Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben 01IF22337N

Thema

Elektrodynamische Antifouling-Beschichtung optischer Oberflächen von Schiffen und Meerestechnik

Zeitraum

01.03.2022 bis 30.04.2024

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e.V. (FSM)

Forschungseinrichtungen

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM

Universität Bremen, Zentrum für Umweltforschung und Umwelttechnologie (UFT)

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserchemie, Professur für Hydrochemie und Wassertechnologie

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FSM-Bericht 8/2025

Elektrodynamische Antifouling-Beschichtung optischer Oberflächen von Schiffen und Meerestechnik (ELEKTRA)

von

Dr.-Ing. Uwe Specht

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM

Dr. Michael Baune

Universität Bremen, Zentrum für Umweltforschung und Umwelttechnologie (UFT)

Dr. Fei Du

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserchemie, Professur für Hydrochemie und Wassertechnologie

Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e.V. (FSM*)*

Steinhöft 11

20459 Hamburg

Deutschland

Tel.: +49 40 69 20 876-12

Fax.: +49 40 69 20 876-66

E-Mail: info@fsm-net.org

Internet: www.fsm-net.org

© 2025
Alle Inhalte dieses Berichtes,
wie Text, Abbildungen und Tabellen,
sind urheberrechtlich geschützt

Zusammenfassung:

Das Forschungsprojekt ELEKTRA beschäftigte sich mit der Entwicklung einer elektrodynamischen Antifouling-Beschichtung für optische Oberflächen in maritimen Anwendungen. Die Projektlaufzeit erstreckte sich vom 01.03.2022 bis zum 30.04.2024 und wurde von der Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e.V. (FSM) administrativ begleitet. Beteiligt waren das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), die Universität Bremen (UFT) und die Technische Universität Dresden (TUD). Das Hauptziel des Projekts war die Entwicklung einer robusten, nanometerdicken Beschichtung zur aktiven Selbstreinigung von optischen Komponenten wie Sensoren und Kameras. Da diese Oberflächen im maritimen Umfeld häufig mit Biofouling konfrontiert werden, wurde ein neuartiges Verfahren auf Basis der Elektrohydrodynamik (AC-Elektrokinetik) entwickelt, das eine kostengünstige Nachrüstung bestehender Systeme ermöglicht. In der ersten Phase des Projekts wurden Zielgewässer definiert und die physikalischen Eigenschaften des Meerwassers analysiert, um die Elektrodengeometrie zur Unterdrückung von Biofouling zu optimieren. Darauf folgte die Entwicklung geeigneter ITO-Elektroden mittels selektivem Laserabtrag. Die Laborprüfungen zeigten, dass die entwickelten Elektroden eine signifikante Antifouling-Wirkung aufwiesen, unterstützt durch verschiedene elektrokinetische Effekte. Feldversuche in der Nordsee bestätigten die Wirksamkeit der ELEKTRA-Beschichtung, indem die Lichtdurchlässigkeit der beschichteten Oberflächen über einen Zeitraum von 36 Tagen signifikant höher blieb als bei Referenzoberflächen (siehe Abbildung unten). Zukünftige Arbeiten konzentrieren sich auf die Optimierung der Elektrodengeometrie, die Reduktion des Energieverbrauchs und die Erprobung weiterer Beschichtungen.

Die Ergebnisse des Projekts bieten nicht nur einen innovativen Ansatz zur Bekämpfung von Biofouling, sondern haben auch das Potenzial, die Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Unternehmen in der maritimen Technologie zu steigern. Die entwickelten Verfahren und Erkenntnisse sollen in zukünftige industrielle Anwendungen überführt werden.

Abbildung 1: 36 Tagen Helgoland-Auslagerung: links: freiliegende aktive Elektroden, Mitte und rechts: inaktive Elektroden und unbeschichteter Glasobjektträger mit Bewuchs.

Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Forschungsantrags

AP 1: Anforderungsanalyse und Simulationsgestützte Entwicklung der Elektrodenkonzepte (UFT, TUD, IFAM)

Ziel: Definition von Zielgewässern und Zusammensetzung der Organismen; Definition von Zielparametern und kritischen Kennzahlen, sowie Entwicklung optimierter Elektroden-geometrien zur Unterdrückung von Biofouling für definierte Anwendungsfälle.

