sup>	12000
datalogging in milliseconds	1000
start filling feed when level < %	40
stop filling feed when level > %	70
P2 dosing factor in % per l/h feedflow	0,4
P2 dosing minimum offset in %	22
target quality QIS2 in ms/cm	2
purifying, switch valves by	quality ▾
desorption, switch valves by	quality ▾
finish purifying by quality QIS2 >	0,9
finish purifying by steptime > τ <sub>±</sub> ×	3,5
finish purifying by % I(t)/I <sub>max</sub> <	50
finish purifying when flow sum liters purified water >	30
start CIP when ΔCond <sub>peak max</sub> - ΔCond <sub>peak(t)</sub> >	50
start CIP when Δp <sub>±</sub> >	1
start CIP when % flow(t)/flow <sub>max</sub> <	60
start CIP when flow sum liters purified water >	999999000000
start CIP when hours since last CIP >	8760

- ergänzende Kriterien für MCDI

- Differenzleitwert
- Verhältnis Stromstärke  
  aktuell / maximal
- ermitteln der elektrischen  
  Kapazität über Zeitkonstante  $\tau$

$$\tau = R \cdot C \qquad C = \frac{\tau}{R}$$

Adressieren von Einlagerungen /  
Scaling innerhalb der Elektroden

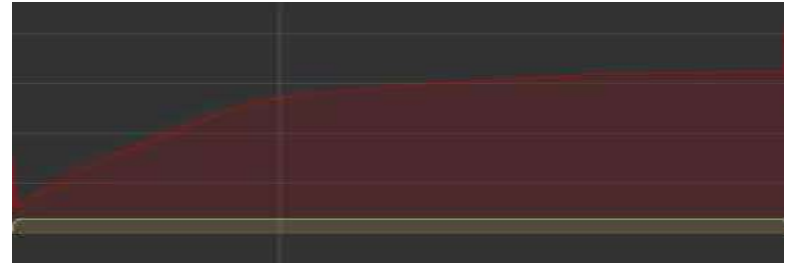
- basierend auf fortlaufend  
im Prozess ermittelten  
„max“- und „peak“-Werten  
→ adaptives Gesamtsystem

process settings	
± electrodes area in cm <sup>2</sup>	12000
datalogging in milliseconds	1000
start filling feed when level < %	40
stop filling feed when level > %	70
P2 dosing factor in % per l/h feedflow	0,4
P2 dosing minimum offset in %	22
target quality QIS2 in ms/cm	2
purifying, switch valves by	quality ▾
desorption, switch valves by	quality ▾
finish purifying by quality QIS2 >	0,9
finish purifying by steptime > $\tau_{\pm} \times$	3,5
finish purifying by % I(t)/I <sub>max</sub> <	50
finish purifying when flow sum liters purified water >	30
start CIP when $\Delta\text{Cond}_{\text{peak max}} - \Delta\text{Cond}_{\text{peak}(t)} >$	50
start CIP when $\Delta p_{\pm} >$	1
start CIP when % flow(t)/flow <sub>max</sub> <	60
start CIP when flow sum liters purified water >	9999989000000
start CIP when hours since last CIP >	8760

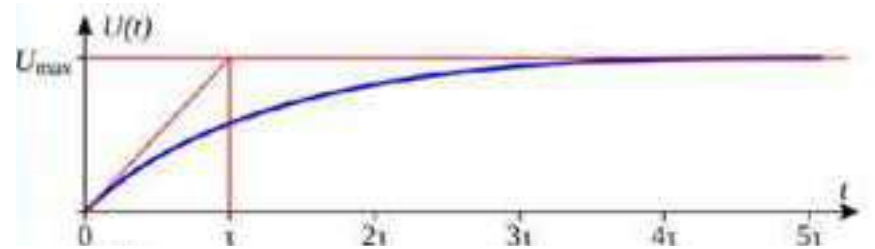


# Kondensatorkonstante $\tau$

- Screenshot WebVisu U(t)



- Kondensatorladekurve (Quelle: Wikipedia)



- Formel für Ladevorgang eines Kondensators:  $u_c(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$        $u_c(\tau) = U_0 \cdot 0,632 \dots$

- Umformung nach  $\tau$ :  
 $U_c(t)$  während „estimate capacity“ ermittelt

$$\tau = \frac{t}{\ln(1) - \ln(1 - \frac{U_c(t)}{U_0})}$$

- automatische Adaption der Betriebsparameter an sich ändernde technische Eigenschaften der MCDI

finish purifying by steptime >  $\tau_{\neq} \times 3,5$

# Prozessschritte

- sequenzielle Abläufe: startup, op, cip

sequence settings			
stepname	step time (seconds)	additional settings	
startup: circulation filter	120	P1 (%) 6	
startup: circulation stack	120	P1 (%) 6	
pre-op: estimate capacity	0	P1 (%) 7,2	
op: purifying	500	P1 (%) 6	
		U (V) 5	
op: desorption 1	0	I (A) 15	
		P1 (%) 0	
op: desorption 2	500	P1 (%) 6	
		U (V) 5	
op: desorption 3	0	I (A) 15	
		P1 (%) 6	
op: first dosing caustic	30	P1 (%) 0	
op: rinse caustic	20	P1 (%) 9	
op: reaction time caustic	60	P1 (%) 0	number of repeats rinse -> reaction 0
CIP: final rinse feed after caustic	70	P1 (%) 5	
op: first dosing acid	30	P1 (%) 6	
op: rinse acid	10	P1 (%) 6	
op: reaction time acid	40	P1 (%) 0	number of repeats rinse -> reaction 0
op: final rinse feed after acid	70	P1 (%) 0	

signal I(t)	periode t (seconds)	duty cycle (0.001 .. 0.999)	phase shift (0.0 .. 179.9)
continuous ▾	120	0.5	179.9
continuous ▾	120	0.5	0
continuous ▾	120	0.5	0
continuous ▾	120	0.5	179.9
continuous ▾	120	0.5	0
continuous ▾	120	0.5	0

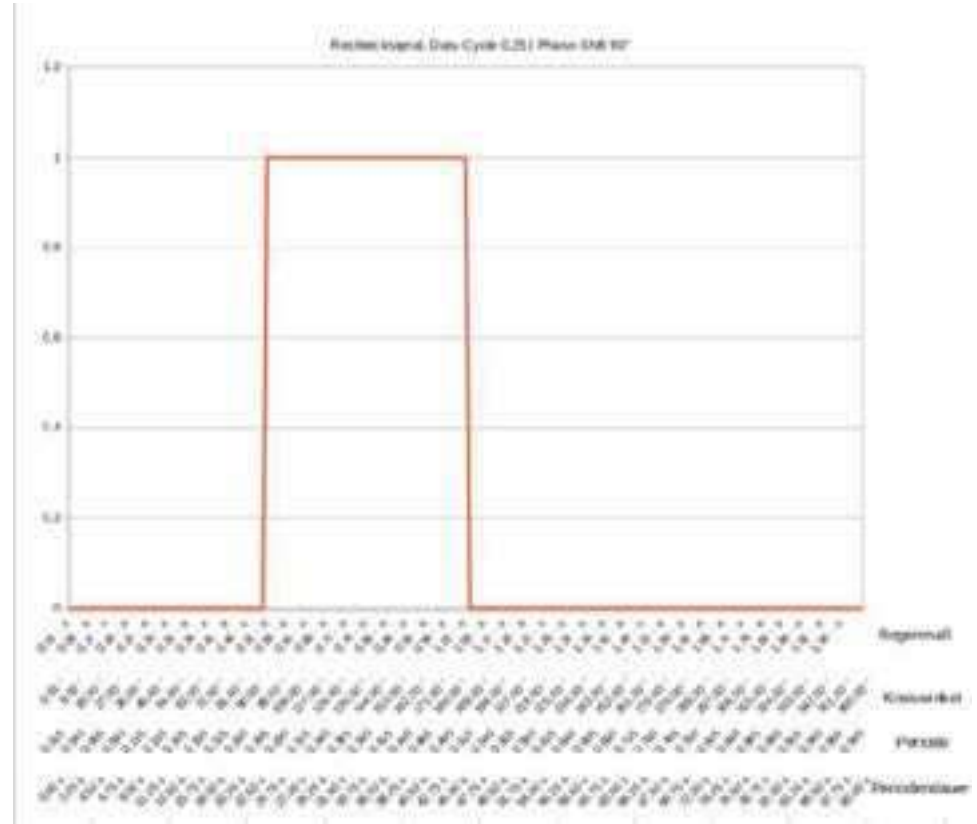
# Sollwertführung U, I, P1

- Beweglichkeit von gelösten Ionen in elektrischen Feldern abhängig von deren Größe und elektrischer Feldstärke
- Erweiterte Sollwertführung in „purifying / desorption“ für
  - Pumpendrehzahl
  - Strombegrenzung
  - Spannungssollwert
- Zeitfunktionen
  - kontinuierlich
  - Rechteck
  - Dreieck
  - $\text{Cos}^2$  → „sanftere mechanische Beschleunigung“
- Zeitfunktionen der Sollwertführung unabhängig von „Schrittzeiten“
- aktueller Sollwert ist mathematisch Multiplikation des „Eingabewertes“ mit gewählter Zeitfunktion  $f(t)$

$\text{H}^+$	$36,23 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{2}$	$\text{OH}^-$	$20,64 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{2}$
$\text{Li}^+$	$4,01 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{2}$	$\text{Cl}^-$	$7,92 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{2}$
$\text{K}^+$	$7,62 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{2}$	$\text{Br}^-$	$8,09 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{2}$
$\text{Zn}^{2+}$	$5,47 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{2}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$8,29 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{2}$

# Sollwertführung U, I, P1

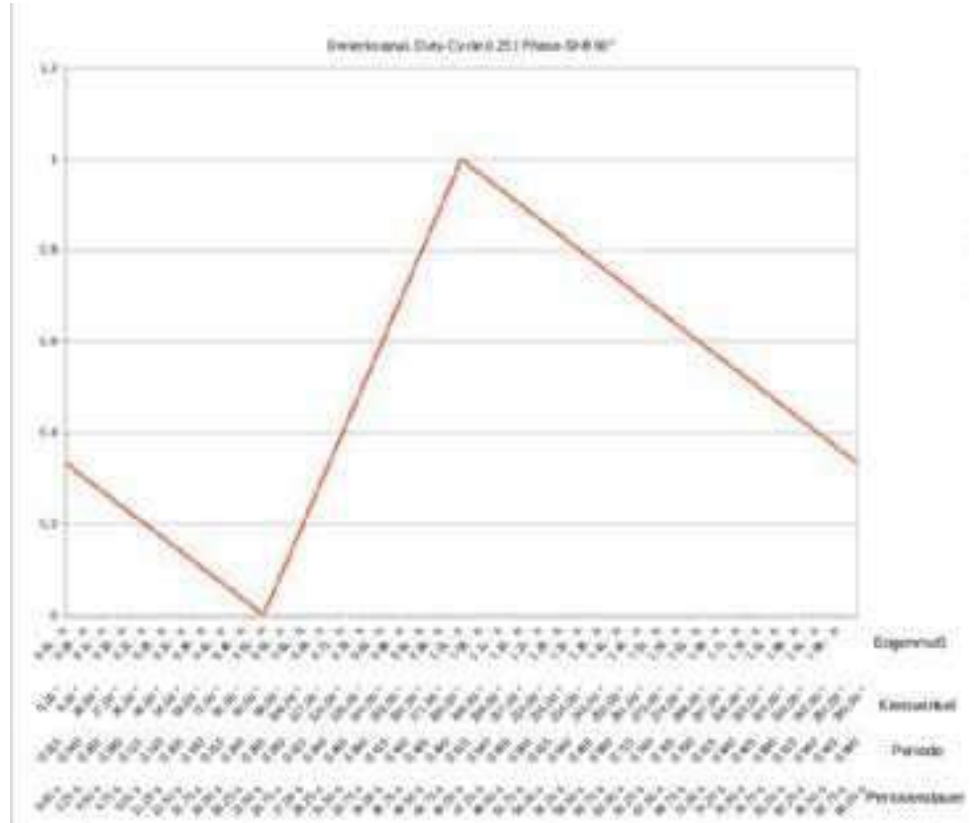
- Zeitfunktion Rechtecksignal
  - 25% Duty-Cycle
  - Phase-shift 90°





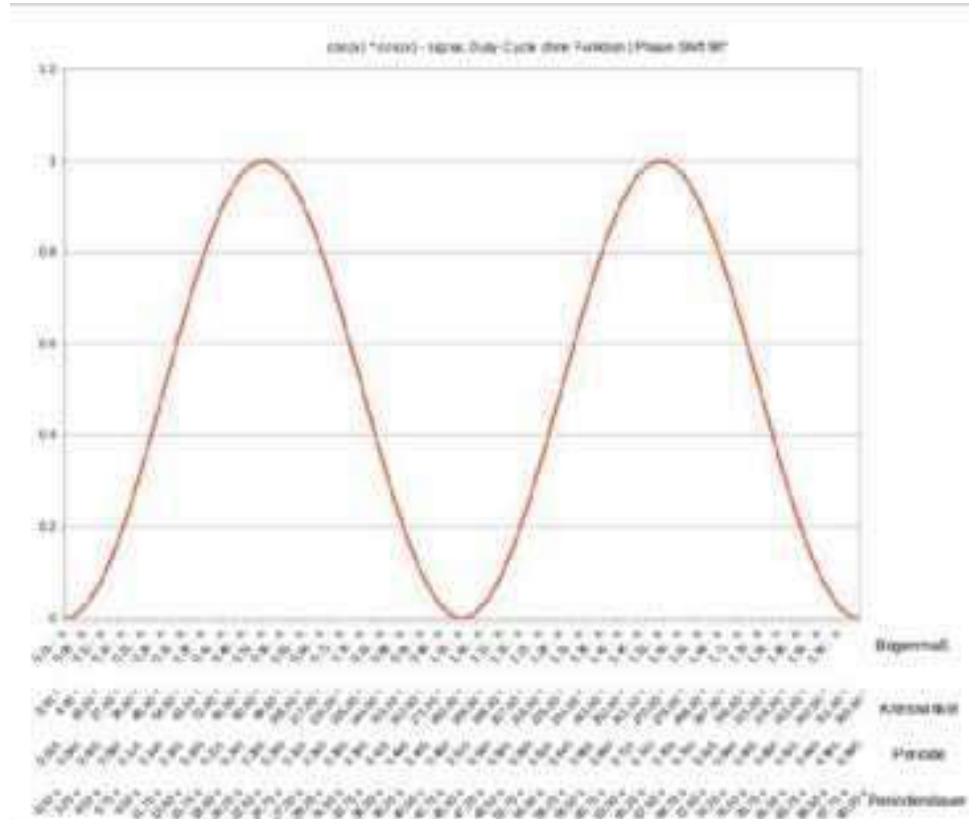
# Sollwertführung U, I, P1

- Zeitfunktion Dreiecksignal
  - 25% Duty-Cycle
  - Phase-shift 90°



# Sollwertführung U, I, P1

- Zeitfunktion  $[\cos(t)]^2$ 
  - Duty-Cycle ohne Funktion
  - Phase-shift  $90^\circ$



- Kombinationsmöglichkeiten extrem groß
- Abstimmung zwischen
  - Ionenbeweglichkeit der Ziel-Ionen
  - mechanischem Aufbau der MCDI
  - gewählten elektrischen Parametern

H <sup>+</sup> 36,23 · 10 <sup>-4</sup>	$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} \cdot \frac{1}{\tau_1}$	OH <sup>-</sup> 20,64 · 10 <sup>-4</sup>	$\frac{1}{\tau}$
Li <sup>+</sup> 4,01 · 10 <sup>-4</sup>	$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} \cdot \frac{1}{\tau_1}$	Cl <sup>-</sup> 7,92 · 10 <sup>-4</sup>	$\frac{1}{\tau}$
K <sup>+</sup> 7,62 · 10 <sup>-4</sup>	$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} \cdot \frac{1}{\tau_1}$	Br <sup>-</sup> 8,09 · 10 <sup>-4</sup>	$\frac{1}{\tau}$
Zn <sup>2+</sup> 5,47 · 10 <sup>-4</sup>	$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} \cdot \frac{1}{\tau_1}$	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 8,29 · 10 <sup>-4</sup>	$\frac{1}{\tau}$

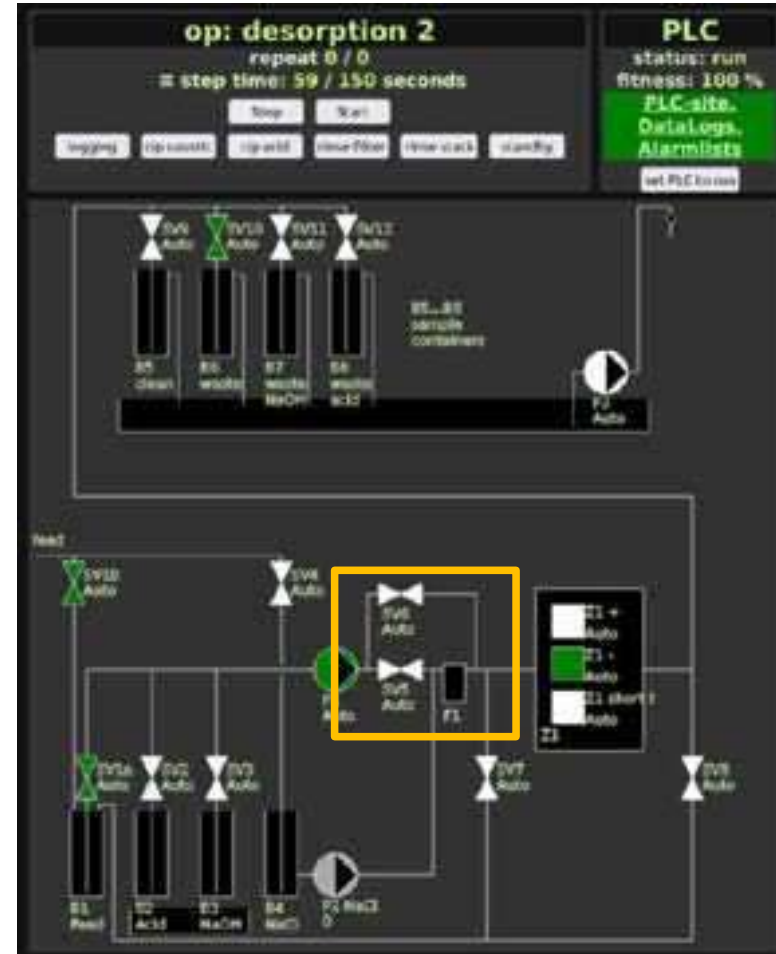
- bisherige Versuche ergaben noch keine Vorteile bei „Selektivität“

→ Thema für weitere Forschungsarbeiten, erweiterte Simulationen und Modellierung, Zeiten für 500µm @ 0,6V ca. 1,1...10s ?

sequence settings						
step time (seconds)	additional settings	signal f(t)	periode t (seconds)	duty cycle (0.001 .. 0.999)	phase shift (0.0 .. 179.9)	
120	P1 (%) 15					
20	P1 (%) 15					
20	P1 (%) 15					
	P1 (%) 20	rectangle ▾	50	0,5	0	
600	U (V) 8	rectangle ▾	50	0,5	0	
	I (A) 5	continuous ▾	90	0,5	0	
60	P1 (%) 2					
	P1 (%) 10	continuous ▾	50	0,5	0	
300	U (V) 8	continuous ▾	50	0,5	0	
	I (A) 5	continuous ▾	90	0,5	0	
60	P1 (%) 20					
30	P1 (%) 15					
10	P1 (%) 15					
20	P1 (%) 15	number of repeats rise -> reaction				20
120	P1 (%) 15					
60	P1 (%) 15					
10	P1 (%) 15					
30	P1 (%) 15	number of repeats rise -> reaction				20
120	P1 (%) 15					

# optimierte CIP

- CIP-Vorgänge bei Laboranlage zeigten lange Zeiten bis pH-Neutralität
- automatisierter Bypass um Vorfilter für Pilotanlage

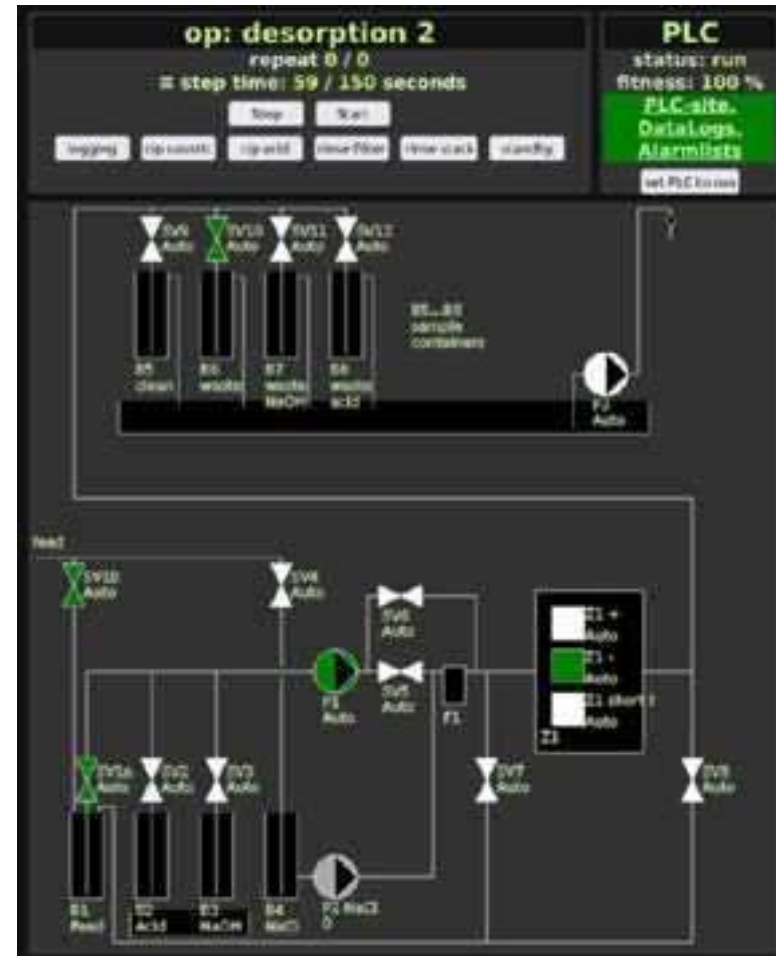




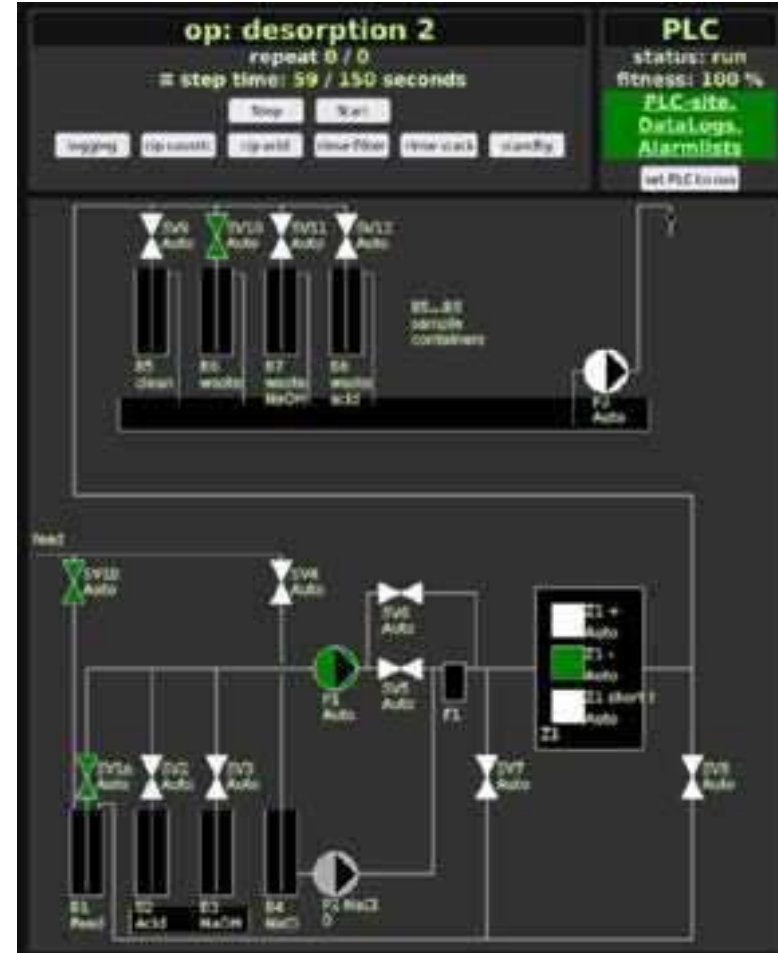
- CIP-Vorgänge bei Laboranlage zeigten lange Zeiten bis pH-Neutralität
  - automatisierter Bypass um Vorfilter für Pilotanlage
  - optimierte Chemische Reinigungen (CIP) „acid“ & „caustic“ in Ablaufsequenz
    - einspülen „first dosing“ (30s)
    - weiterspülen „rinse“ (10s)
    - einwirken „reaction“ (30s)
    - wiederholen „rinse“ → „reaction“
    - Ausspülen „final rinse“ (120s)
- verbesserte Ausnutzung, längere Kontaktzeit
- Reduktion unverbrauchter Reiniger
- Ressourcenschonung, übertragbar auf andere Verfahren

sequence settings						
step time (seconds)	additional settings	signal f(t)	periode t (seconds)	duty cycle (0.001 .. 0.999)	phase shift (0.0 .. 179.9)	
120	P1 (%) 15					
20	P1 (%) 15					
20	P1 (%) 15					
	P1 (%) 20	rectangle ▾	50	0.5	0	
600	U (V) 8	rectangle ▾	50	0.5	0	
	I (A) 5	continuous ▾	90	0.5	0	
60	P1 (%) 2					
	P1 (%) 10	continuous ▾	50	0.5	0	
300	U (V) 8	continuous ▾	50	0.5	0	
	I (A) 5	continuous ▾	90	0.5	0	
60	P1 (%) 20					
30	P1 (%) 15					
10	P1 (%) 15					
20	P1 (%) 15	number of repeats rinse -> reaction				20
120	P1 (%) 15					
60	P1 (%) 15					
10	P1 (%) 15					
30	P1 (%) 15	number of repeats rinse -> reaction				20
120	P1 (%) 15					