Zielgewässeranalyse

In Diskussionen mit Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurden Zielgewässer definiert. Die vielfältigen Anwendungen z.B. für Unterwassersensoren, Beleuchtungen, Sichtfenster oder Kameras, AUV, können global eingesetzt werden. Yachten, Kreuzfahrtschiffe AUV, Wassermontoring oder die Überwachung kritischer Infrastruktur bedingen unterschiedliche Wasserparameter (Salzgehalt und Temperaturen) und ein kontinuierlich hoher Bewuchsdruck sodass globale Wasserparameter (Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert, Fouling-Partikeleigenschaften) berücksichtigt werden müssen. Die wichtigsten Parameter des Meerwassers selbst, in einem dielektrophoretischen (DEP) System, sind seine elektrische Leitfähigkeit und Permittivität. Aus einer Literaturrecherche geht hervor, dass die elektrische Leitfähigkeit an der Oberfläche des globalen Meerwassers in einem Bereich zwischen 0,0999 und 6,45 S/m liegt, wobei die Temperatur zwischen -1,84 °C und 30,6 °C und der Salzgehalt zwischen 5,02 und 40,1 ppt liegt [1]. Wie aus den obigen Daten hervorgeht, schwankt die elektrische Leitfähigkeit stark und hängt von der Temperatur und dem Salzgehalt ab. Der Mittelwert der elektrischen Leitfähigkeit an der Oberfläche des Meerwassers beträgt 3,31 ±0,23 S/m [1]. Die elektrische Leitfähigkeit des Meerwassers ist auch von der Gewässertiefe abhängig [2]. Die großen Temperatur- und Salzgehaltsunterschiede in verschiedenen Meerwassertiefen beeinflussen die elektrische Leitfähigkeit des Meerwassers erheblich. Vor allem in Tiefen unter 1000 m kann die elektrische Leitfähigkeit stark abnehmen, von etwa 6 auf 3,2 S/m [2]. Die über die Tiefe gemittelte elektrische Leitfähigkeit liegt für den globalen Ozean zwischen 0,212 und 6,36 S/m [1]. Insgesamt könnte der Bereich der elektrischen Leitfähigkeit von Meerwasser zwischen 0,0999 S/m und 6,36 S/m liegen. Die Permittivität des Meerwassers ist dabei temperaturabhängig und nimmt mit steigender Temperatur ab und liegt zwischen 76 (ca. 0 °C) und 66 (ca. 35 °C) [3]. Der pH-Wert des Meerwassers in der Ostsee ist immer höher als 8 und stellt eine basische Umgebung dar. Die Meeresmikroben im Meerwasser sind recht unterschiedliche Mikroorganismen, darunter Bakterien, Mikroalgen, Archaeen, Protozoen, Pilze

und Viren. Ihre Konzentration kann zwischen 10^5 und 10^7 Partikel pro Milliliter Meerwasser betragen, je nach Tiefe und Größe der Mikroben. Die Größe der Partikel variiert zwischen Nanometern und Millimetern. Alle Zellmembranen sind nicht leitfähig und das Zytoplasma hat die höchste Leitfähigkeit von 0,5 S/m. Daher liegt die maximale Leitfähigkeit sowohl lebensfähiger als auch nicht lebensfähiger Zellen unter 0,5 S/m, also viel niedriger als die des Meerwassers.

Simulationsgestützte Auslegung der transparenten Oberflächenelektroden

Theoretische Modellbildung als Grundlage der Elektrodenauslegung: Die Grundlage der simulationsgestützten Auslegung der Elektroden bildet ein entwickeltes theoretisches physikalisches Modell der Elektratechnologie. *Dieses im Natur-Fachjournal: Scientific Reports eingereichte und publizierte Modell* [4] ist im Folgenden dargestellt, und beschreibt die wirkenden Kräfte auf die Foulingpartikel.

Auf das Fluid wirkende Kräfte

ACET (engl. alternating current electrothermal flow)**:** Der Temperaturgradient, der durch die Joulesche Erwärmung in einem inhomogenen elektrischen Feld entsteht, führt zu lokalen Veränderungen der Leitfähigkeit und der Permittivität. Die Wechselwirkung zwischen der Inhomogenität von Leitfähigkeit und Permittivität und dem elektrischen Feld über den Elektra-Elektroden führt zu einer Flüssigkeitsströmung. Bei wässrigen Systemen mit hoher Leitfähigkeit (z. B. Meerwasser) kann eine starke Antriebskraft erzeugt werden, die bei einer geringen Eingangsspannung ACET-Wirbel hervorruft. Die volumetrische ACET-Kraft kann wie folgt ausgedrückt werden,