- steigende Komplexität der Systeme und Fachkräftemangel erschweren generell Einarbeitung von Servicepersonal
- Kostendruck zwingt zu optimierten Servicekonzepten
  - nicht „auf Verdacht“ x-jährlich austauschen
  - an tatsächlichem Zustand orientiert
  - Zustand „von außen“ sichtbar ?
- Abbildung des Gesamtzustandes der Anlagentechnik über „fitness“ als „Surrogat-Parameter“



- Erfassen relevanter Größen/Ereignisse
  - direkt vor Ort mit vorhandener Technik
  - möglichst keine zusätzlichen Geräte (Kosten, Komplexität,...)
- Relevante Größen
  - Einbauzeit im Vergleich zu MTBF (MTBF = 63,2% Ausfall!)
  - Anzahl Schaltspiele (Relais, Schütze, Füllstandsgeber)
  - echte Laufzeit (Kugellager)
  - Häufigkeit von Fehlern (Überlast Messbereichsfehler)
- Ermittlung der „relevanten Größen/Ereignisse“ für jeden Aktor, Sensor sowohl auf Prozess- als auch auf Ansteuerungsseite



- Datenstruktur → 30 Variablen (wird je Aktor / Sensor 2x verwendet)
- Berechnung der „zeitbasierten Funktionswahrscheinlichkeit“ über MTBF und Zeit

$$p_{function}(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}}$$

- weitere „Faktoren“ entsprechend berechnet für Schaltspiele, Laufzeit, Fehleranzahl

$$p_{switching} = e^{-\frac{switchActual}{switchLimit}} \quad p_{runtime} = e^{-\frac{runtimeActual}{runtimeLimit}} \quad p_{errors} = e^{-\frac{errorsActual}{errorsLimit}}$$

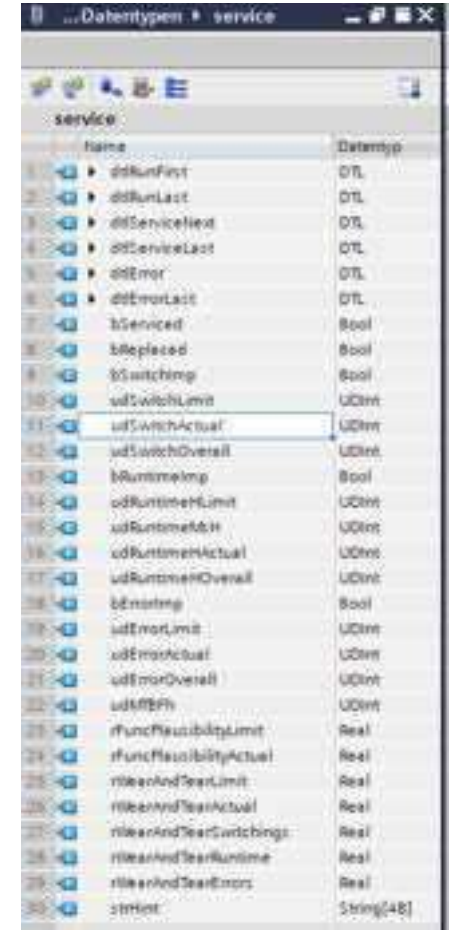
- Ermittlung der Gesamtfunktionswahrscheinlichkeit aus Einzelfaktoren

$$P_{wear\ and\ tear\ actual} = p_{function} \cdot p_{switching} \cdot p_{runtime} \cdot p_{errors}$$

- Gefahr der „doppelten Bilanzierung“ von z.B. „Schaltvorgängen“, wenn MTBF (Herstellerangabe) bereits „typische Nutzung“ berücksichtigt.

→

Lösung über Programmierung und Parametrierung:  
bei Eingabe „0“ für „Limit“ wird der jeweilige Einzelfaktor auf „1“ gesetzt  
(Division durch „0“ wird nebenbei auch vermieden)



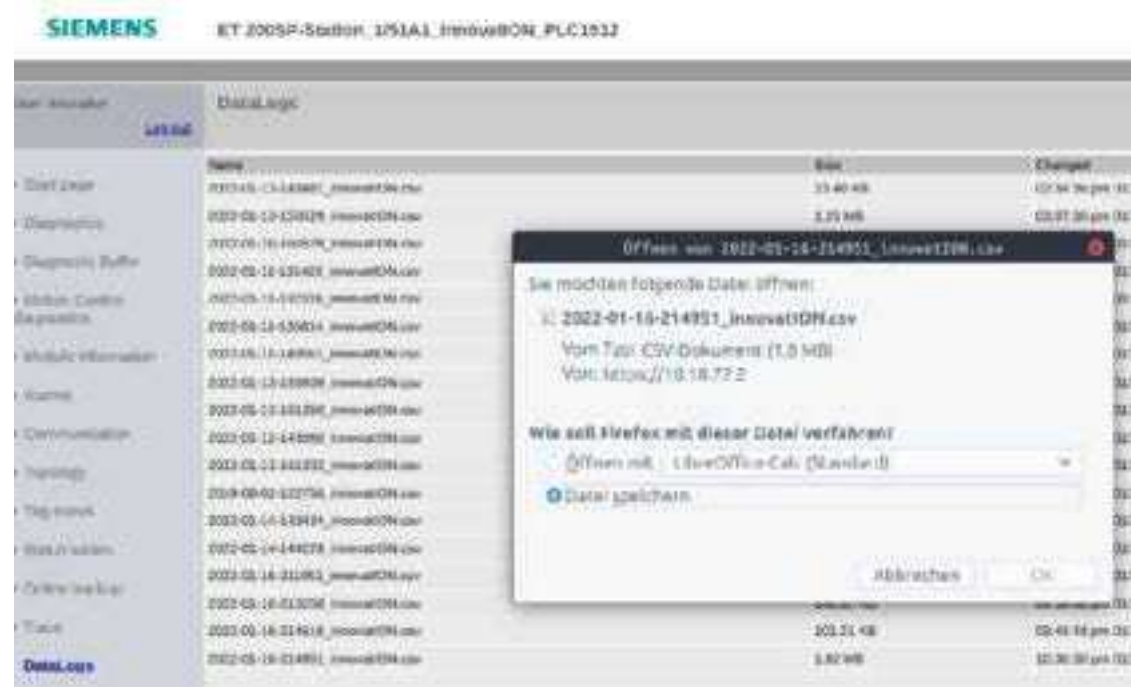
name	Datentyp
dtRunFast	DTL
dtRunLast	DTL
dtServiceIend	DTL
dtServiceLast	DTL
dtError	DTL
dtErrorLast	DTL
bServiced	Bool
bReplaced	Bool
bSwitchImp	Bool
ulSwitchLimit	UDInt
ulSwitchActual	UDInt
ulSwitchOverall	UDInt
bRuntimeImp	Bool
udRuntimeLimit	UDInt
udRuntimeIend	UDInt
udRuntimeIActual	UDInt
udRuntimeOverall	UDInt
bErrorImp	Bool
ulErrorLimit	UDInt
ulErrorActual	UDInt
ulErrorOverall	UDInt
ulMTBF	UDInt
rFuncFlexibilityLimit	Real
rFuncFlexibilityActual	Real
rWearAndTearLimit	Real
rWearAndTearActual	Real
rWearAndTearSwitching	Real
rWearAndTearRuntime	Real
rWearAndTearErrors	Real
strInst	String[48]

- programmseitige Kapselung für Berechnung der Funktionswahrscheinlichkeit in einer Funktion (ca. 100 Zeilen)
- Aufruf dieser Funktion erfolgt innerhalb der Unterprogramme für Aktoren/Sensoren (je Aktor/Sensor wiederum 2x)
- Programmschleife über Datenstrukturen der Aktoren/Sensoren berechnet final die „Gesamtfitness“ der Anlage als „Surrogatparameter“

```
73 //overall fitness
74 #rTemp := 1.0;
75 FOR #uiTemp := 1 TO 20 DO
76     #rTemp := #rTemp * "hmi".actorData[#uiTemp].infoChannel.rFuncPlausibilityActual
77             * "hmi".actorData[#uiTemp].infoExtComponent.rFuncPlausibilityActual;
78 END_FOR;
79 FOR #uiTemp := 1 TO 20 DO
80     #rTemp := "hmi".analogMeasuresData[#uiTemp].infoChannel.rFuncPlausibilityActual
81             * "hmi".analogMeasuresData[#uiTemp].infoExtComponent.rFuncPlausibilityActual;
82 END_FOR;
83 //fitness in (max 100.00) %, rounded to 0.05
84 "hmi".Diag.fitness := ROUND(2000.0 * #rTemp) * 0.05;
85 //Round(100.0 * rTemp / 0.05)=ROUND(2000.0 * #rTemp )
86
```



- kein klassisches „HMI“ zur Protokollierung der Daten vor Ort
- regelmäßige Unterbrechungen (Mobil) erzwingen eine Zwischenspeicherung „on the edge“
- Speicherkarte der „plc“ wird verwendet, Datenformat klassisch csv
- geringer Zeitversatz (250  $\mu$ s) zwischen Speicherung und Messwertbildung
- Kapazität (32 GByte), Datenpunkte und Logging-Intervalle (1000ms) erzwingen eine „Abholung“ der Daten nach ca. 20 Tagen
- Auswertung offline, Kontext zu Laboranalysen von Wasserproben muss händisch hergestellt werden



# Danke !

**Fakultät Umweltwissenschaften**, Fachrichtung Hydrowissenschaften  
Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, Professur für Verfahrenstechnik in Hydrosystemen

# Entsalzung mit der monovalenten Membrangestützten Kapazitive Deionisation (mMCDI)

**Hanna Rosentreter, David Schödel** und André Lerch

05.09.2024

Einfluss der monovalent  
selektiven  
Ionenaustauschermembranen

Einfluss Prozessparameter, wie  
elektrische Spannung, Durchfluss,  
Zulaufqualität

## Entsalzung mit der monovalenten MCDI

Wie hoch ist die Selektivität und  
der Energieverbrauch ?

Wie wirken sich weitere Prozess-  
und Materialänderungen aus?  
→ Modellierung

Effizienter als konventionelle  
Verfahren?

# Saline Grundwässer



Nitratintrusion in den Grundwasserleiter bei Nienburg



Natürliche Meerwasserintrusion an der Küste auf Langeoog

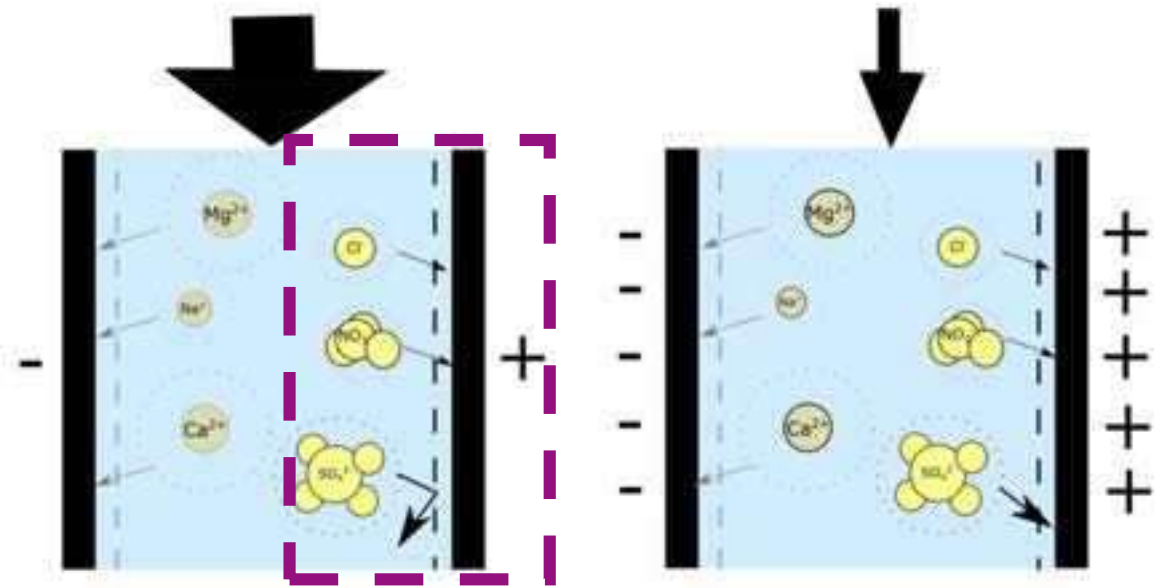
	Trinkwasser	Bewässerung	Nienburg, GW	Langeoog, GW
	TrinkwV, 2023; WHO, 2011	Ayers and Westcot, 1985	2014-2020, KWN	2021-2022, TUD-VTH
<b>TDS [mg/l]</b>	600	450	308	1279
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> [mg/l]</b>	50	130	<b>80</b>	<1
<b>Cl<sup>-</sup> [mg/l]</b>	250	106	45	<b>625</b>
<b>Na<sup>+</sup> [mg/l]</b>	200	69	23	<b>315</b>



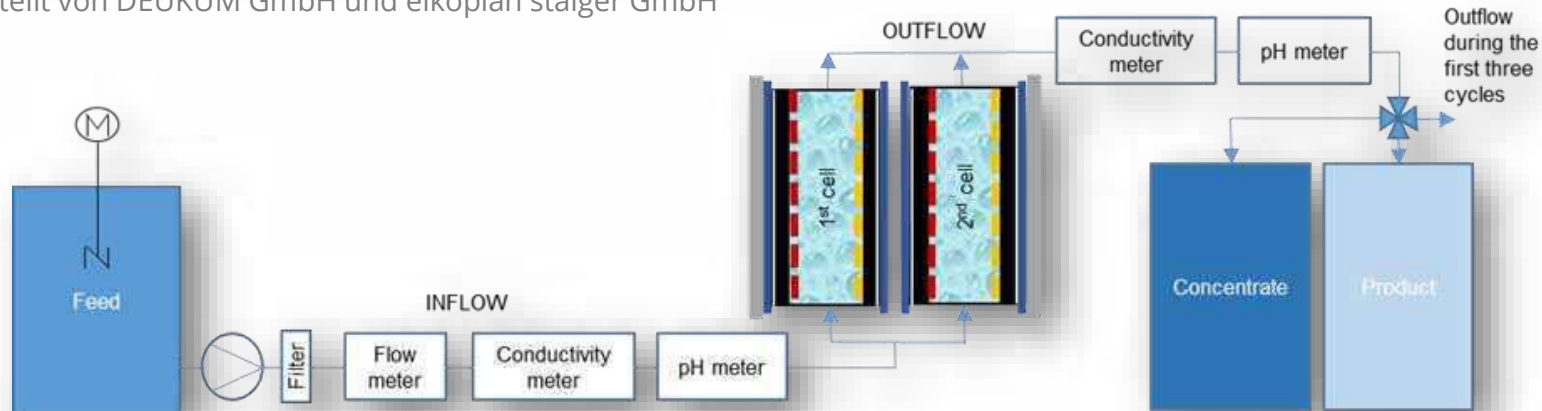
# Laborversuche



Anlage im Labormaßstab für Entsalzungsversuche.  
Erstellt von DEUKUM GmbH und elkoplan staiger GmbH



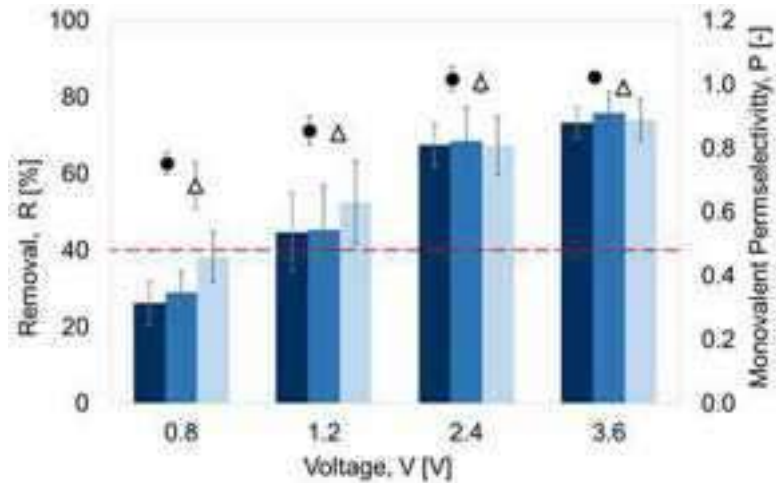
Höhere Selektivität für Anionen bei geringer elektrischer Spannung und höherem Durchfluss



Vereinfachtes R&I Schema für Laborborversuche zur Evaluierung der selektiven Entsalzungsleistung und Energieeffizienz



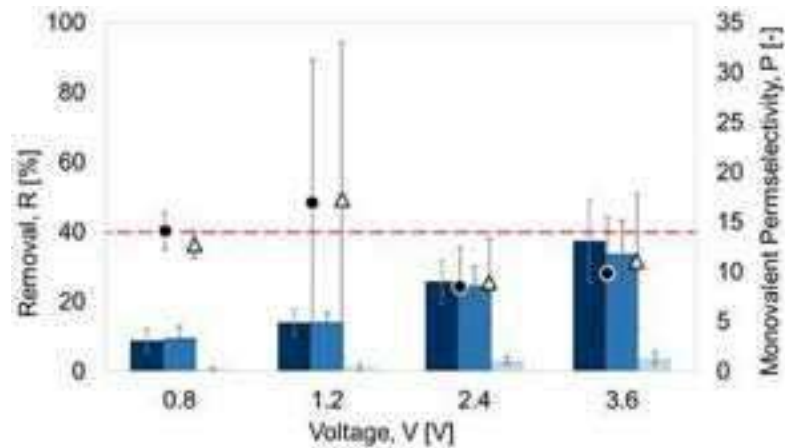
# Laborversuche selektive Nitratentfernung



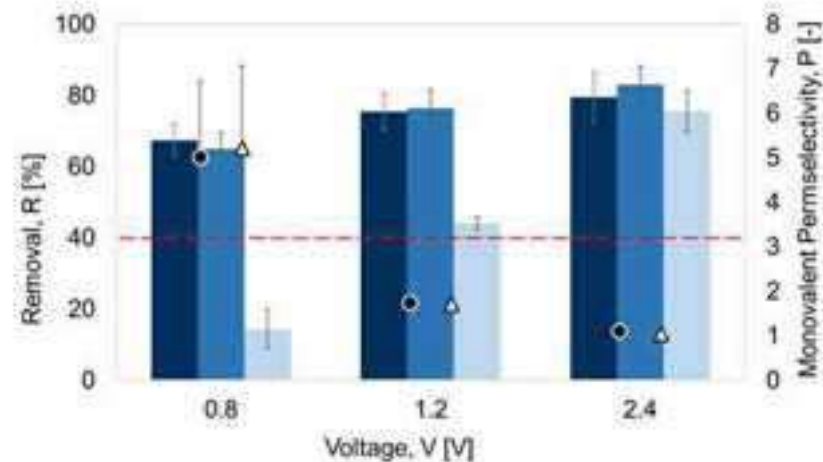
Entsatzungsleistung mit einer konventionellen MCDI

- R (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)
- R (Cl<sup>-</sup>)
- R (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)
- needed nitrate removal
- P (Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)
- Δ P (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

[Masterarbeit Maja Moch, 2024, modifiziert]



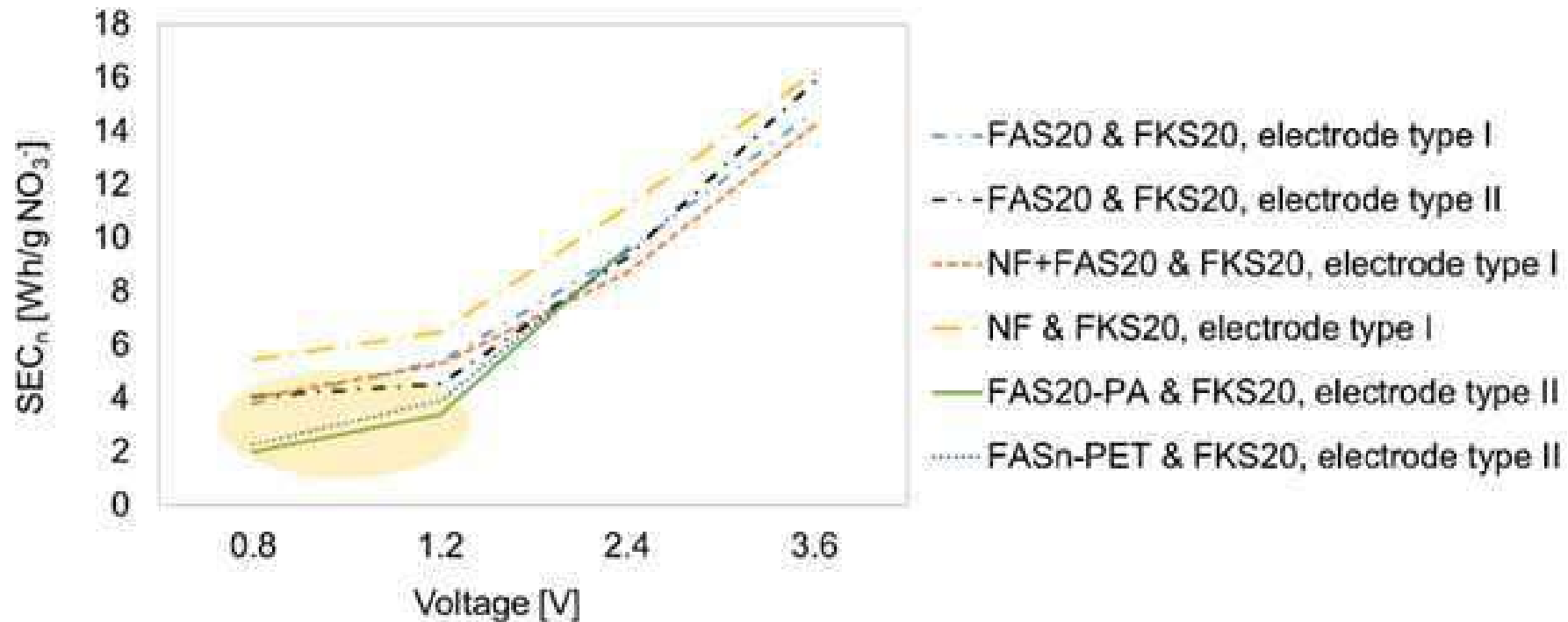
Entsatzungsleistung mit einer Nanofiltrationsmembran auf der Anode



Entsatzungsleistung mit einer selektiven Anionenaustauschermembran auf der Anode

# Laborversuche selektive Nitratentfernung

[Masterarbeit Maja Moch,  
2024, modifiziert]



Vergleich der Energieeffizienz für verschiedene Membranen und Elektrodentypen

# Praxisversuche

- Durchfluss von 10-100 L/h
- Geringere Selektivität als in Laborversuchen durch materialbedingte Schwierigkeiten bei der Aufskalierung (bei Membranen und Elektroden)
- Calciumcarbonat und -hydroxidscaling an der Kathode verringern irreversibel die Salzadsorptionskapazität
- Sehr stabile Entsalzungsleistung
- Effiziente Reinigungsleistung mit Salzsäure und Natronlauge (1-4 mal im Monat)



Scaling auf der Kathode



Pilotanlage im Wasserwerk auf Langeoog beim OOWV



Scaling auf der Kathode



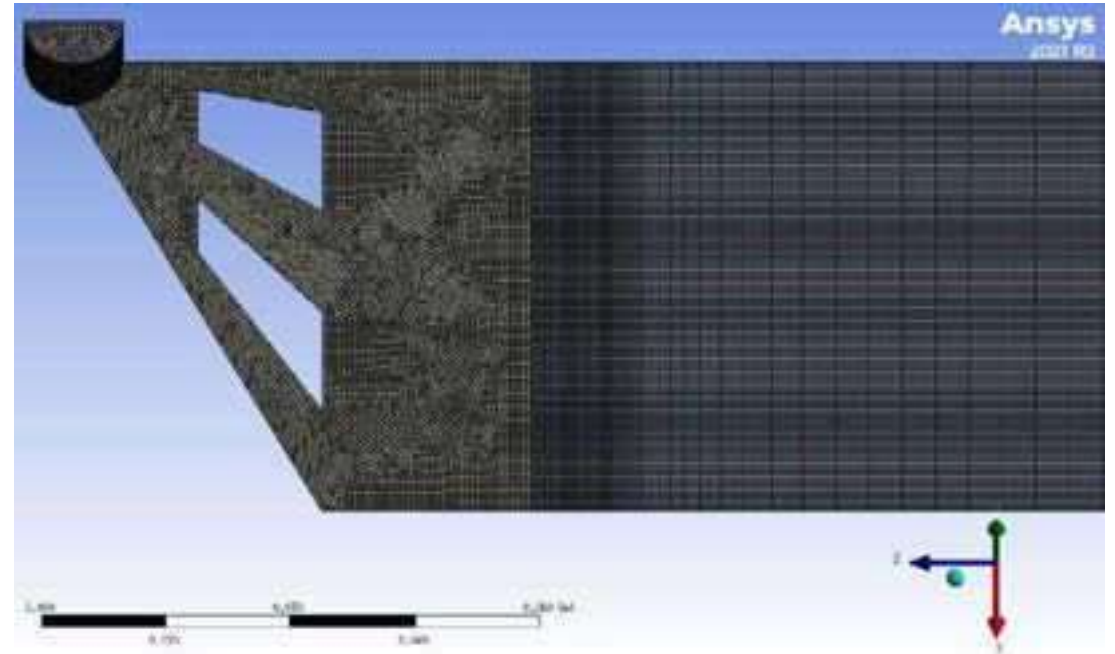
Aufbau der Pilotanlage am Brunnen beim Kreisverband für Wasserwirtschaft in Nienburg



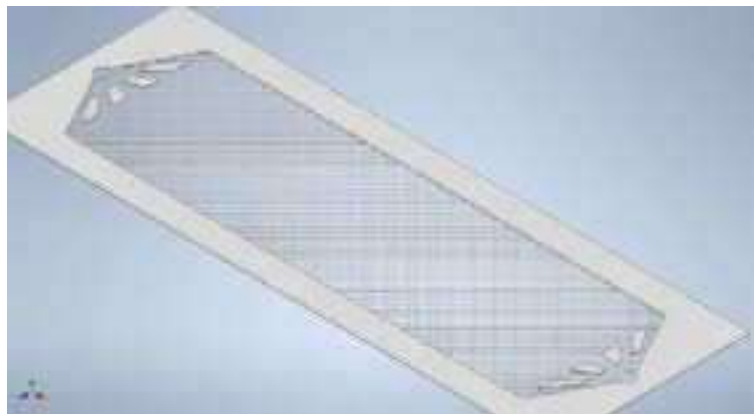
# Modellierung

## Strömungsmodellierung

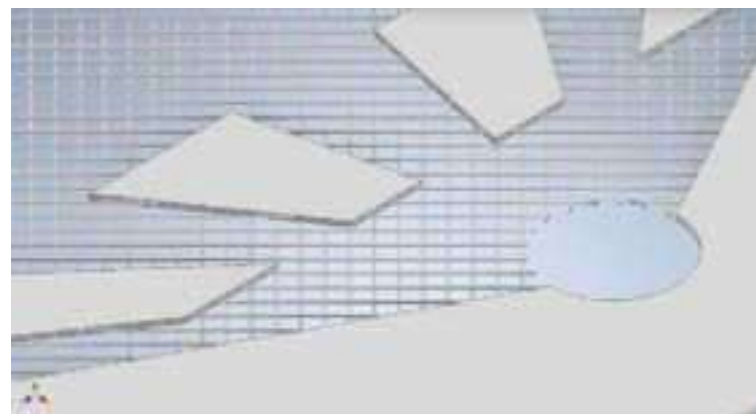
- Optimierung der Geometrie zur Reduzierung des Druckverlustes
- Beurteilung der Strömungsverteilung



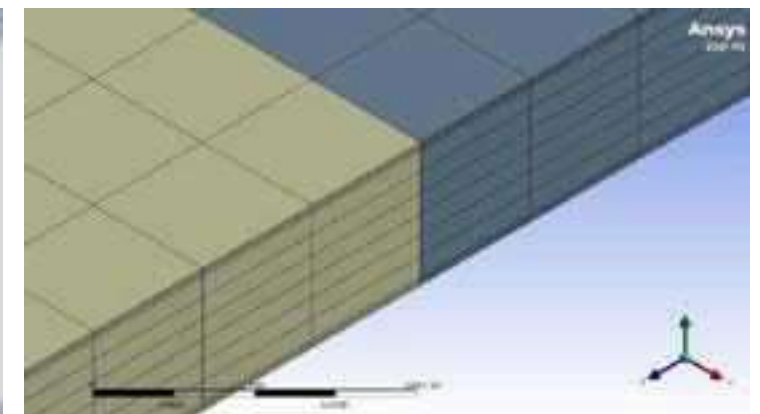
Rechennetz mit größeren Elementen im mittleren Bereich



Fließkanal mit Spacer



Ein-/ Auslaufbereich mit Spacer



Rechennetz mit Inflation Layer

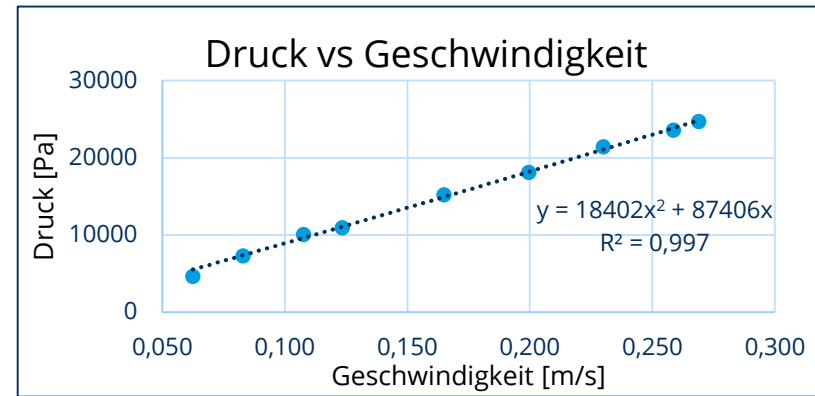


# Modellierung

## Strömungsmodellierung



Transparente Testzelle



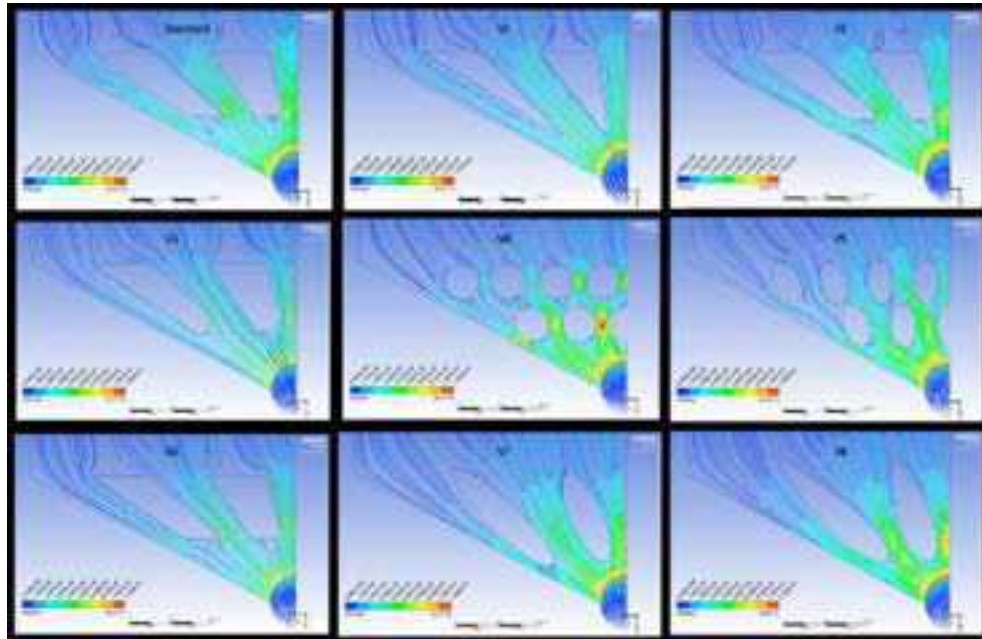
Geschwindigkeit - Druck Diagramm zur Ermittlung der Widerstandbeiwerte (Islam, 2022)



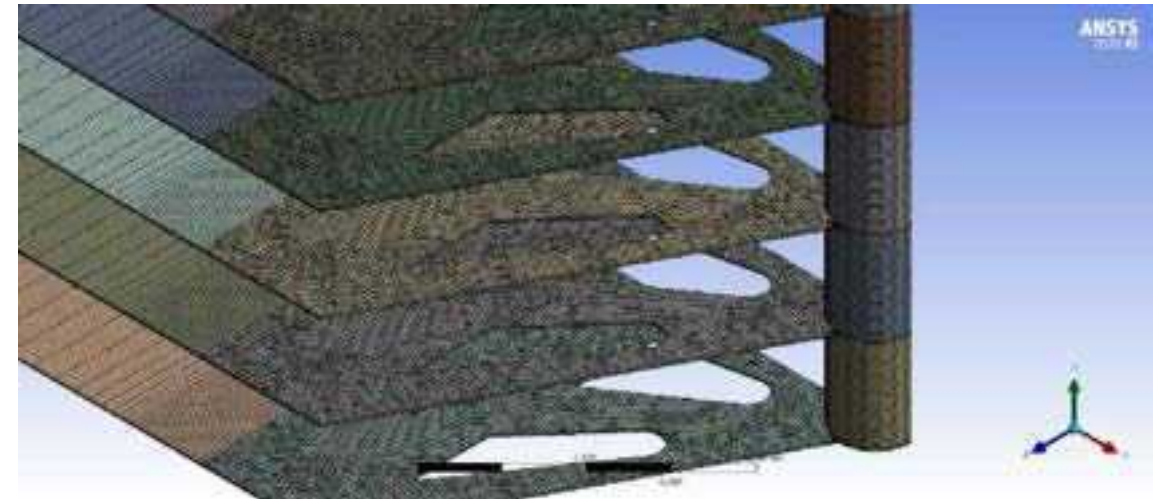
Tracer (v. l. n. r.): Uranin, Uranin+UV, Tine (Oben), Rhodamin B, Rhodamin B+UV, Tine (Unten)

# Modellierung

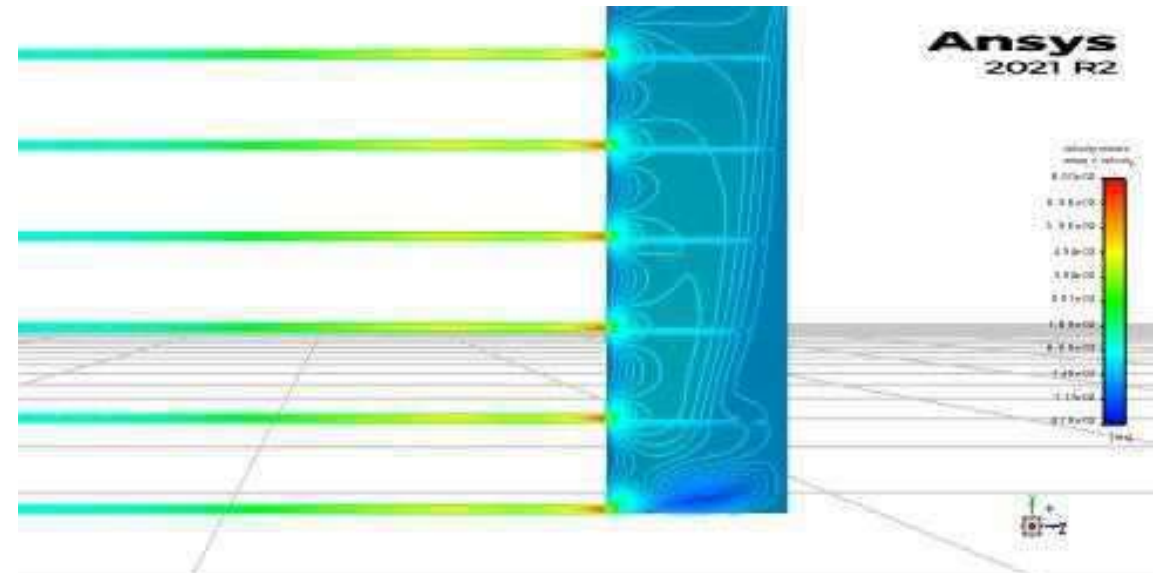
## Strömungsmodellierung



Stromlinien des Standard Diffusors und der verschiedenen Geometrien



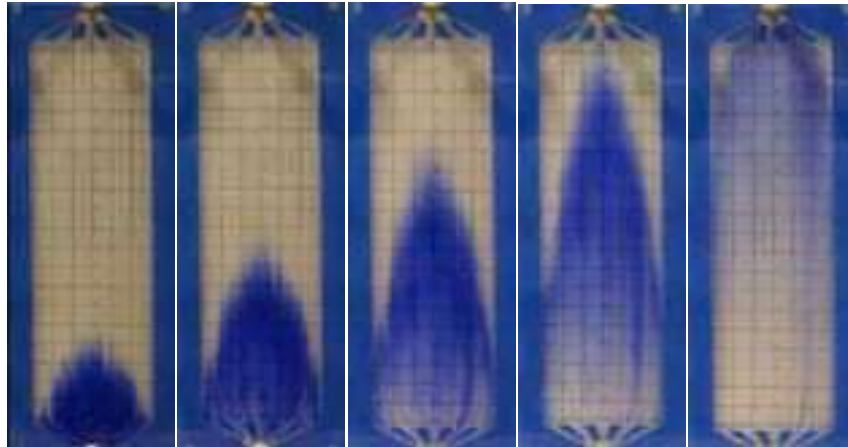
Rechenetz im Stack aus mehreren Zellen



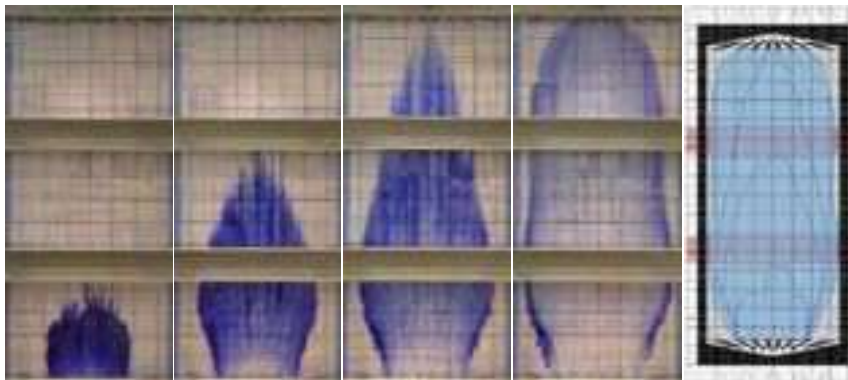
Geschwindigkeit in Fließrichtung entlang der Symmetrieebene

# Modellierung

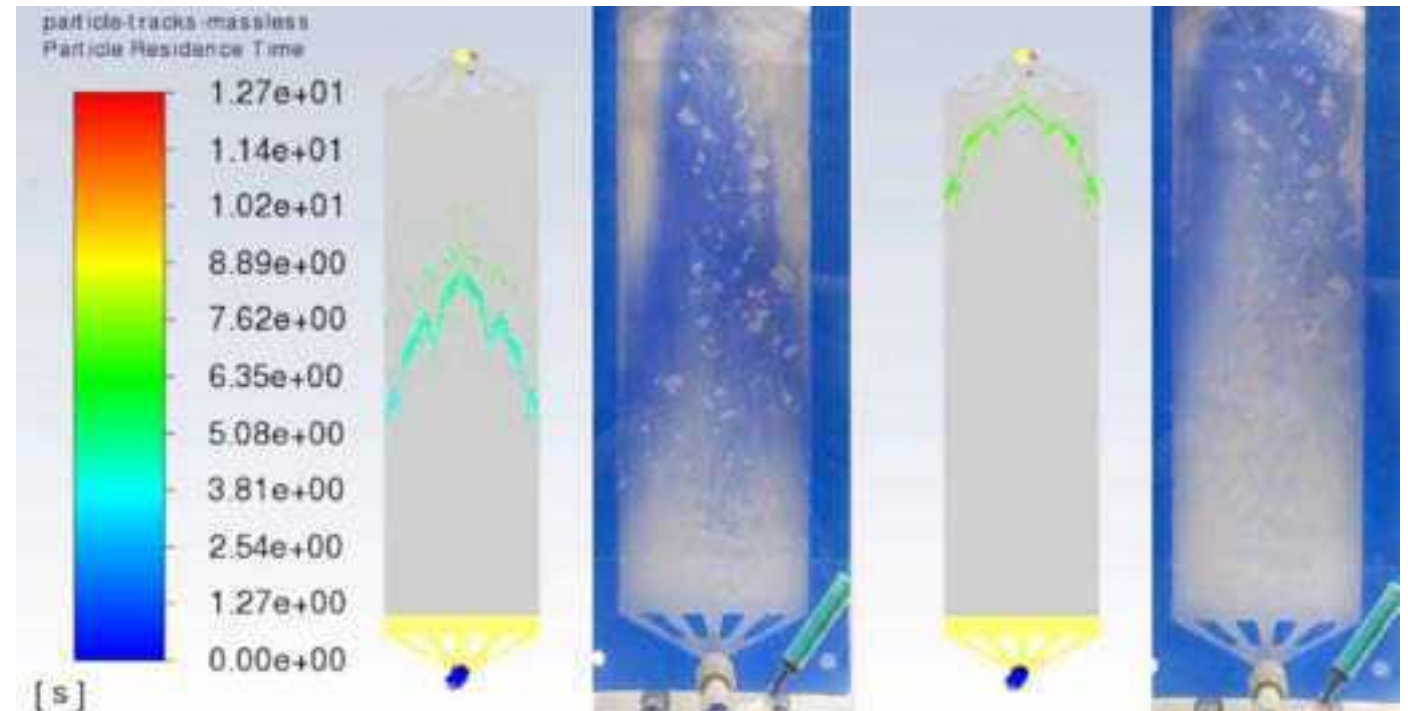
## Strömungsmodellierung



Tintentracer in Laborzelle (Kiene und Schmidtgen, 2024)



Tintentracer in Pilotzelle (Kiene und Schmidtgen, 2024)



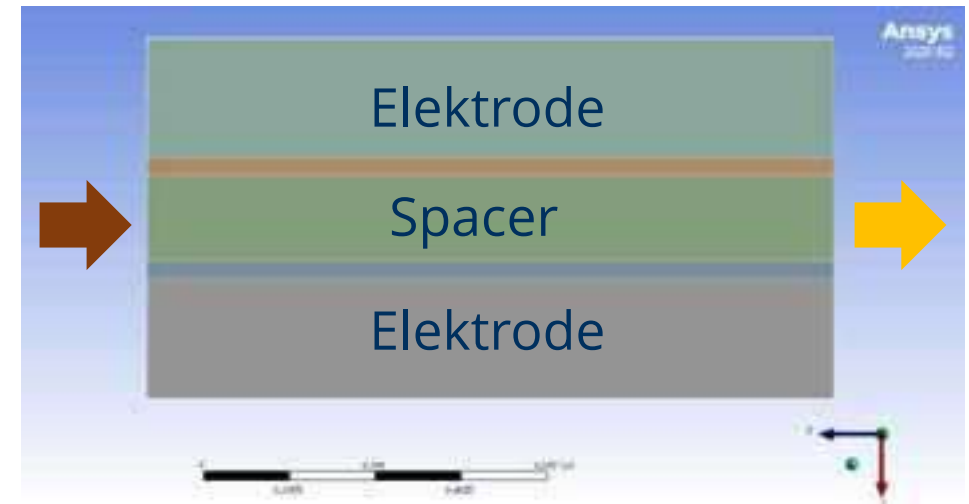
Strömungsverlauf der Simulation



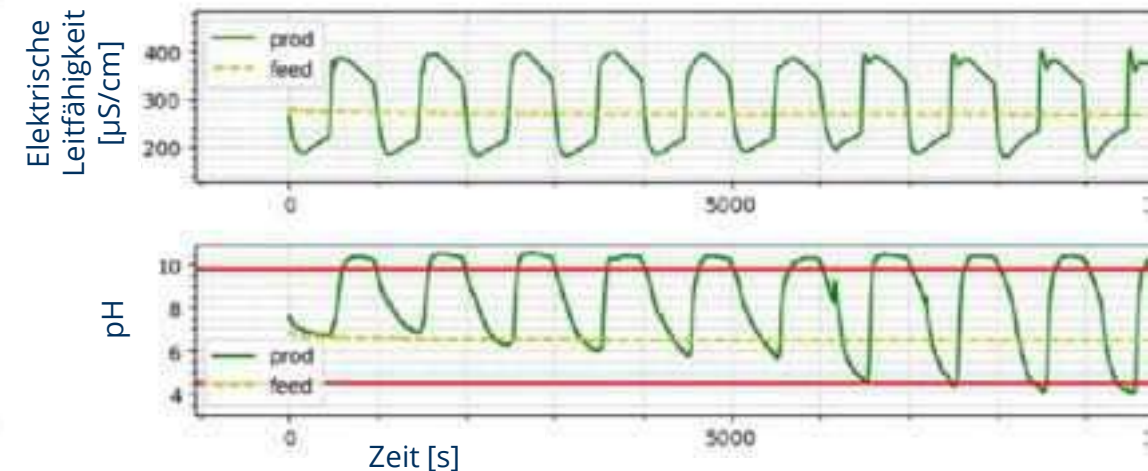
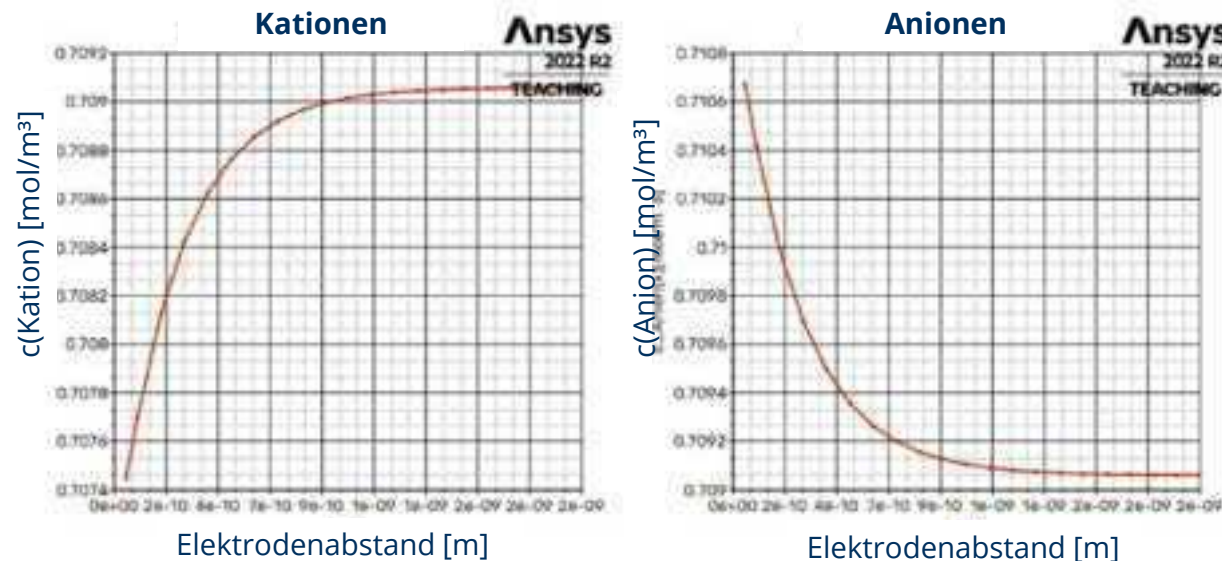
# Modellierung

## Prozessmodell

- Implementierung als User Defined Functions (UDF) in ANSYS Fluent
- Aktuell keine etablierten Modelle für Lösungen mit verschiedenen und unterschiedlich geladenen Ionen aufgrund der komplexen Interaktionen



2D-Modell zur Prozessmodellierung



Experimente mit Single-Salt-Solutions als Datengrundlage des Prozessmodells (Mehdipour, 2024)

Guoy-Chapman-Stern Modell zur Berechnung der Ionenkonzentration an der Grenzfläche Elektrode – Elektrolyt (Kramer, 2023)

# Zusammenfassung & Ausblick

## Ergebnisse:

- Effiziente selektive Entsalzung mit der mMCDI für leicht salines Grundwasser (0,1 kWh/m<sup>3</sup> für 0.3 g/L)
- Kaum Einsatz von chemischen Lösungen notwendig
  - i.d.R. keine Nachbehandlung notwendig
- Funktionalität und Langlebigkeit von Elektroden begünstigt Wartung und Effizienz der Entsalzung

## Forschungsbedarf:

- Vergleich zur Elektrodialyse notwendig!
- Konzentratverwertung muss weiter evaluiert werden!
- Modellierung der Entsalzung von realen Wässern → Betrachtung der Wechselwirkungen!



## Experimente und Datenanalyse an der TU Dresden unter anderem auch durch:

- Bolor-Erdene Ochirbold
- Elina Hiess
- Maja Moch
- Mohammad Suhash Jahan
- Nina Hofmann
- Melike Sert
- Philipp Stark
- Sofian Amir Ziad
- Peter Reichelt
- Helen Ettrich
- Neha Nair
- Angel Paul
- Bincy Benzigar
- Leonard Reißerweber
- Arlo Hild
- Julius Kutscher
- ....
- Manuel Franz
- K M Nafiur Islam
- Lukas Kramer
- Hossein Mehdipour
- Johanna Kiene
- Lea Schmidtgen



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

# Geochemische Wechselwirkungen bei der Infiltration von monovalent teilentsalztem Wasser in Dünenböden von Langeoog

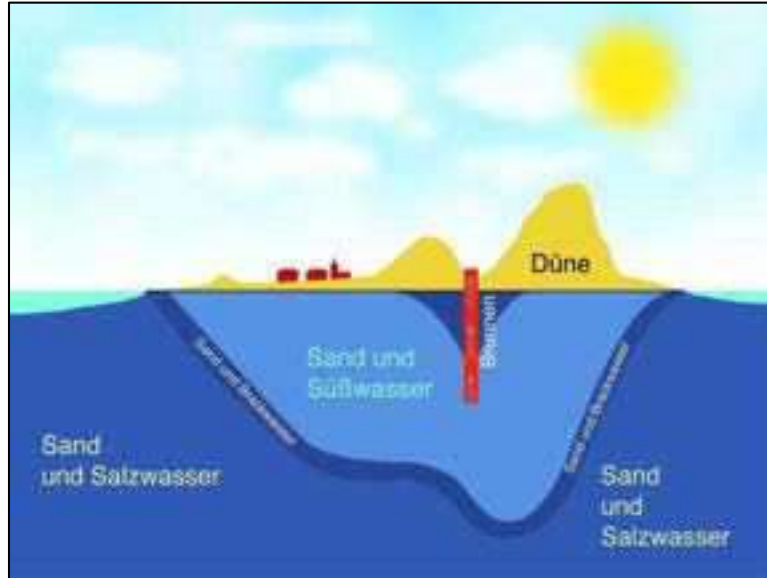
Abschlusskonferenz  
InnovatION  
05.09.2024

Laura Bräunig, Mareike Schloo,  
Jack Longman, Frederik Gäng,  
Janek Greskowiak, Gudrun Massmann



# Motivation und Relevanz

# Motivation



<https://www.langeoog.de/die-insel/trinkwasser>

Grundwasserqualität und –menge gefährdet  
→ Besonders in Küstenregionen (Salzwasserintrusion  
und höhere Entnahmen)

Inseln (z.B. Langeoog) haben eine Süßwasserlinse, die  
ausschließlich durch Niederschlag gespeist wird

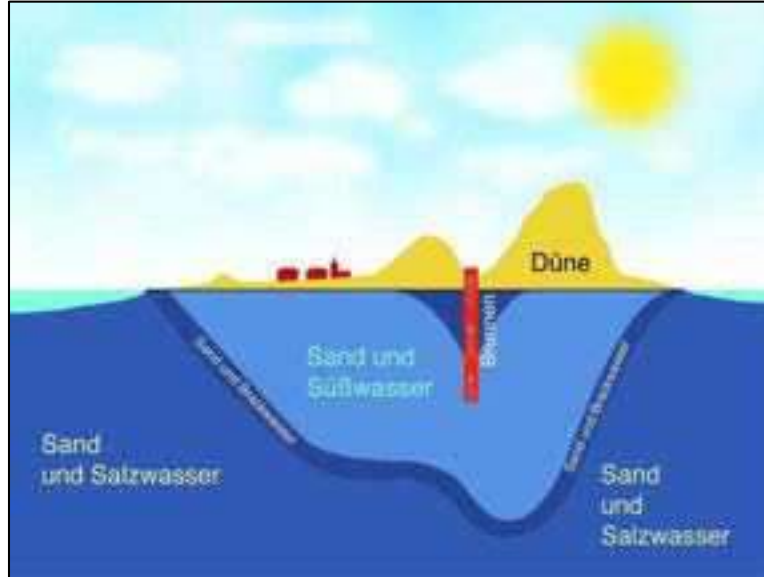
Zunehmende Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg  
führen zur “Verunreinigung” durch Überspülen mit  
Salzwasser



Rosentreter et al., 2020



# Motivation

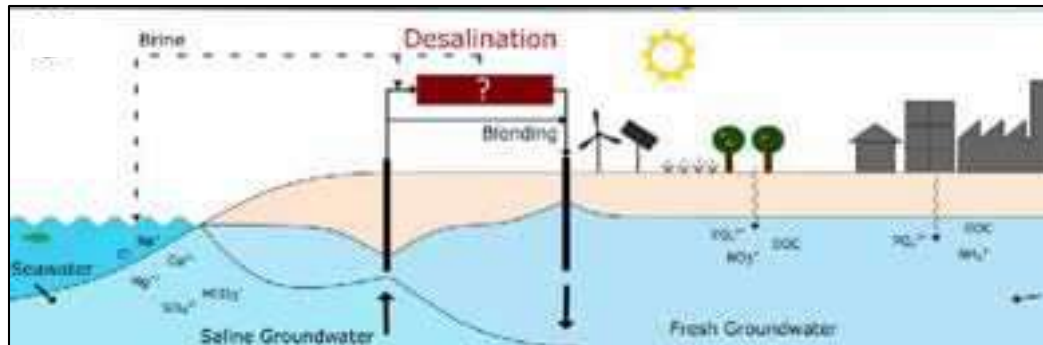


<https://www.langeoog.de/die-insel/trinkwasser>

Grundwasserqualität und –menge gefährdet  
→ Besonders in Küstenregionen (Salzwasserintrusion und höhere Entnahmen)

Inseln (z.B. Langeoog) haben nur eine Süßwasserlinse, die ausschließlich durch Niederschlag gespeist wird

Zunehmende Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg führen zur “Verunreinigung” durch Überspülen mit Salzwasser



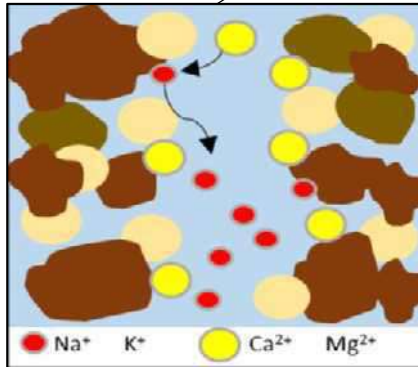
Rosentreter et al., 2020

**Künstliche  
Grundwasseranreicherung  
–  
Managed Aquifer  
Recharge (MAR)**

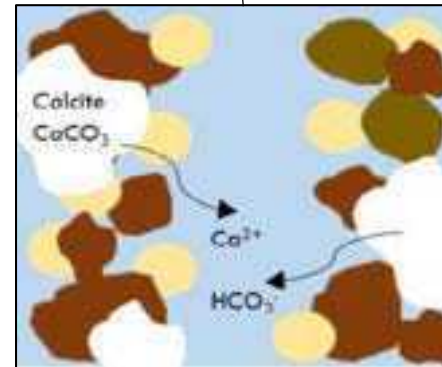


# Geochemische Wechselwirkungen

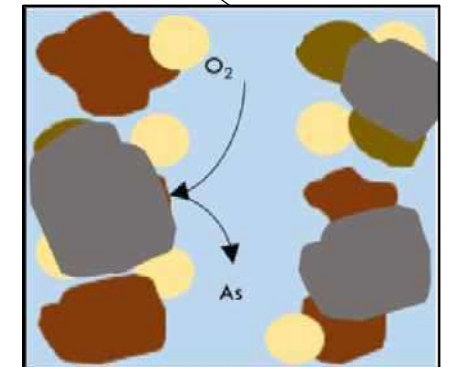
... zwischen Boden und Wasser während einer künstlichen Grundwasseranreicherung



**Sorption/Desorption  
Kationenaustausch**



**Auflösung von  
Mineralen**



**Veränderung der  
Redoxbedingungen**

→ Mobilisierung von  
Metallen/  
Spurenelementen

**Calcium Konzentration im Infiltrationswasser kontrolliert diese Reaktionen**

(e.g.: Ronen-Eliraz et al., 2016; Schafer et al., 2021)

# Beprobung im Pirolatal



3 Bodentypen:

**Beach sand (BS)**

**- Strand**

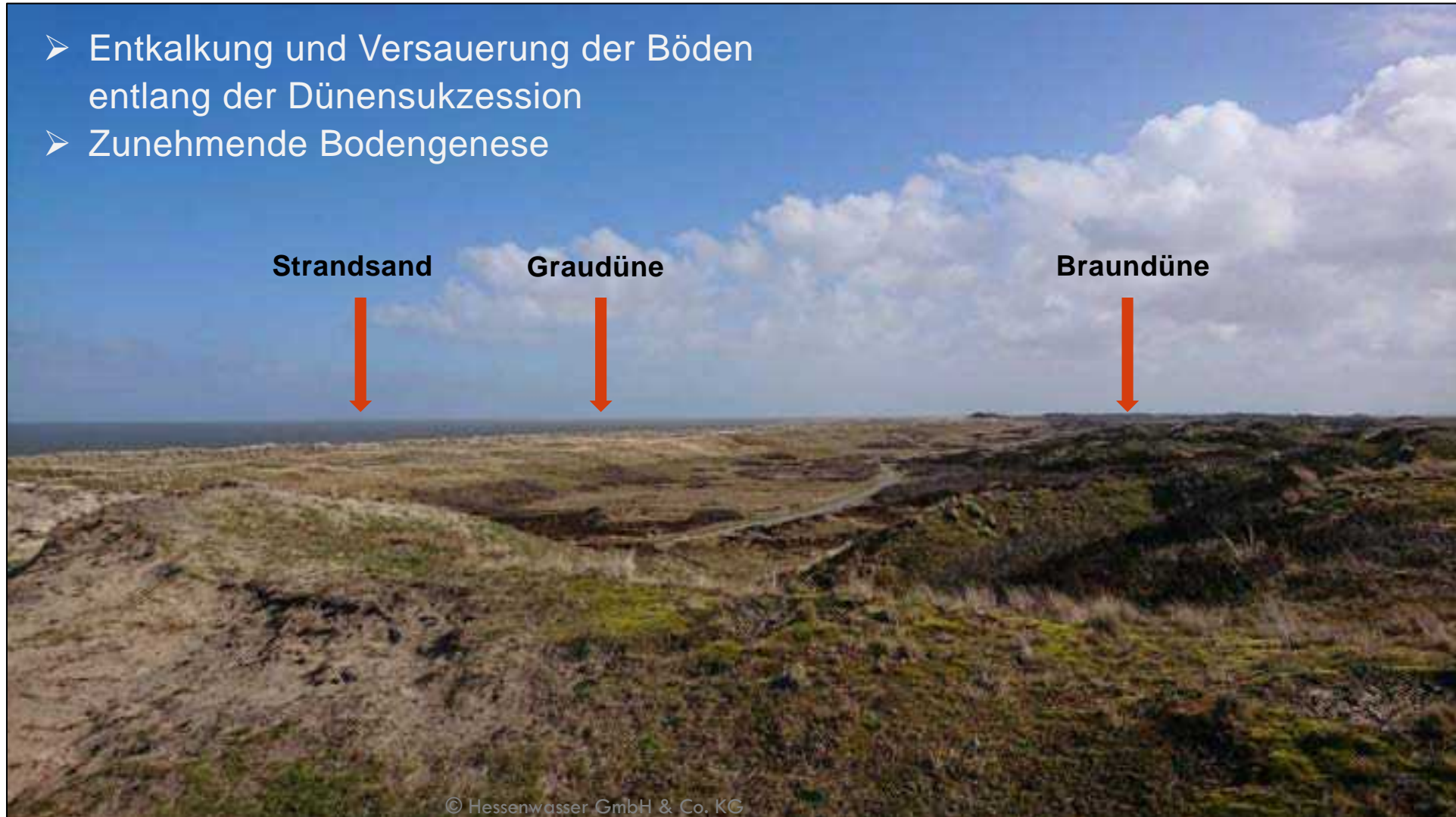
**Graudüne (GD)**

**Braundüne (BD)**



# Potentieller MAR Standort Langeoog

- Entkalkung und Versauerung der Böden entlang der Dünensukzession
- Zunehmende Bodengenese

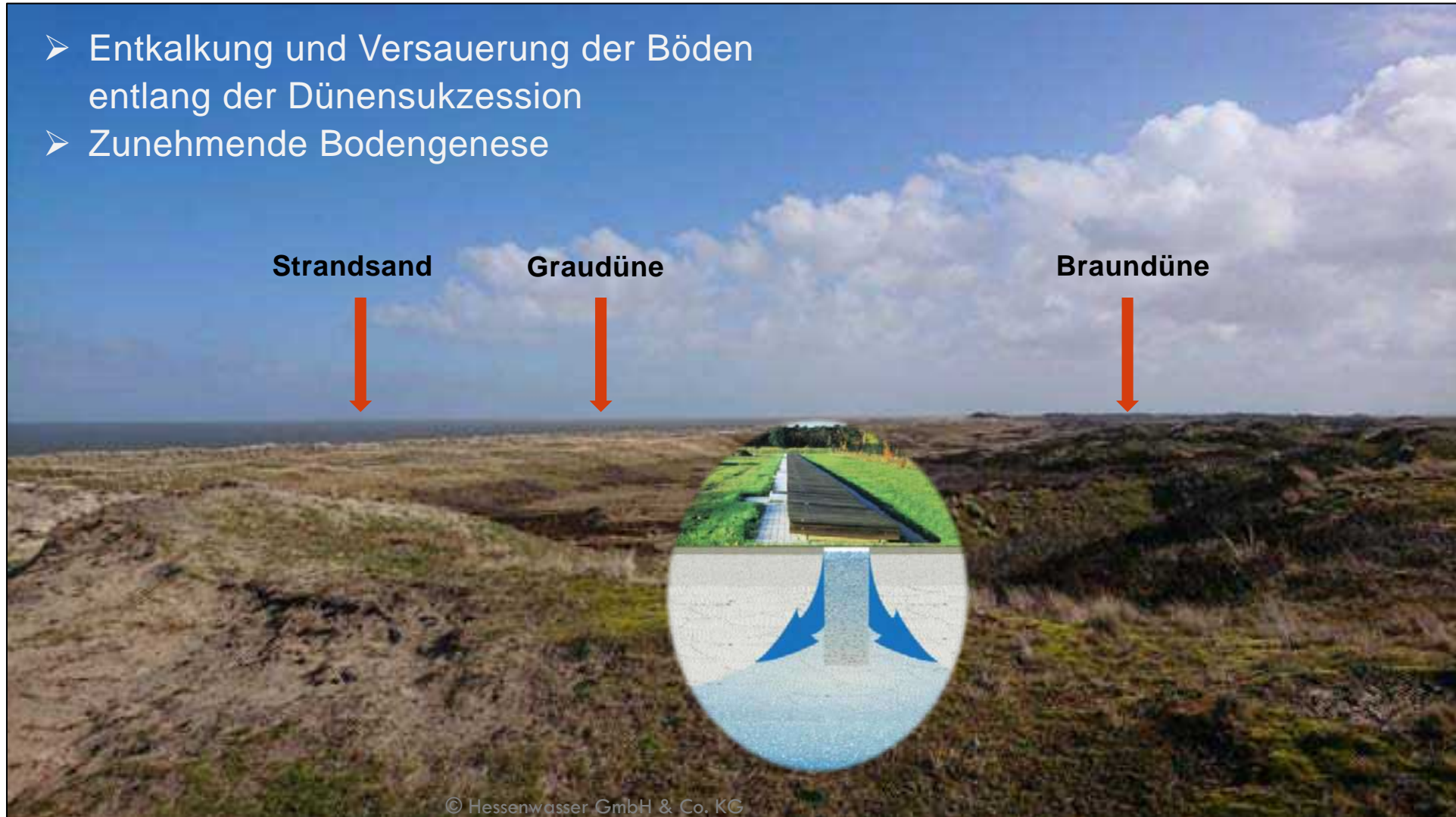


Blick über das Pirolatal nach Osten



# Potentieller MAR Standort Langeoog

- Entkalkung und Versauerung der Böden entlang der Dünensukzession
- Zunehmende Bodengenese

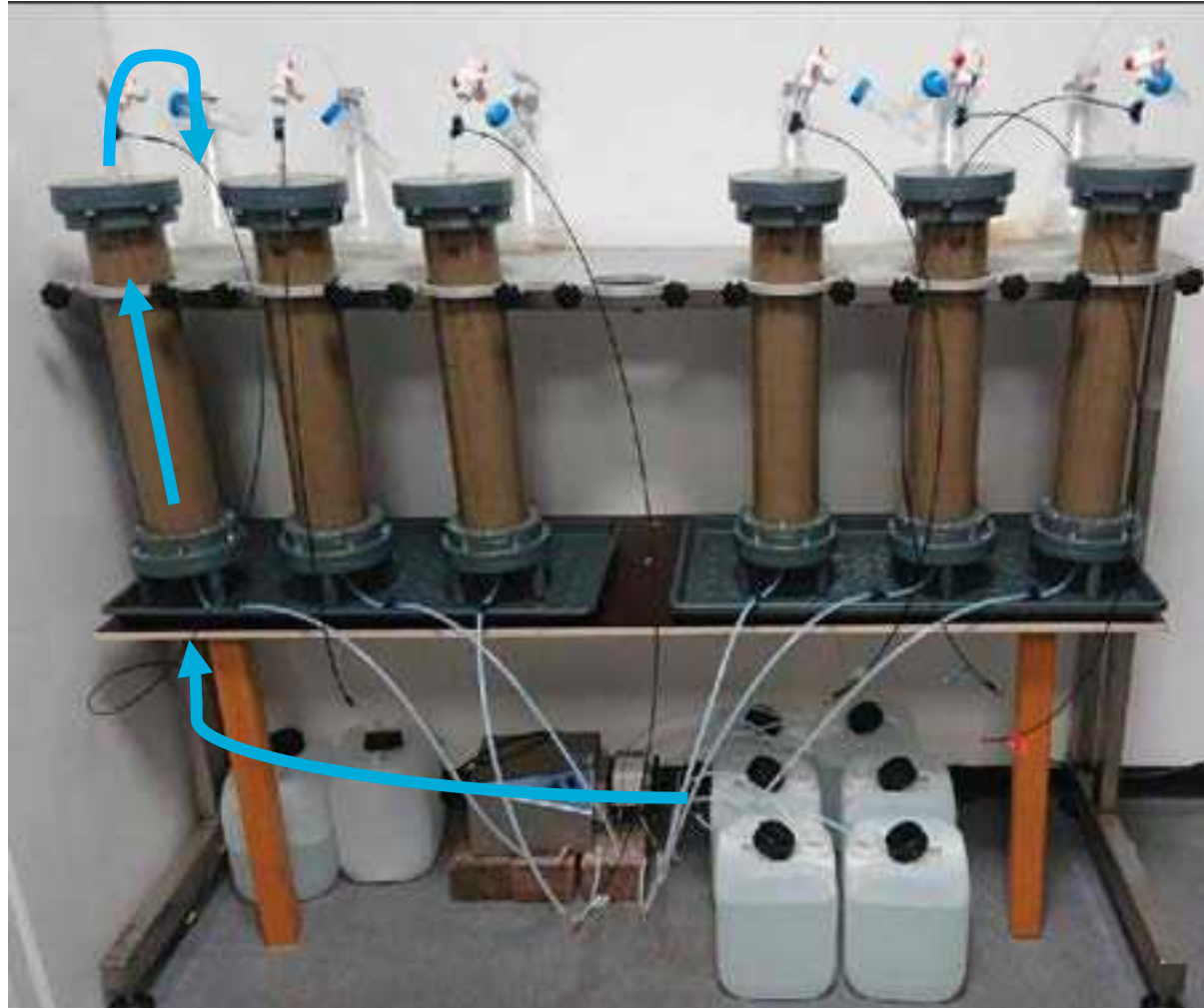


© Hessenwasser GmbH & Co. KG

Blick über das Pirolatal nach Osten

# Wechselwirkung zwischen Dünenböden und monovalent-teilentsalztem Wasser

# Säulenversuche

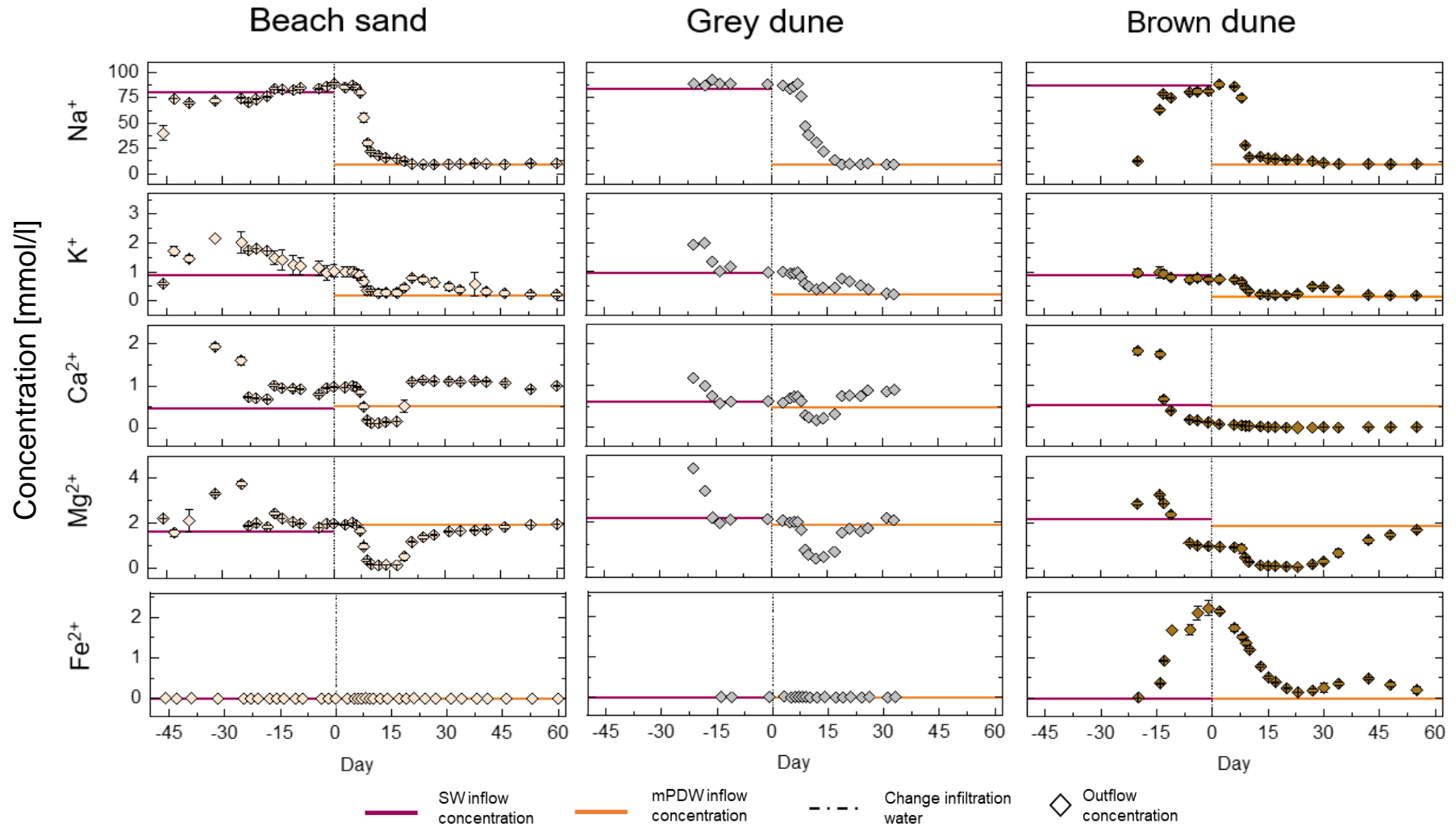


Säulen 20 Tage **konditioniert mit künstlichem brackischen Wasser ( BW, ~ 5 g/l)**

**Monovalent-teilentsalztes Wasser (mPDW, ~ 0,8 g/l):**  
80-90 % der Konzentration der monovalenten Ionen und 10-20 % der divalenten Ionen reduziert

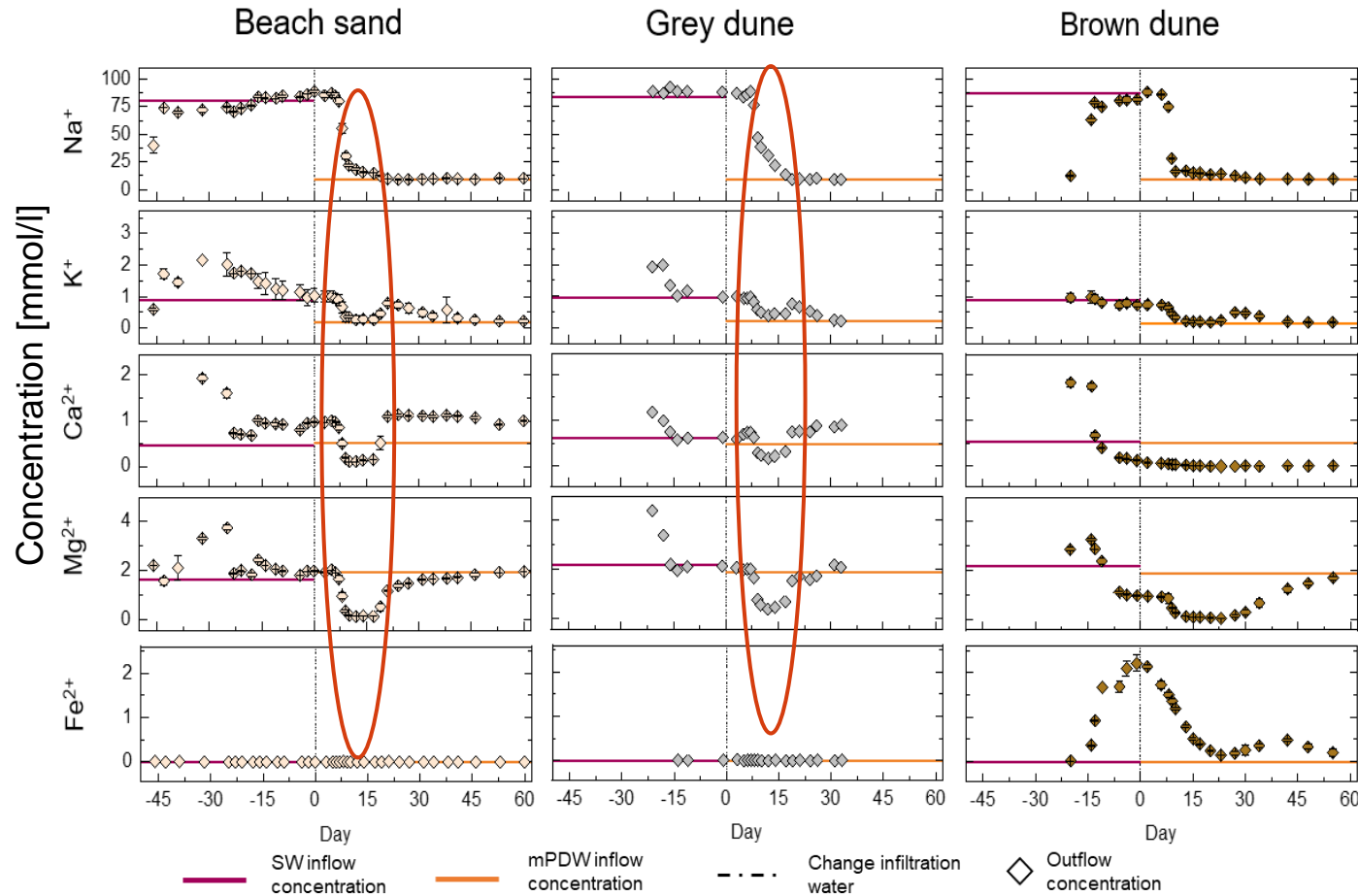
→ Ziel: Nachbildung einer Infiltration in einen salzigen Aquifer

# Interpretation der geochemischen Wechselwirkungen anhand der Kationenkonzentrationen der Effluenten



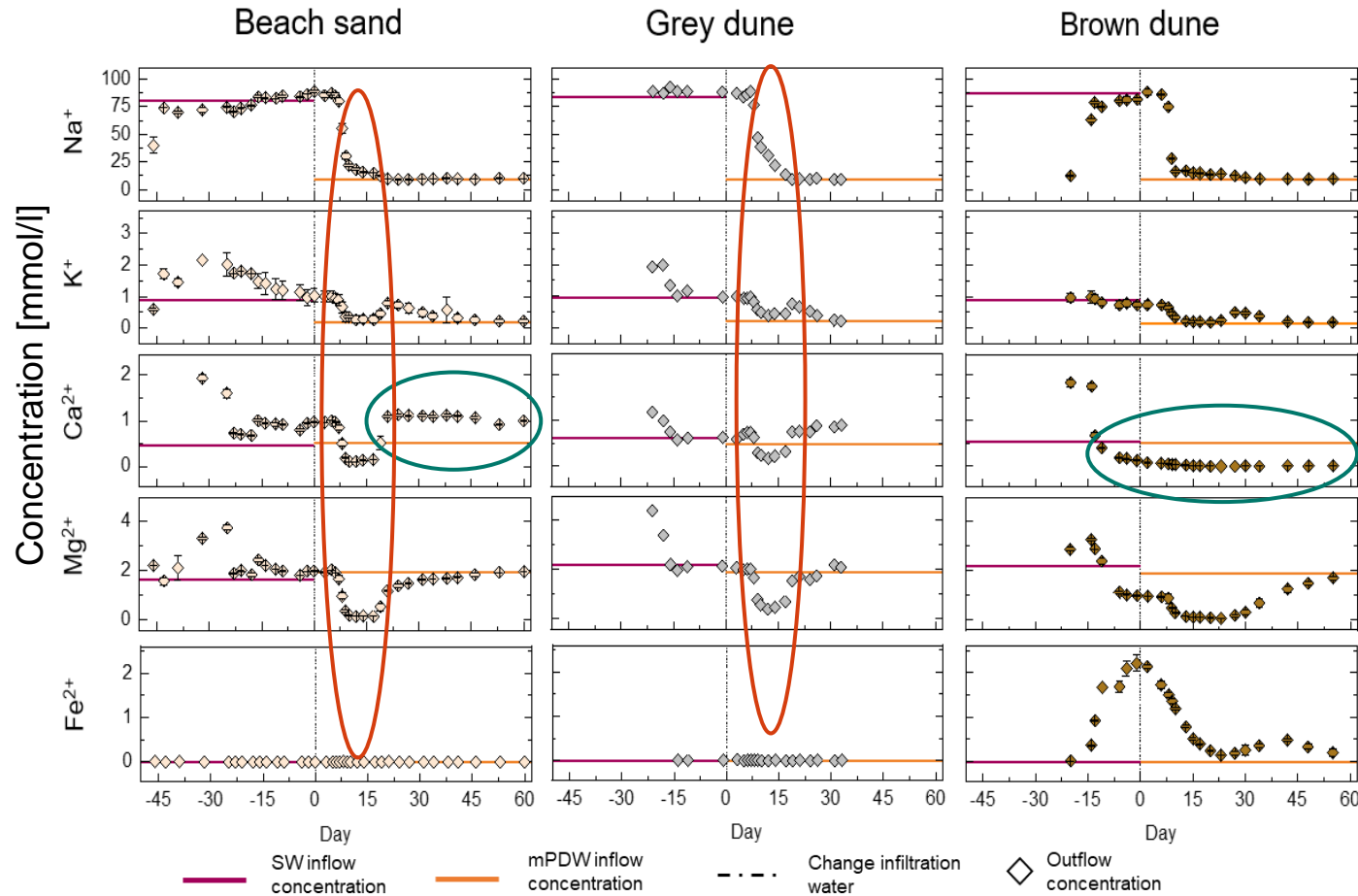


# Interpretation der geochemischen Wechselwirkungen anhand der Kationenkonzentrationen der Effluente



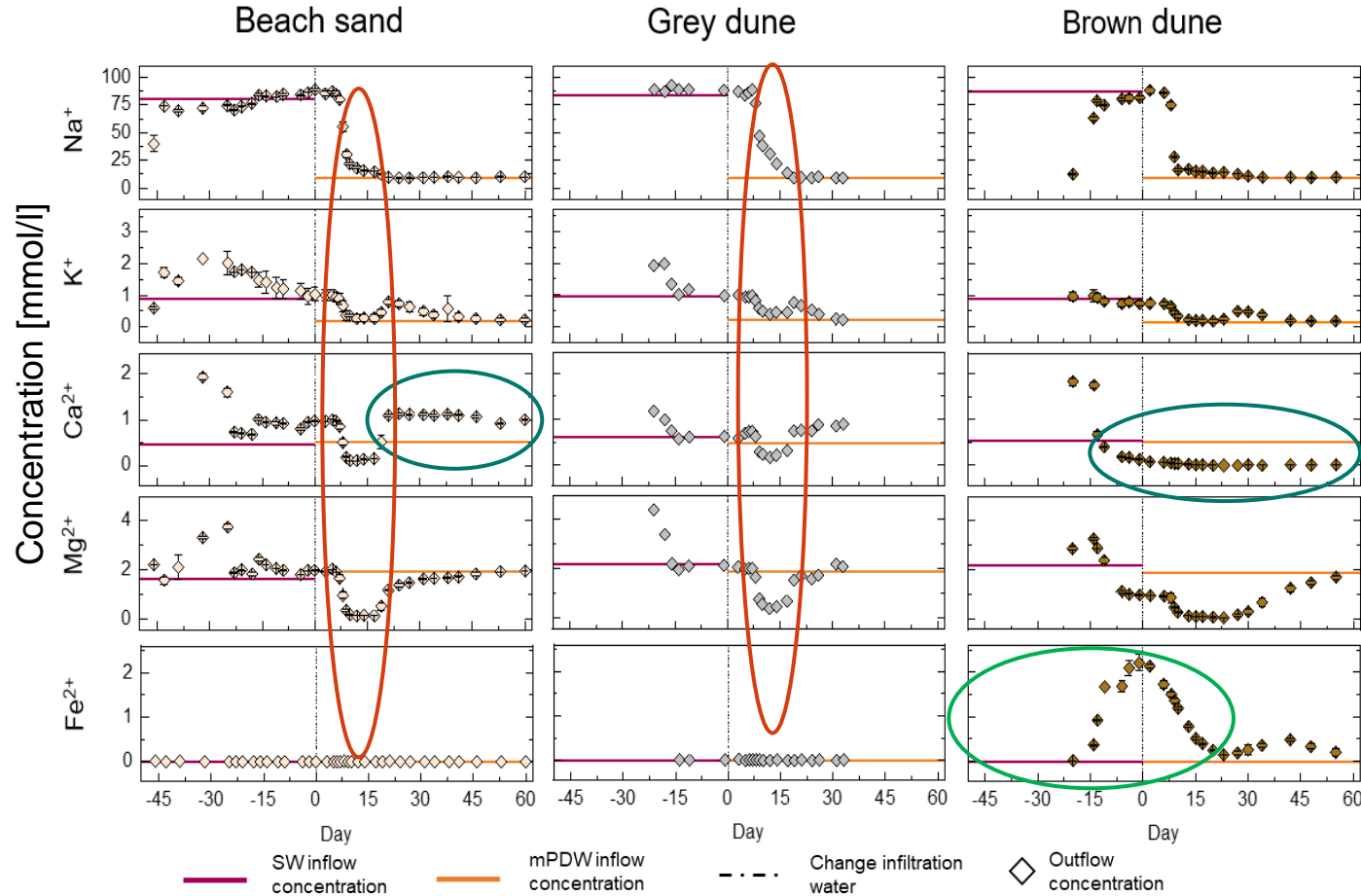
➤ **Kationenaustausch**  
beobachtet für alle  
Böden

# Interpretation der geochemischen Wechselwirkungen anhand der Kationenkonzentrationen der Effluente



- **Kationenaustausch** beobachtet für alle Böden
- **Calcite Lösung** im carbonathaltigen Strandsand und Boden der Graudüne
- **Calcium Adsorption** beim entkalten Boden der Braundüne

# Interpretation der geochemischen Wechselwirkungen anhand der Kationenkonzentrationen der Effluente

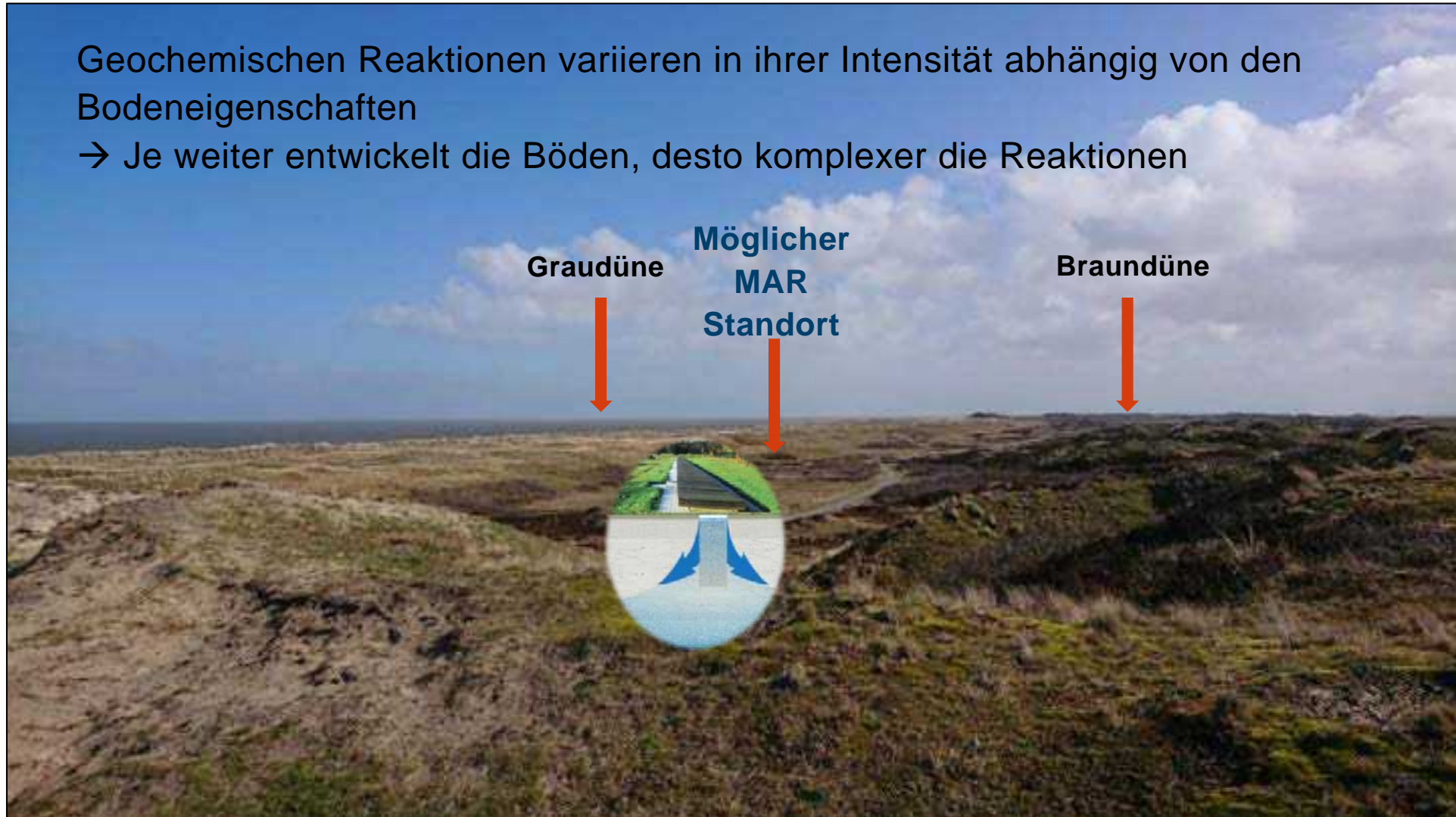


- **Kationenaustausch** beobachtet für alle Böden
- **Calcite Lösung** im carbonathaltigen Strandsand und Boden der Graudüne
- **Calcium Adsorption** beim entkalten Boden der Braundüne
- **Mobilisierung von Eisen** bei der Braundüne

# Potentieller MAR Standort Langeoog

Geochemischen Reaktionen variieren in ihrer Intensität abhängig von den Bodeneigenschaften

→ Je weiter entwickelt die Böden, desto komplexer die Reaktionen

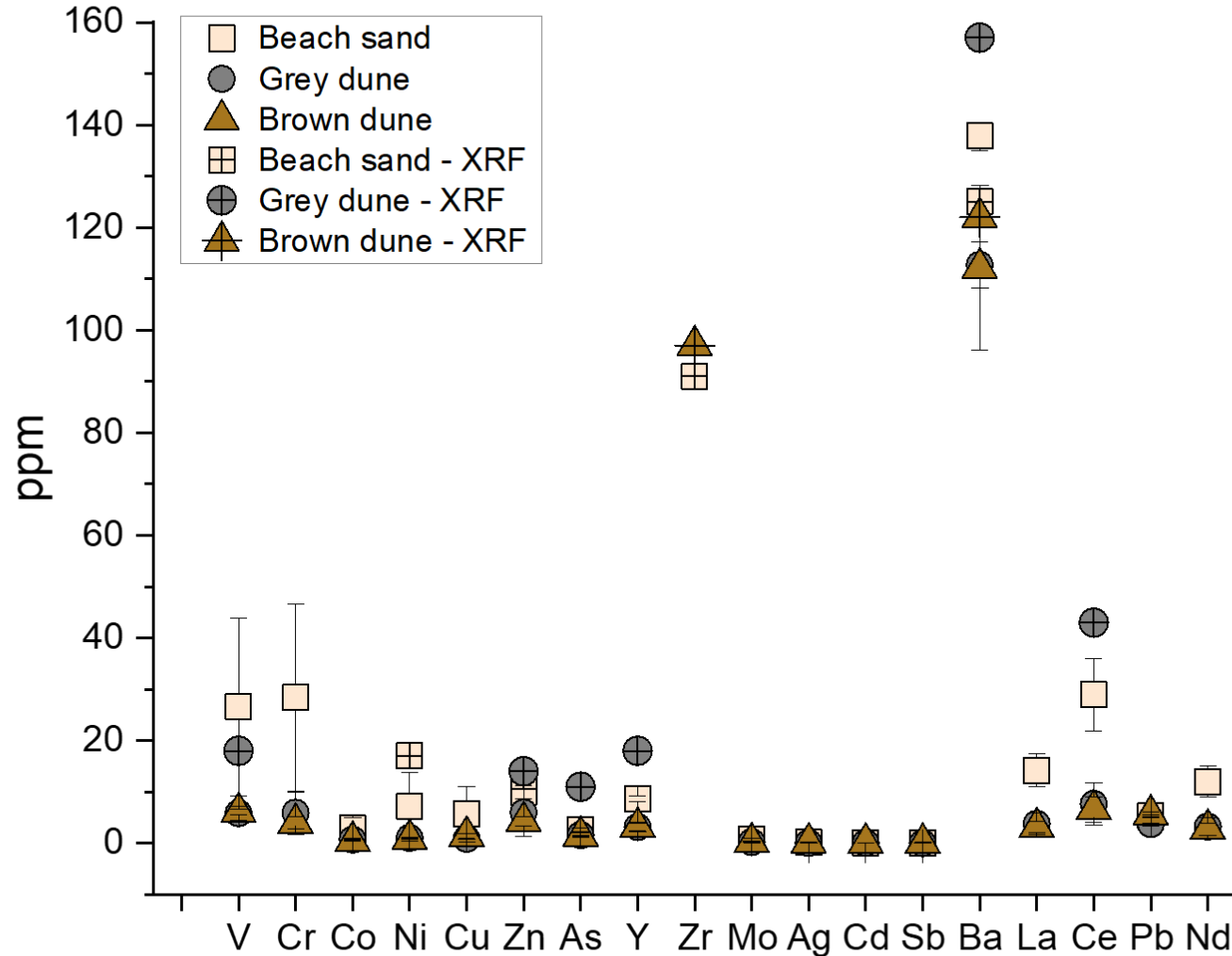




# Mobilisierung von Metallen und Spurenelementen?

# Geogene Hintergrundgehalte der Böden

Bestimmt mittels Vollaufschluss und Röntgenfluoreszenz



Abreicherung der  
(Spuren)Metalle vom  
Strand hin zur Braundüne

**Dünenböden von  
Langeoog  
enthalten Metalle,  
die mobilisiert  
werden könnten**

# (Spuren)Metall Mobilisierung während MAR

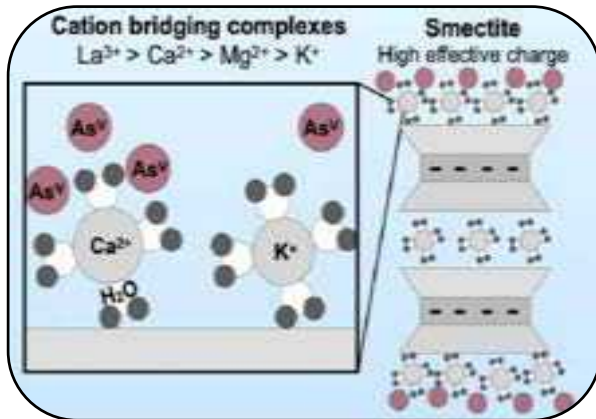
**Arsen** (As) kommt global in Böden und Aquiferen vor und ist toxisch

→ Mobilisierung ins Grundwasser während MAR kann Schäden der Umwelt und Menschen hervorrufen

Trinkwassergrenzwerte:

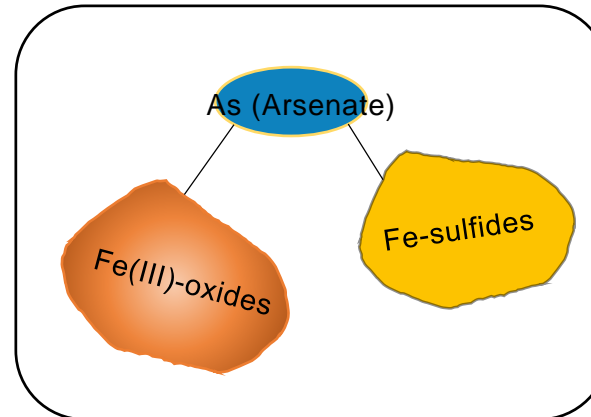
Deutschland: 10 µg/l

Niederlande: 1 µg/l



Fakhreddine & Fendorf, 2021

**Divalente Ionen im Porenwasser (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) begünstigen Adsorption von As an Tonmineralen**



Arsenate (AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)



Zhao et al., 2024

# Säulenversuch zur Auswirkung der chemischen Zusammensetzung des Infiltrationswassers



fGW = fresh groundwater (0,11 g/l)

mPDW = monovalent partial  
desalinated water (0,77 g/l)

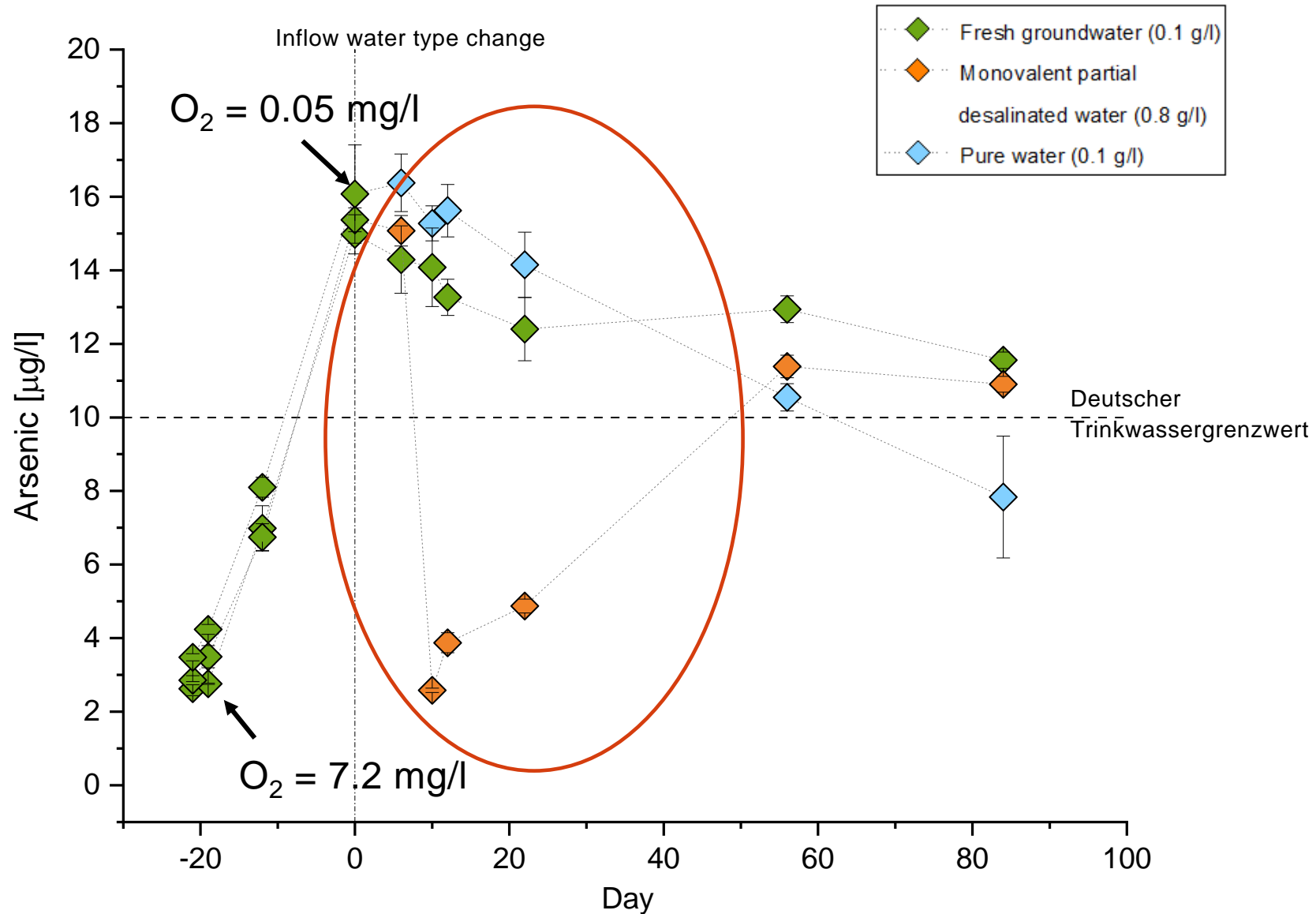
PW = Pure water (0,009 g/l)

Graudünensediment wurde anhand  
bisheriger Experimente als geeignetster  
Standort für pot. Anreicherung  
identifiziert

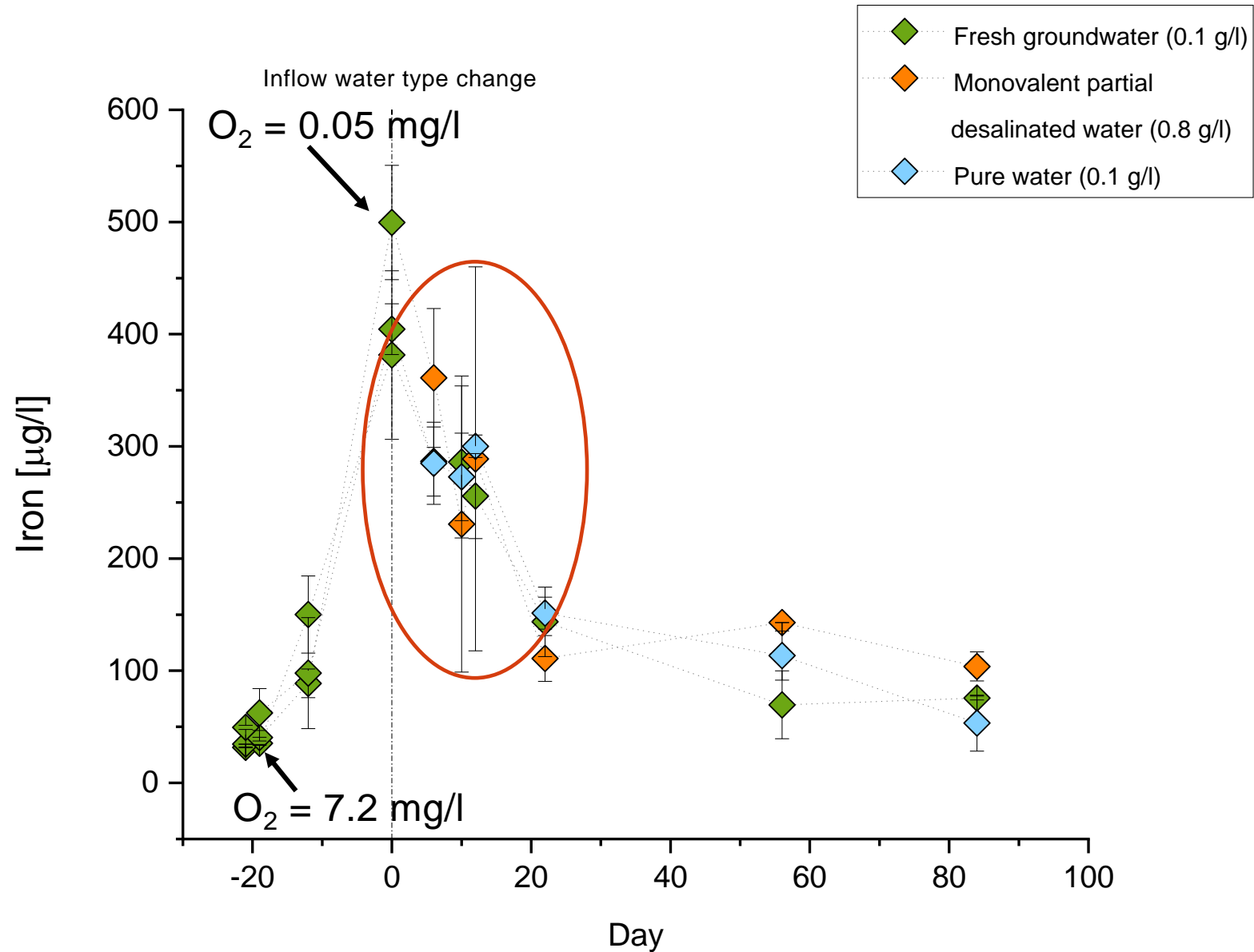
→ Ziel: Nachbildung einer Infiltration an  
der Oberfläche/in die Süßwasserlinse



# Arsen Konzentration der Effluenten

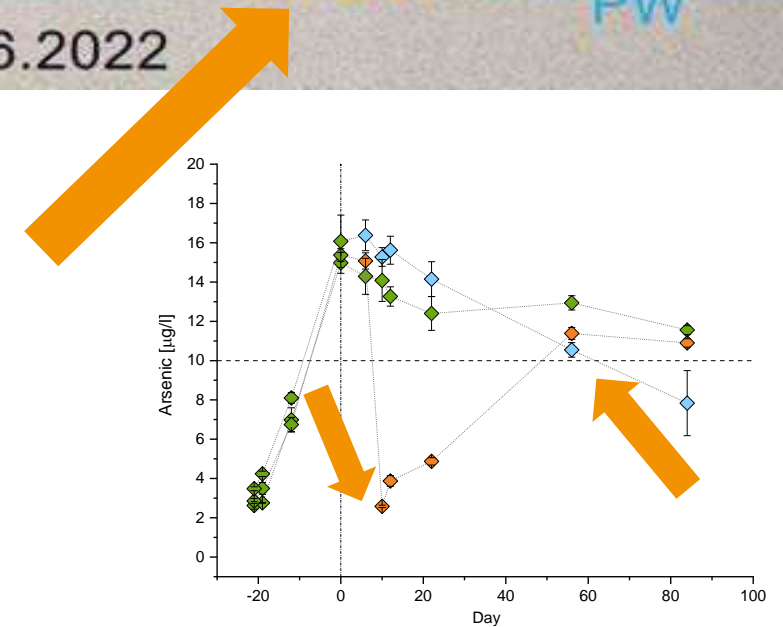
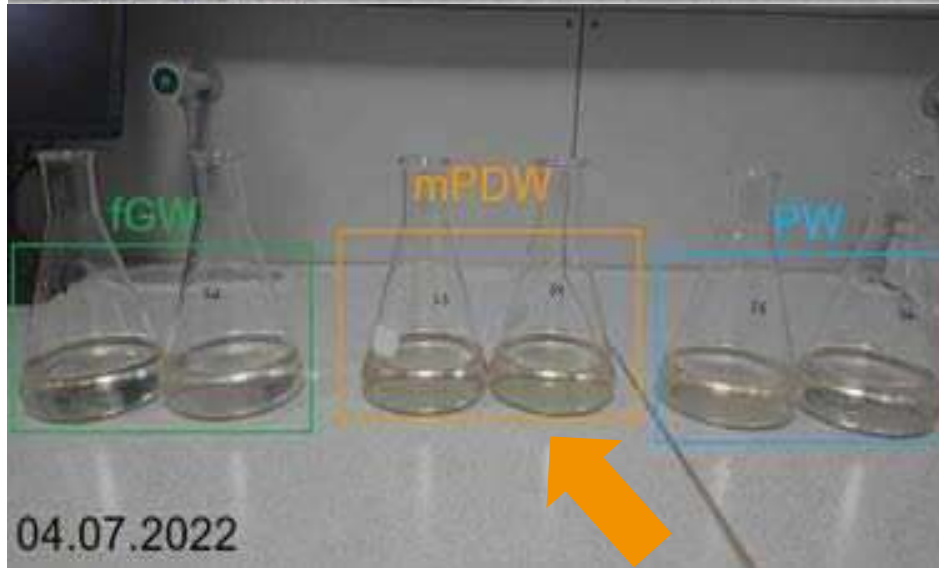
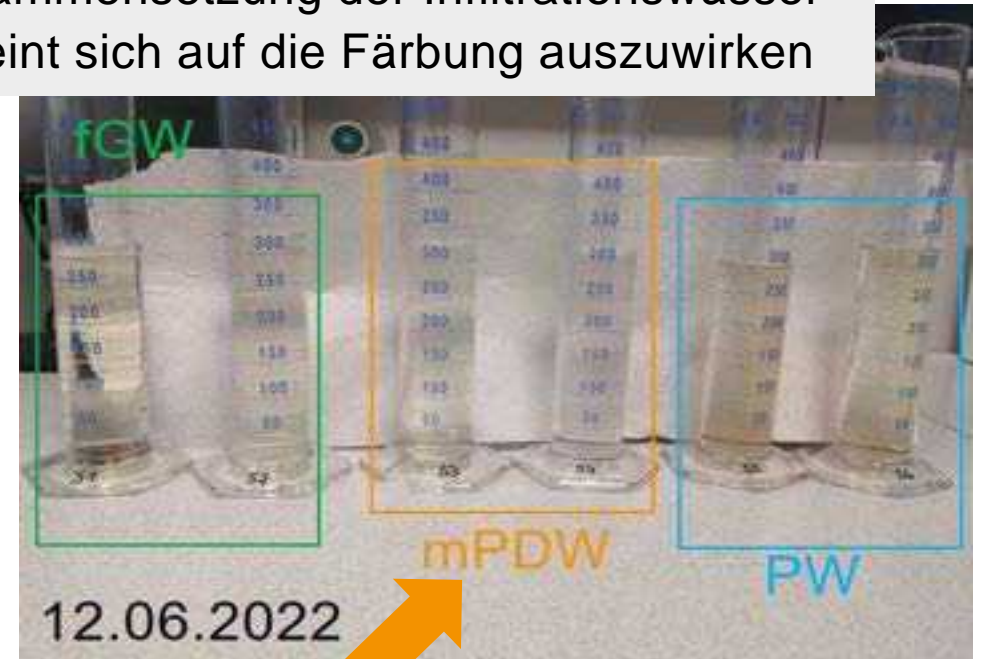


# Eisenkonzentration der Effluenten



# Färbung der Effluenten

Die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Infiltrationswässer scheint sich auf die Färbung auszuwirken



## Fazit

Arsen Mobilisierung während ändernden Redoxbedingungen aufgrund der Auflösung von Eisenoxiden

- **Infiltration vom monovalent-teilentsalztem Wasser mindert den Transport**

Arsen Transport verknüpft mit der Färbung und der gelösten organischen Substanz (DOM)

- **Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> stabilisieren As-DOM Komplexe, die aufgrund ihrer Größe im Porenraum des Bodens stecken bleiben**



## Fazit

Arsen Mobilisierung während ändernden Redoxbedingungen aufgrund der Auflösung von Eisenoxiden

➤ **Infiltration vom monovalent-teilentsalztem Wasser mindert den Transport**

Arsen Transport verknüpft mit der Färbung und der gelösten organischen Substanz (DOM)

➤ **Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> stabilisieren As-DOM Komplexe, die aufgrund ihrer Größe im Porenraum des Bodens “stecken bleiben”**

Arsen Konzentration überschreitet zeitweise den Trinkwassergrenzwert

→ Nur ein temporärer Effekt

Geochemische Wechselwirkungen haben keinen negativen Einfluss auf die Grundwasserqualität oder Gefügestabilität des Bodens

**Künstliche Grundwasseranreicherung mit einem monovalent-teilentsalztem Wasser auf Langeoog könnte die Süßwasserlinse stabilisieren und Frischwasser sichern**



**Danke für Ihre  
Aufmerksamkeit!**

# Probenahme

## Strandsand



## Graudüne



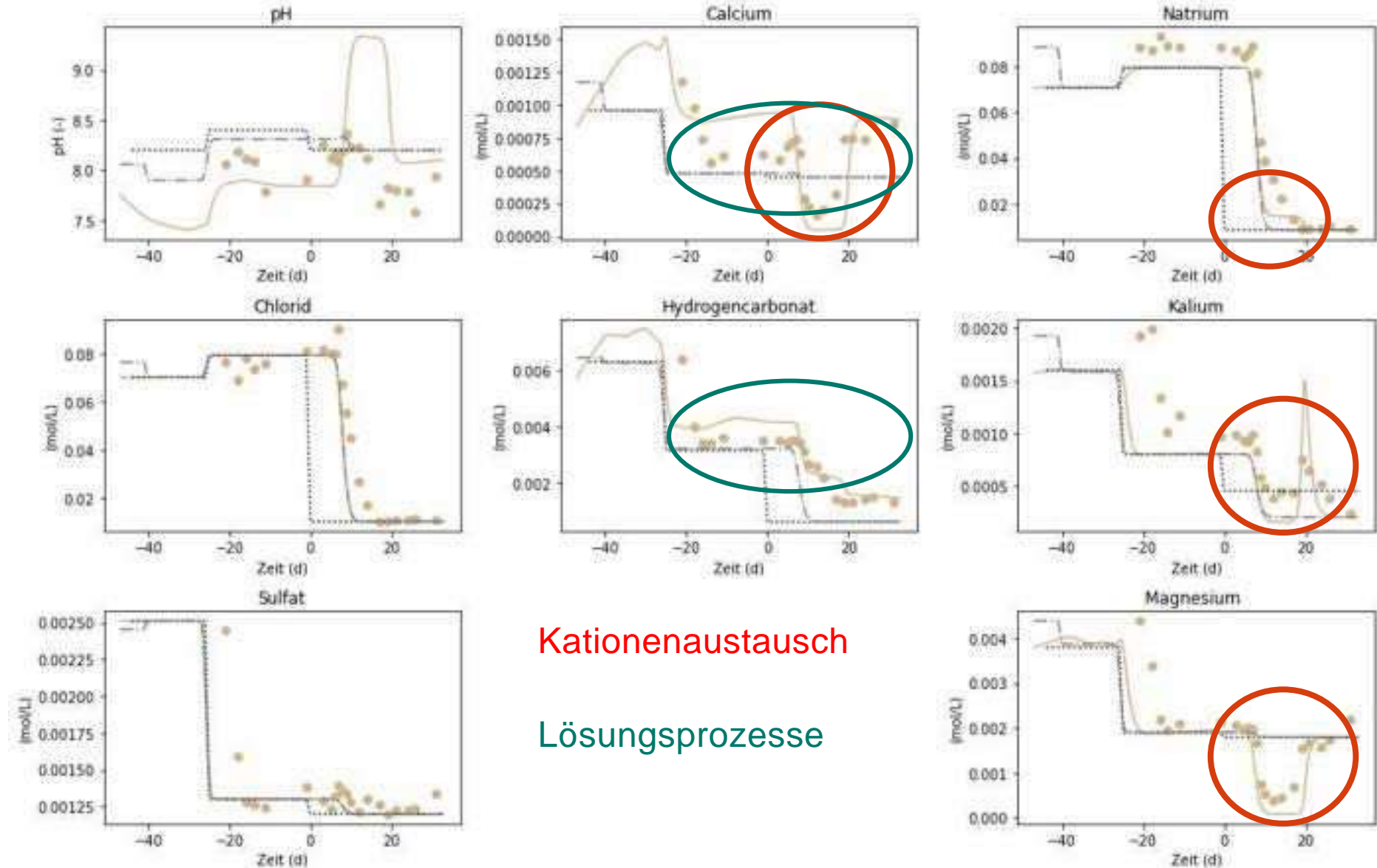
## Braundüne



Organische Auflage entfernt, Tiefe = bis zu 20 cm



# Modellierung der mPDW Infiltration in den Boden der Graudüne



# PAUSSE

... bis 13:30 Uhr



# Session III: Nachhaltige Anwendung und Implementierung der mMCDI



TU Dresden – Dr. Christoph Scope

Dr. Christoph Scope & Prof. Dr. Remmer Sassen  
Professur für Betriebswirtschaftslehre,  
insb. Nachhaltigkeitsmanagement und Betriebliche Umweltökonomie  
Fakultät Wirtschaftswissenschaften

# Session III: Nachhaltige Anwendung und Implementierung der mMCDI

Online-Abschlusskonferenz von innovatIION  
Dresden, 05.09.2024 // 13:30 Uhr

# Agenda

- 1. Ausgangspunkt – Zielsetzung und Definitionen**
- 2. Zwischenresultate**
- 3. Diskussion**

# 1. Ausgangspunkt – Zielsetzung und Definitionen



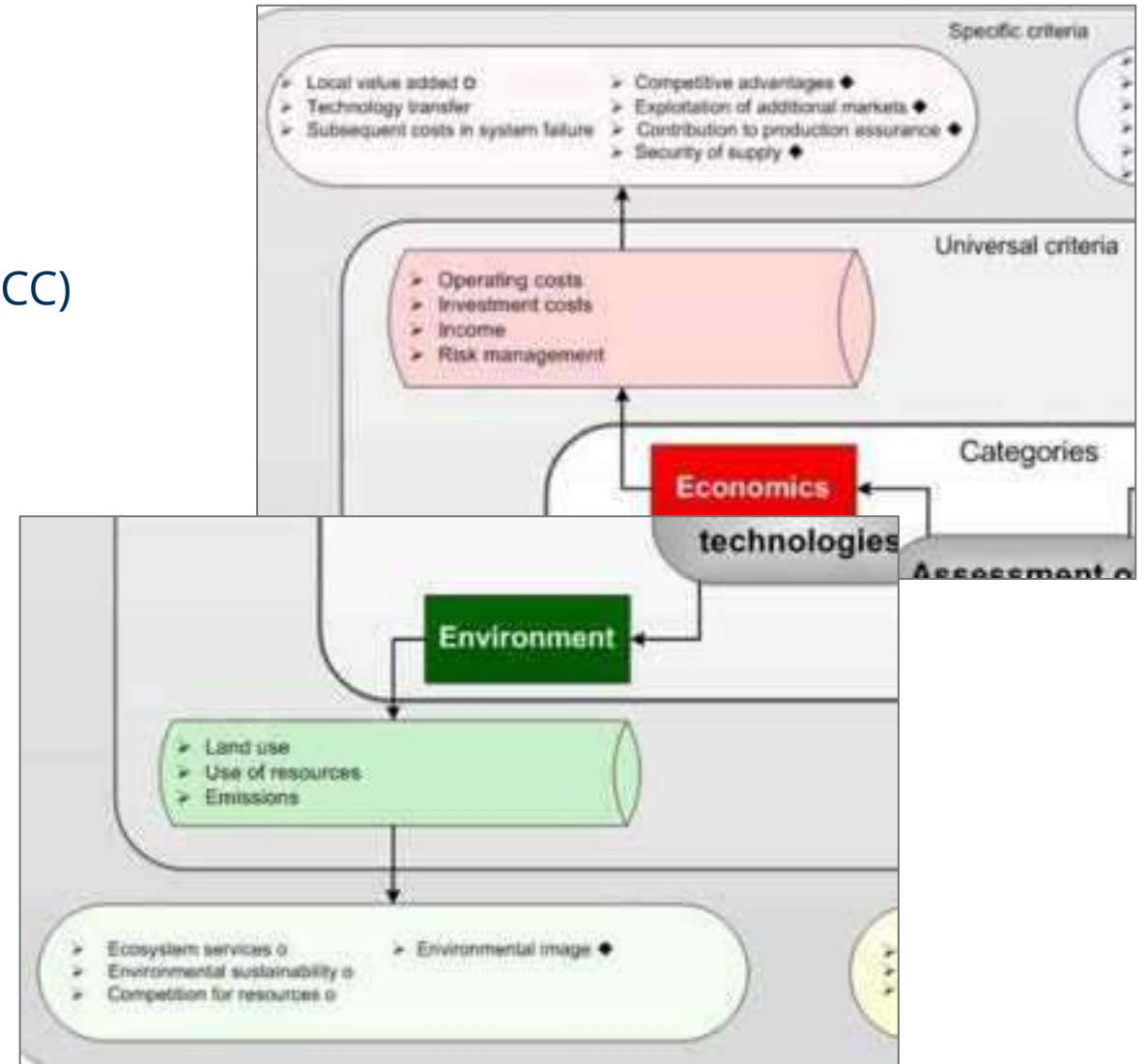
## Ziel: eine Multikriterienanalyse

### Ökonomische Nachhaltigkeit:

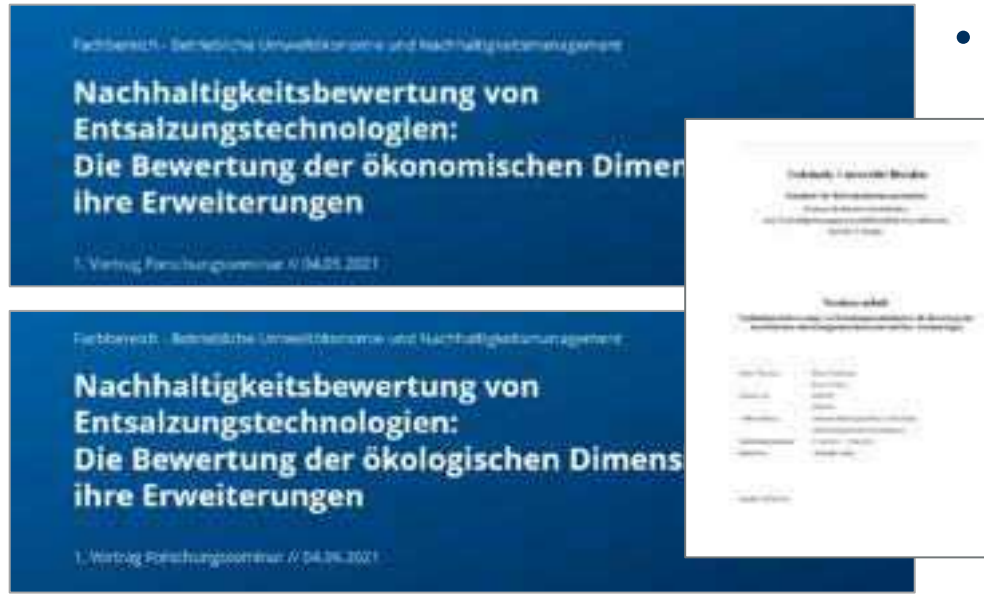
- Wirtschaftlichkeit vs. Lebenszykluskosten (LCC)
  - Investitions-/Anschaffungskosten
  - Betriebskosten (inkl. Wartung etc.)
  - Entsorgungskosten

### Ökologische Nachhaltigkeit :

- Ökobilanzierung (LCA) mit ausgewählten Umweltsleistungsindikatoren
  - Ressourcenverbrauch
  - Energiebedarf
  - CO<sub>2</sub>-Äquivalente als Treibhausgaspotenzial



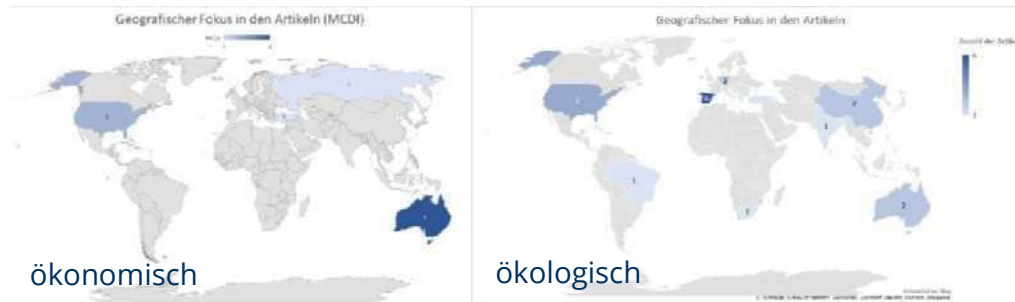
# Ausgangspunkt: Stand der Forschung bestimmen



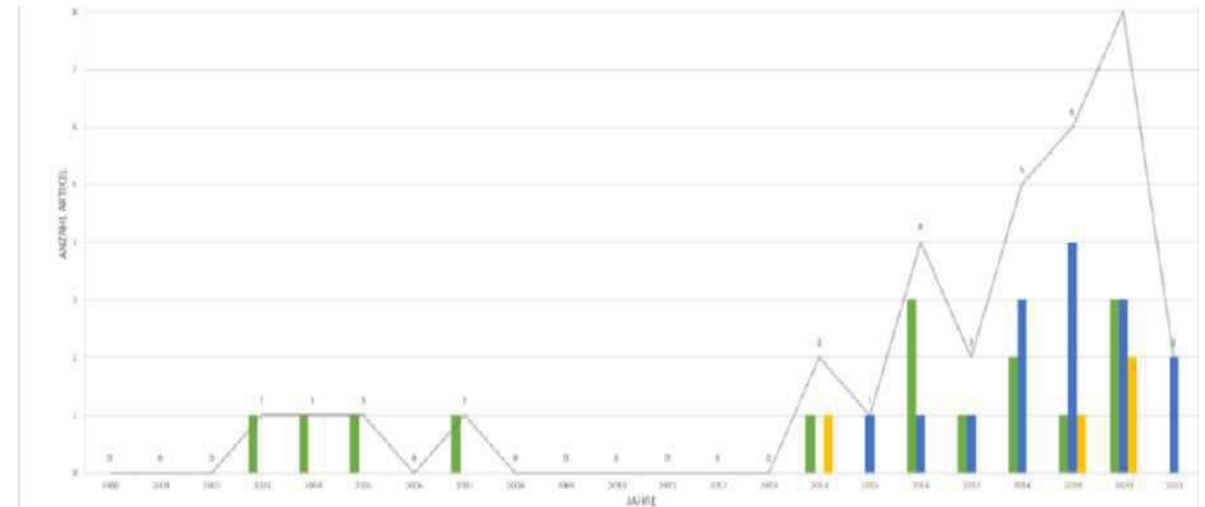
## • 2 Masterarbeiten: 2021-22

- 1. Schritt: Zwischenresultate zur Erfassung des Stands der Forschung / Stand der Technik basierend auf Literatur

## • 1 gemeinsamer Review: 2024

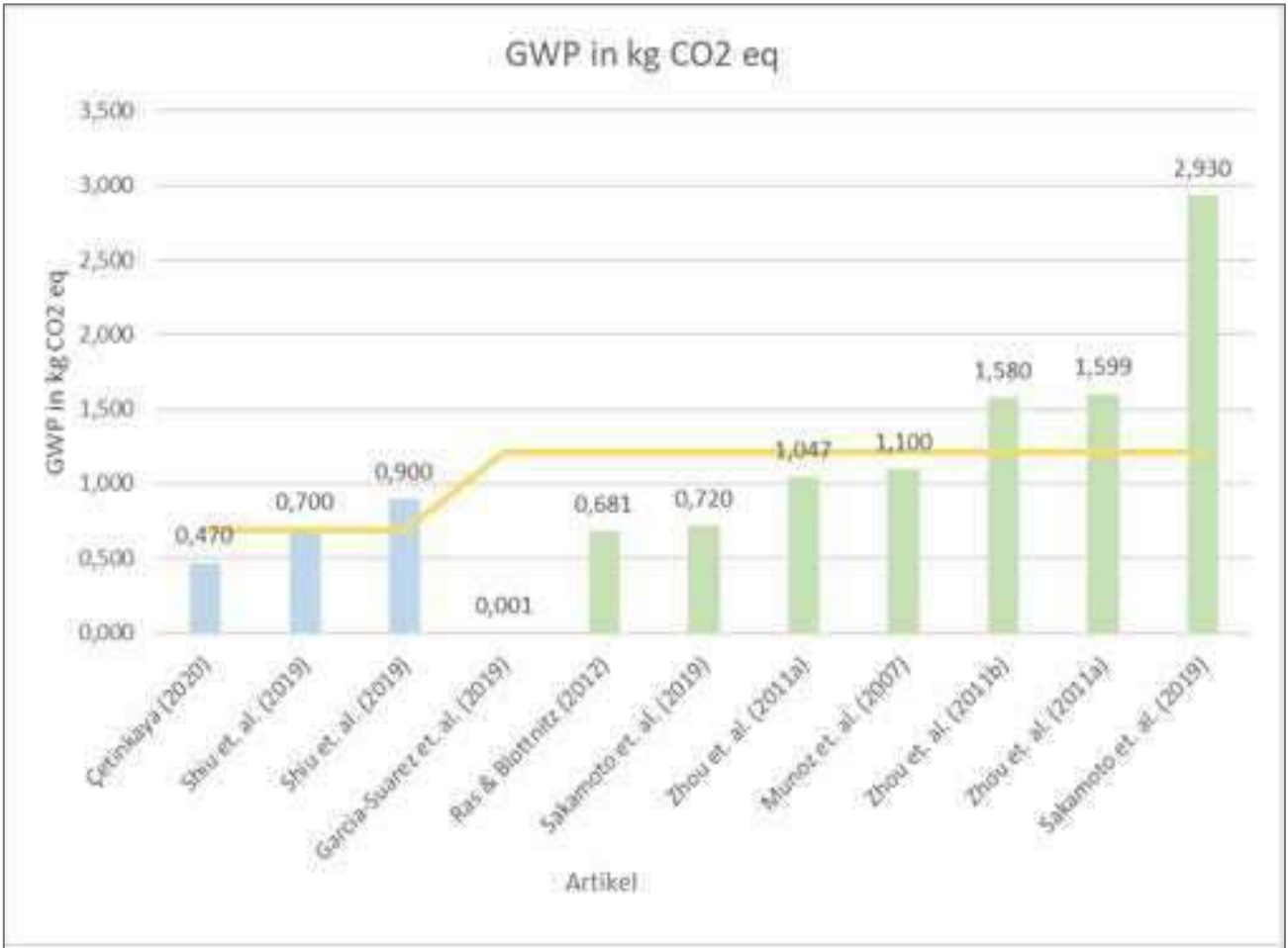


Bilder: C. Scope (2021); T. Kaiser und K. Brune (2021)

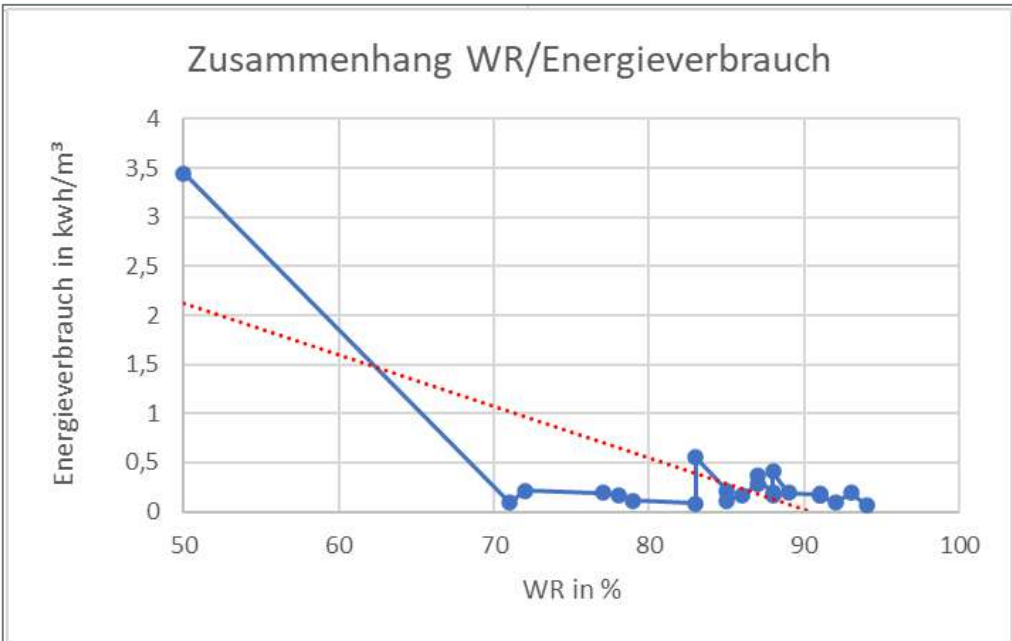


# Erfassung von Benchmarks

## Ökologisch



Bilder: Scope (2021); T. Kaiser und K. Brune (2021)

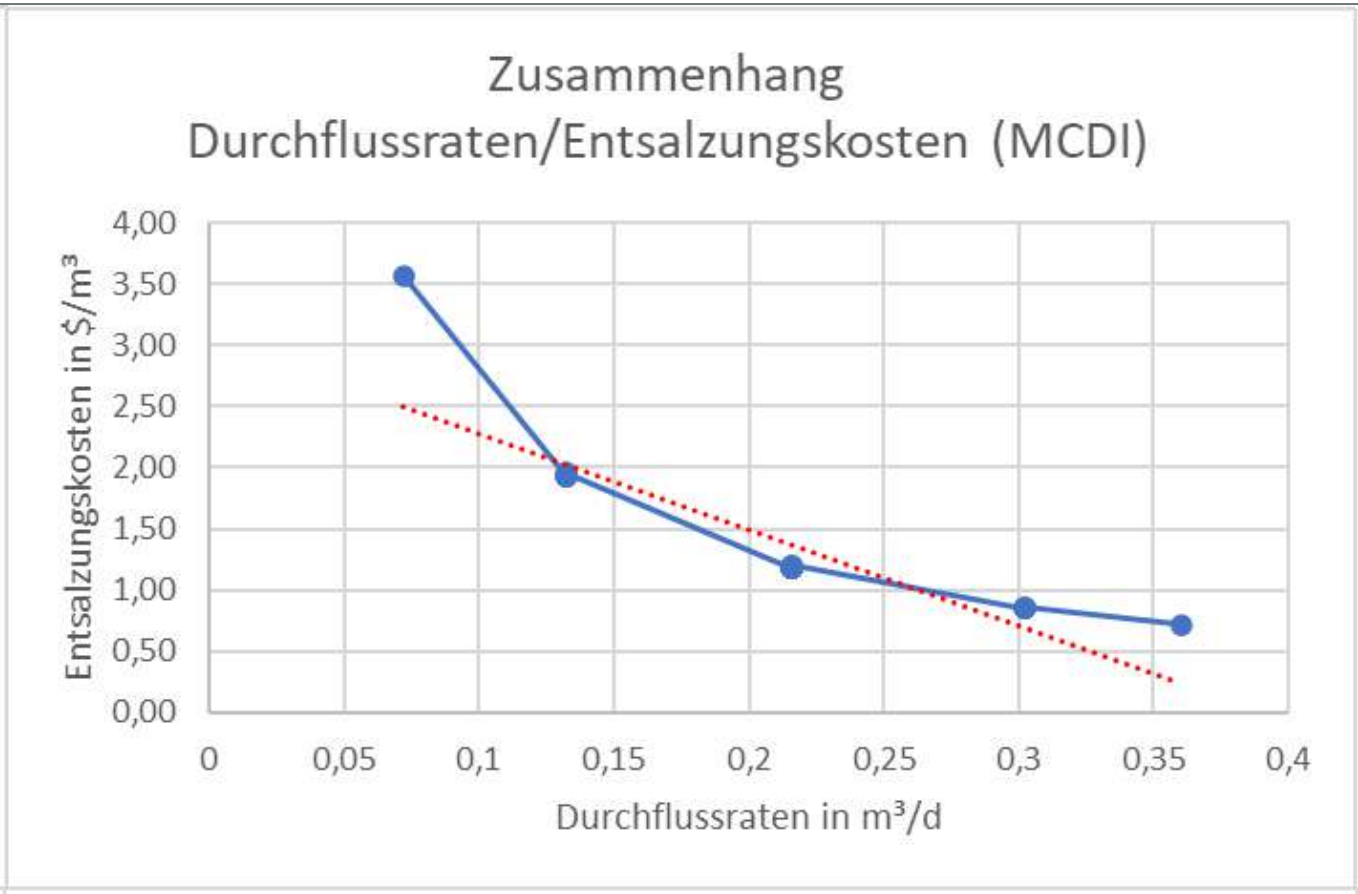


Veröffentlichte Energieverbräuche MCDI vs. RO (kWh/m³)

Werte in kWh/m <sup>3</sup>	Gesamtbasis	Vergleichsbasis
Maximalwert	3,45	2,30
Minimalwert	0,01	0,40
Spannweite	3,44	1,90
Mittelwert	0,28	1,45
Median	0,19	1,40

# Erfassung von Benchmarks

## Ökonomisch



Bilder: Scope (2021); T. Kaiser und K. Brune (2021)

### Vergleich der Kapitalkosten RO vs. MCDI

Werte in \$/m <sup>3</sup>	RO	MCDI
Maximalwert	0,122	0,014
Minimalwert	0,040	0,014
Spannweite	0,082	0,000
Mittelwert	0,070	0,014
Median	0,070	0,014

### Vergleich der Membrankosten RO vs. MCDI

Werte in \$/m <sup>2</sup>	RO	MCDI
Maximalwert	50,00	4.000,00
Minimalwert	13,00	5,00
Spannweite	37,00	3.995,00
Mittelwert	27,67	483,39
Median	20,00	68,00



# 2. Zwischenresultate

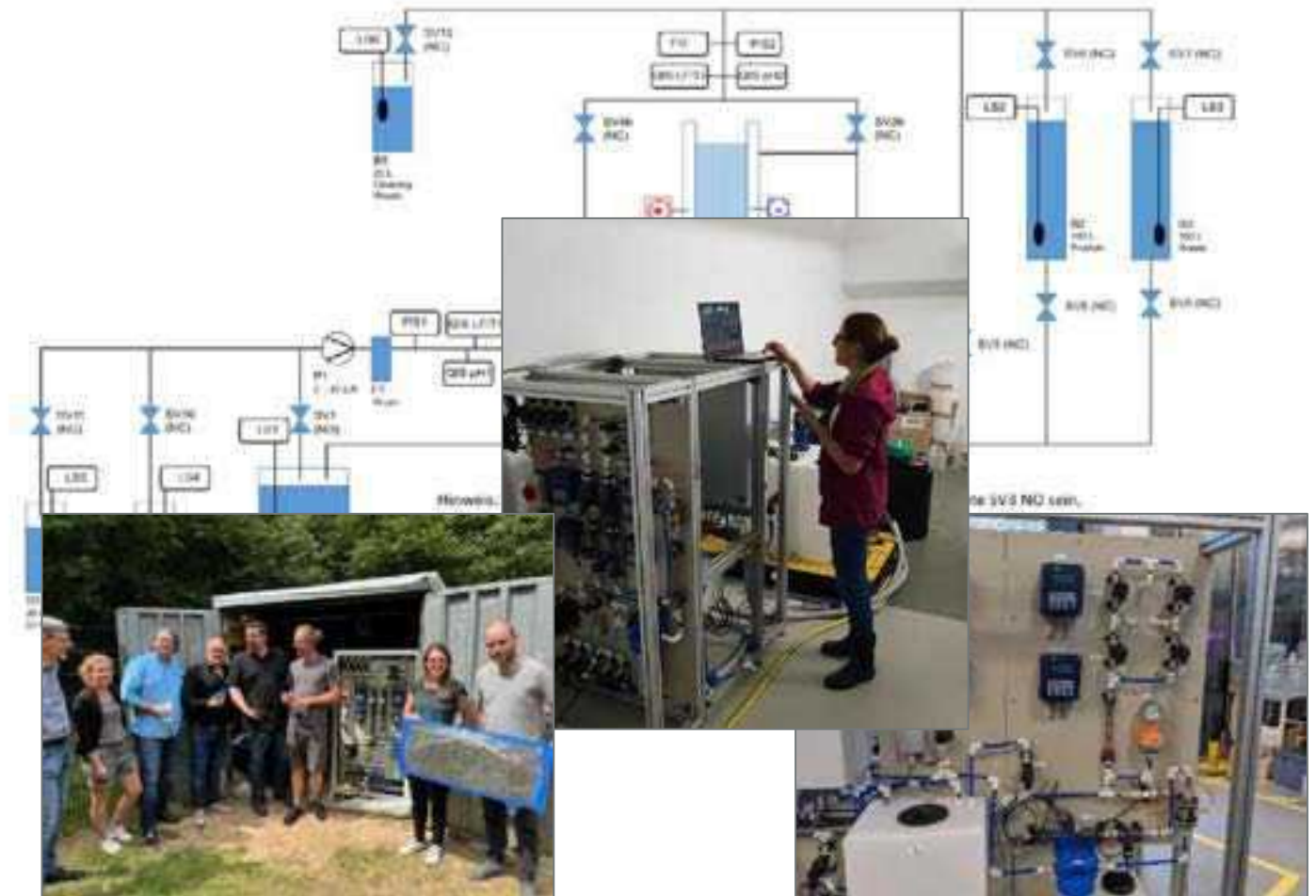
# Erfassung der (m)MCDI Labor-, Versuchs- und Pilotanlagen

- Aufbau der MCDI-Zelle
- Eingesetzte Materialien für Membran, Reinigung, Filter etc.
- Ablauf der Prozessschritte
- Chemische Analyse des Wassers
- Spezifische Standortfaktoren

## Im Laufe der Zeit:

- Neue Membrane
- Operative Betriebsparameter

## Transfer Labor- zur Pilotanlage



Bilder: D. Schödel & H. Rosentreter (2021); SMS Group (2021); D. Schödel (2023); OWV (2024)



# Besichtigung bei Projektpartnern



Bilder: C. Scope (2021-24)

# Dokumentation Membrane

z.B. in Form einer Tabelle

Bottle numbers	Membrane name short	Producer	Membrane complete name
3	AEM NF	IPF	NF Standard from Fumatech +AER
8	CEM on Vlies	IPF	Novatex 2484 Vlies, AMPS+DVB in DMSO
9	AEM on Vlies	IPF	Novatex 2484 Vlies, TATMPC in Ethanol
10	CEM on Vlies	IPF	Novatex 2484 Vlies, CEM=DVB+AMPS
11	AEM on Vlies	IPF	Novatex 2484 Vlies
11a	AEM on Vlies	IPF	Novatex 2484 Vlies
12	CEM on Vlies	IPF	Novatex 2484 Vlies, with Glycerine
12a	CEM on Vlies	IPF	Novatex 2484 Vlies
17	CEM on Vlies	IPF	Novatex 2484 Vlies, with interphase polymerisation (thinner layer than before)
18	AEM on Vlies	IPF	Novatex 2484 Vlies, interphase polymerisation (thinner layer than before)

Quelle: Membran über Wasser über Membran  
 - Quellung in Wasser bis max. Wasseraufnahme

g herstellen und hinzugeben

ellen und hinzugeben  
 d. 15cm Breite rakeln

Bilder: Exceltabelle innovation (2021-)

# Dokumentation Sachbilanzen

Bestandteil der Anlage	Haupt-komponenten	Firma	Masse (kg)	Menge (Anzahl Komponenten)	Preis (€)	Material*	Bezeichnung nach Ecoinvent Datenbank (openLCA)
Anlagengestell und weitere Bestandteile	Behälter 60 L	Tanks Direkt GmbH	18,00	3	349,89 €	Polypropylen	polypropylene, granulate
	Behälter 20 L	Tanks Direkt GmbH	4,00	2	139,10 €	Polypropylen	polypropylene, granulate
	Chemikalienbehälter 2 L	VWR	1,00	2	40,00 €	Glass	packaging glass, white
	Pumpe	KNF	0,19	1	278,00 €	Polypropylen, PTFE, EPDM	market for pump, 40W   pump, 40W   Cutoff, S
	Filterkerzen	MTS & APIC Filter GmbH & Co.KG	1,30	14	70,20 €	Polypropylen, SAN, EPDM, Polypropylen, sonstiger Kunststoff, ABS	polypropylene, granulate
	Gestell	MiniTec	99,44	123	1.039,30 €	Aluminium, stranggepresst, eloxiert E6/EV1-8, Stahl, verzinkt Aluminium, stranggepresst, eloxiert E6/EV7 Aluminium, Druckguss	section bar extrusion, aluminium, sheet rolling, steel   sheet rolling, steel   Cutoff, S
	Edelstahl Lenkrollen	Blickle	2,72	4	180,64 €	Edelstahl	sheet rolling, steel   sheet rolling, steel   Cutoff, S
	Rohre & Verbindungselemente	Wassertechnik Pro	22,60	226	669,44 €	Polypropylen, POM, Polyethylen	polypropylene, granulate, polyethylene, high density, granulate
	Versand				97,10 €	-	-

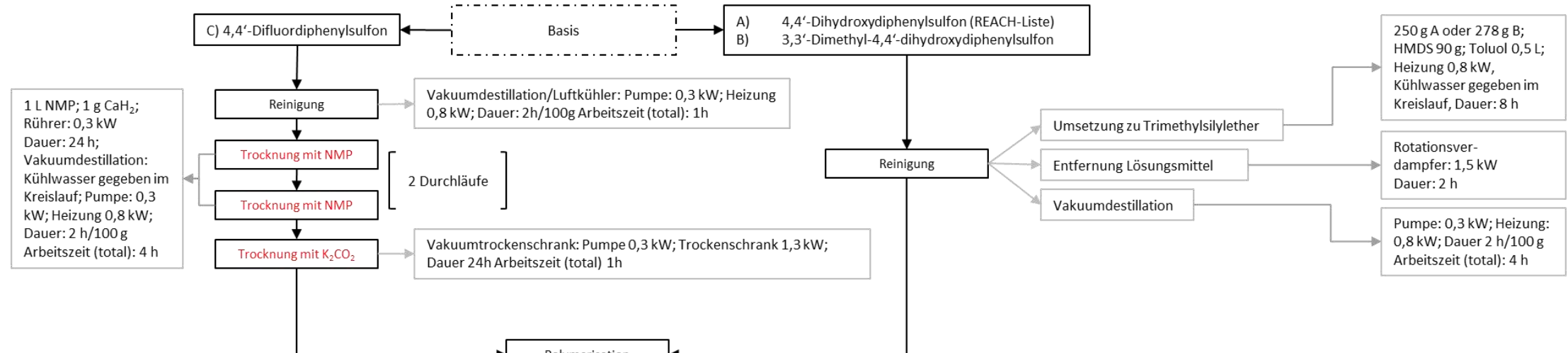
Bilder: C. Scope (2021-)



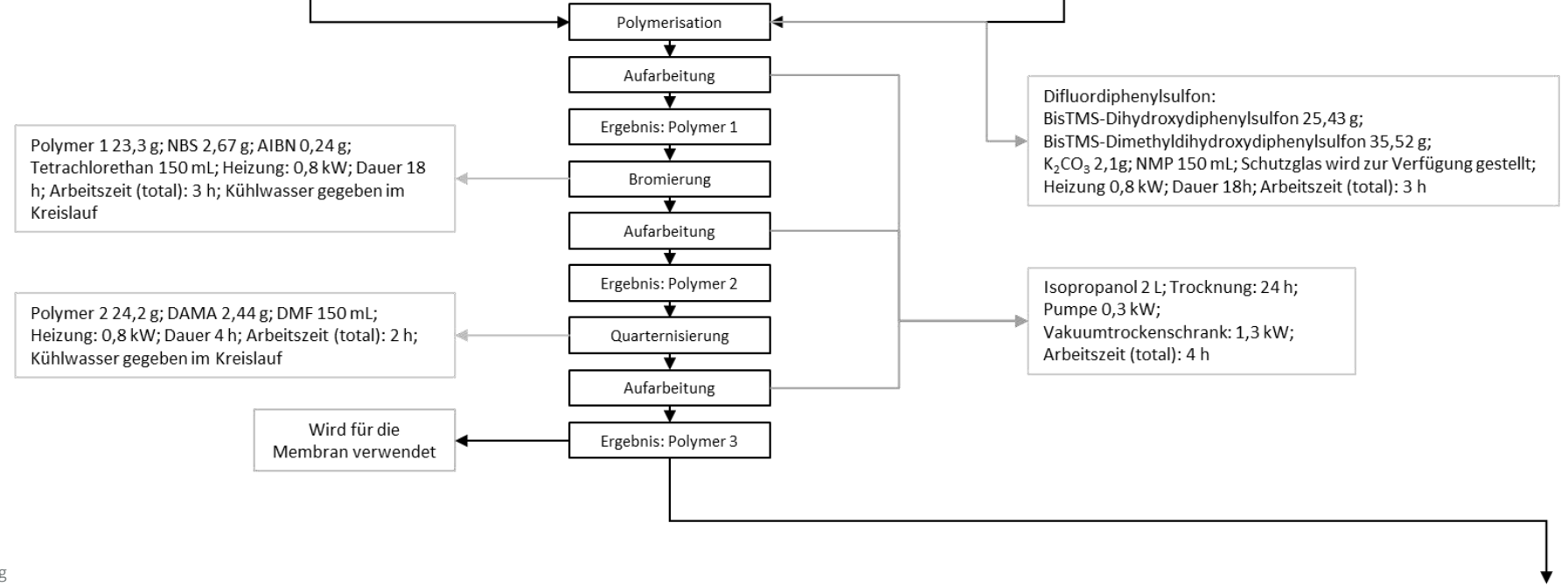
# Prozessfließschemen

## Herstellung Polymere

Folie 1




Folie 2



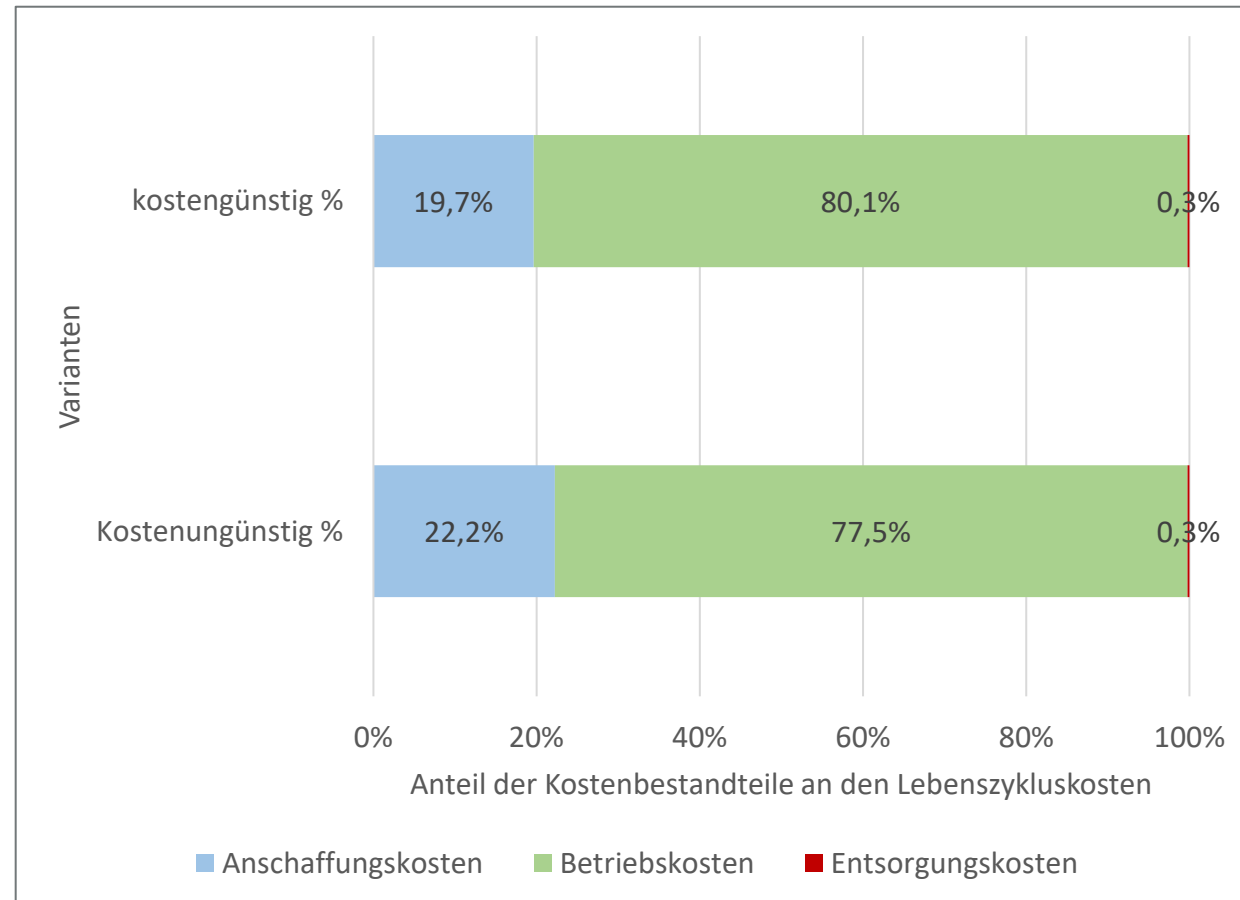
Bilder: Eigene Darstellung

# LCA-Screening für die Auswahl nachhaltiger Lösungsmittel

openLCA - EF 3.1 Method (adapted)	Isopropanol 1 kg	Toluene 1 kg	Ethanol-water 1 kg	NMP 1 kg	Reference unit
<i>Impact category</i>	<i>Result</i>				<i>Reference unit</i>
<b>Acidification</b>	7,91E-03	4,51E-03	8,47E-04	2,42E-02	mol H+-Eq
<b>Climate change (GWP100)</b>	1,96E+00	1,56E+00	2,42E-01	6,24E+00	kg CO2-Eq
Climate change - Biogenic (GWP100)	1,92E-03	1,08E-03	2,42E-04	7,92E-03	kg CO2-Eq
Climate change - Fossil (GWP100)	1,96E+00	1,55E+00	2,42E-01	6,23E+00	kg CO2-Eq
<b>Ecotoxicity, freshwater</b>	3,44E+00	2,37E-01	4,34E-01	2,00E+01	CTUe
Eutrophication, freshwater	2,15E-04	9,85E-06	9,51E-05	1,92E-03	kg P-Eq
Eutrophication, marine	9,79E-04	8,07E-04	1,55E-04	5,15E-03	kg N-Eq
<b>Human toxicity, carcinogenic</b>	4,19E-10	1,09E-10	6,27E-11	4,12E-09	CTUh
Human toxicity, non-carcinogenic	1,08E-08	1,25E-09	1,68E-09	6,55E-08	CTUh
Ionising radiation (human health)	8,11E-02	1,17E-04	4,40E-03	6,36E-01	kBq U235-Eq
Land use	1,84E+00	1,23E-02	3,85E-01	1,89E+01	dimensionless
Ozone depletion	2,30E-08	2,84E-10	2,03E-09	1,55E-07	kg CFC-11-Eq
Particulate matter	7,93E-08	5,45E-08	9,94E-09	2,76E-07	disease incidence
Photochemical ozone formation	8,08E-03	4,35E-03	1,19E-03	2,05E-02	kg NMVOC-Eq
<b>Resource use, fossils</b>	5,91E+01	5,98E+01	8,62E+00	1,11E+02	MJ, net calorific value
Resource use, minerals and metals	8,97E-06	3,66E-08	1,60E-06	4,25E-05	kg Sb-Eq
Water use (user deprivation potential)	6,45E-01	1,51E+00	1,10E-01	1,18E+01	m3 world eq. deprived
 openLCA 2.2.0 Copyright (c) 2007 - 2024 GreenDelta. All rights reserved. Visit <a href="http://openlca.org">http://openlca.org</a> and <a href="http://greendelta.com">http://greendelta.com</a> This product includes software developed in the openLCA project and other open source software.	isopropanol production   isopropanol   Cutoff, U	toluene production, liquid   toluene, liquid   Cutoff, U	ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene & tap water   RER	N-methyl-2-pyrrolidone production   N-methyl-2-pyrrolidone   Cutoff, U	

Bilder: C. Scope (2024) basierend auf Ecoinvent v 3.91 mit openLCA 2.2; GrenDelta (2024)

# LCC-Screening für die Investitionsentscheidung am Beispiel Langeoog



- Betrachtung über 15 Jahre
- Kleine Durchflussrate, WR
- Kleinere Zelle (derzeit 10)

WR in %***	50%
PPM***	326,94
Ort	Langeoog
Dauer in min*/***	0,5
Häufigkeit pro Reinigungsintervall**/**	200
Reinigungsmittel Säure***	Citronensäure
Stromtarif***	Deutscher Strommix
Durchflussrate in l/h***	10
Produktwasserqualität	Bewässerung
Anzahl (m)MCDI-Zellen	2
Membranhersteller***	Fumatech
Messinstrumente***	inkl. Messinstrumente

\*bezogen auf Purifying und Desorption

\*\*bezogen auf Pre-Purifying, Purifying und Desorption

\*\*\*einstellbar über Reiter "Cockpit Kosten"

Bilder: C. Scope (2024)

# 3. Diskussion



# Pläne für die aggregierte Bewertung

- Internes Feedback einholen
- Kombiniert = hotspots
- Nachhaltig = tradeoffs

## Im Sinne des SDG 6: (m)MCDI

- langfristige Wasserverfügbarkeit
- effiziente Wassernutzung
- Förderung eines Wasserressourcenmanagements

### 3. Need for water accounting

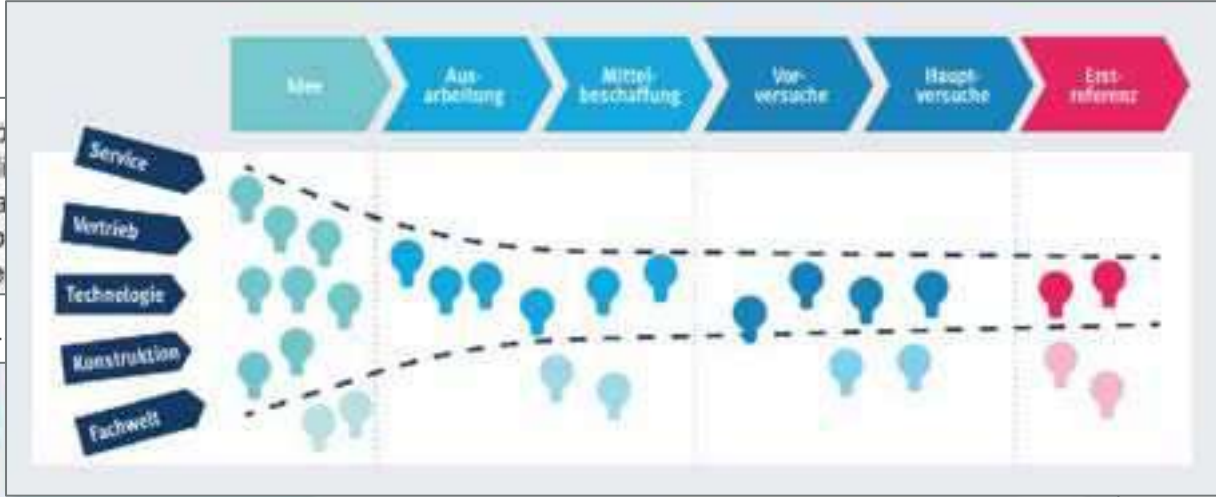
In order to manage water resources for effective, efficient, sufficient and consistent decision making companies require access to appropriate data. This could be volumetric information relating to the amount of water used in operations, it could relate to resources and stores available for current and future use, or it could be more complex data relating to the various aspects of water quality. Although there is currently a lack of consensus as to what consti-

porate context, Morrison et al. offers to a company's 'ability to measure water use and wastewater discharges emphasis is given to risk management aspects of water use, and potential for effective water accounting is an important water management for cleaner production to determine the impacts of their operations and discharges on communities and water-related risks, track the effects of water management practices, and credibly communicate to key stakeholders' (Morrison et al. 2009). The importance of water accounting information is highlighted upon considering extant research in water management which has shown many water-related business decisions on advertising are sometimes even guesswork (Ernst & Young 2010; Ridoutt et al., 2009).



Bilder: Christ & Burritt (2017:380), doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.147; BMUV (2023), <https://tinyurl.com/yc5zv2f6>

# Transfer Leitfaden Implementierung



Stand 14.03.2024

Wave

Inhaltsverzeichnis

- 1. Einleitung
- 2. Einleitung
- 3. Maßnahmen

Im Forschungsprozess Wässern für die Partner aus Praxis selektive Memb in neukonstrui

- 2.1.3 Adäquates Controlling
- 2.2 Technologieanbieter / Anlagenbauer
  - 2.2.1 Firmenkultur
  - 2.2.2 Ressourcenbereitstellung
  - 2.2.3 Projektleitung
  - 2.2.4 Garantien
- 2.3 Kosten
  - 2.3.1 Vergleich von Technologien
  - 2.3.2 Amortisationszeit
  - 2.3.3 Leidensdruck
  - 2.3.4 Zahlungsbereitschaft
  - 2.3.5 Förderung von Transferprojekten
  - 2.3.6 Prognosefähigkeit
  - 2.3.7 Sekundäre Rohstoffe und Konzentrate
- 2.4 Gesetzeslage
  - 2.4.1 Komplexe Genehmigungsverfahren und Stakeholderbeteiligung
  - 2.4.2 Politischer/Gesellschaftlicher Druck



Quelle: Screenshot des Leitfadens Wave II (2024)

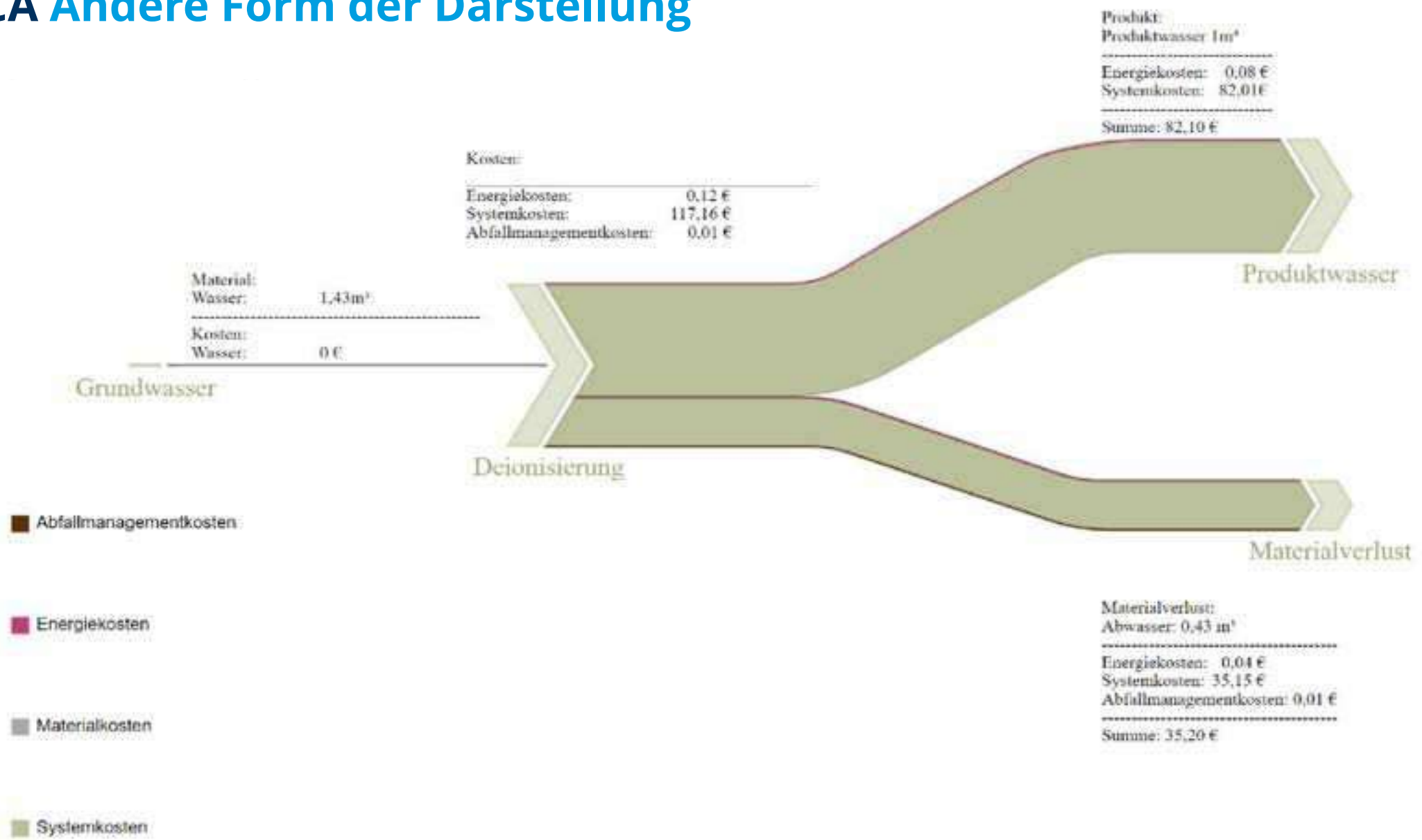
# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Bei weiteren Fragen: [www.tu-dresden.de/wwbwlbu](http://www.tu-dresden.de/wwbwlbu)  
[christoph.scope@tu-dresden.de](mailto:christoph.scope@tu-dresden.de)

Copyright of the Chair of Business Management, esp. Sustainability Management and Environmental Accounting, all rights reserved.  
Contents may not be copied, emailed, posted, or otherwise transmitted without the copyright holder's express written permission. Users may print, download or email slides for individual use only.

# BACKUP

# MFCA Andere Form der Darstellung



Quelle: C. Scope (2024)



# Dialog mit Wasserversorgern über die Praxisphase mit der mMCDI



Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband  
- Yannick Tiemann



Kreisverband für Wasserwirtschaft Nienburg  
- Joachim Oltmann



## Dialog mit Wasserversorgern über die Praxisphase mit der mMCDI

Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband  
Yannick Tiemann







## Dialog mit Wasserversorgern über die Praxisphase mit der mMCDI

Kreisverband für Wasserwirtschaft Nienburg,  
Joachim Oltmann



# Auswertung



TU Dresden – Hanna Rosentreter

# Zusammenfassung





# Diskussionsforen am 7.3.22 beim Online Workshop "Anforderungen an die selektive Entsalzung in der Praxis"

## Praxisnahe Anwendungen für die selektive Entsalzung

- Welche Stoffe können entfernt werden?
- Welche Konzentratbehandlung?
- Scaling und Fouling auf Membranen?
- Verblockungen durch Eisen/Mangan?
- Kosten?



## Selektive Verfahrenstechnik und Werkstoffe

- Einfluss von Prozessparameter und Ioneneigenschaften auf Selektivität?
- Werkstoffe müssen für Trinkwasser zugelassen sein!



## Durch Selektivität Nachhaltigkeit fördern

- Lösungsmittel NMP ersetzen
- Wartungsanfälligkeit?
- Energieverbrauch?
- Kosten?
- Welche Methodik für Nachhaltigkeitsbewertung?





# Schlusswort

TU Dresden – Prof. Dr.-Ing. André Lerch

**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit und die Diskussionen!**

... Bleiben Sie informiert:



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

Vielen Dank für die tolle Zusammenarbeit!