$$\mathbf{F}_{\mathrm{ET}}=\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_{\mathrm{m}}(\alpha-\beta)}{1+(\omega\tau)^2}(\nabla T\cdot\mathbf{E})\mathbf{E}-\frac{1}{4}\varepsilon_{\mathrm{m}}\alpha|\mathbf{E}|^2\nabla T \qquad (1)$$

wobei $\mathbf{E}=-\nabla\varphi$ der Vektor des elektrischen Feldes (effektiv) und φ das elektrische Potential ist, $\omega=2\pi f$ beschreibt die Winkelfrequenz des elektrischen Wechselfeldes, f die Frequenz des elektrischen Feldes, $\tau=\varepsilon_{\mathrm{m}}/\sigma_{\mathrm{m}}$ die Ladungsrelaxationszeit, $\varepsilon_{\mathrm{m}}=\varepsilon_{\mathrm{r,m}}\varepsilon_0$ und σ_{m} sind die Dielektrizitätskonstante und die Leitfähigkeit des Mediums; $\varepsilon_{\mathrm{r,m}}$ ist die relative Dielektrizitätskonstante des Mediums, $\varepsilon_0=8.854\times10^{-12}$ F/m ist die Dielektrizitätskonstante des Vakuums, T ist die Temperatur des Systems, und α und β sind die beiden thermischen Diffusionskoeffizienten. Für wässrige Lösungen sind die numerischen Werte von α und β angenähert als $\alpha=(\partial\varepsilon_{\mathrm{m}}/\partial T)/\varepsilon_{\mathrm{m}}\approx$ -0,04 (K^{-1}) und $\beta=(\partial\sigma_{\mathrm{m}}/\partial T)/\sigma_{\mathrm{m}}\approx$ 0,02 $(\mathrm{K})^{-1}$[24].

Auftrieb . Zusätzlich zu ACET kann die Joulesche Erwärmung (die in stark leitenden wässrigen Lösungen auftritt) lokale Dichteunterschiede in der Flüssigkeit verursachen und die

auftriebsbedingte natürliche Konvektion verstärken. In einem ACET-System mit charakteristischen Abmessungen (d. h. Elektrodenbreite oder -abstand) von mehr als 1 mm treibt die Auftriebskörperkraft die Strömungsrezirkulation an, die die ACET-Strömung übertrifft und die Gesamtbewegung der Flüssigkeit dominiert. Der Ausdruck für die Auftriebskraft pro Volumeneinheit lautet

$$\mathbf{F}_b=\Delta\rho_m\mathbf{g}=\left(\partial\rho_m/\partial T\right)\Delta T\mathbf{g} \qquad (2)$$

wobei ρ_m die Dichte des Mediums ist und **g** die Gravitationsbeschleunigung ist.

Kräfte auf Teilchen

DEP. Wenn Schwebeteilchen einem ungleichmäßigen elektrischen Feld ausgesetzt werden, interagieren ein induziertes Dipolmomente mit dem elektrischen Feld, was zu einer DEP-Bewegung führt. Die Richtung der Partikelbewegung wird durch den Unterschied in der Polarisierbarkeit zwischen Partikel und Suspensionsmedium bestimmt. Sind die Partikel stärker polarisierbar als das Suspensionsmedium, erfahren sie positive DEP-Kräfte (pDEP) und bewegen sich in Richtung des Bereichs mit hoher elektrischer Feldstärke. Umgekehrt erfahren Partikel, die weniger polarisierbar sind als das Suspensionsmedium, negative DEP-Kräfte (nDEP) und werden daher von dem Bereich mit hoher elektrischer Feldstärke abgestoßen. In leitfähiger wässriger Suspension erfahren Feststoffteilchen aufgrund ihrer geringeren Polarisierbarkeit eine abstoßende nDEP-Kraft. Die zeitlich gemittelte DEP-Kraft, die auf ein kugelförmiges Teilchen wirkt, kann wie folgt berechnet werden:

$$\mathbf{F}_{DEP}=2\pi a^3\varepsilon_m\mathrm{Re}[K(\omega)]\nabla|\mathbf{E}|^2 \qquad (3)$$

wobei *a* der Radius des kugelförmigen Teilchens ist, $K(\omega)$ der frequenzabhängige Clausius-Mossotti-Faktor ist:

$$K(\omega)=\frac{\varepsilon_p^*-\varepsilon_m^*}{\varepsilon_p^*+2\varepsilon_m^*}. \qquad (4)$$

Hier sind ε_p^* und ε_m^* die komplexe Dielektrizitätskonstante des Teilchens bzw. des Mediums, $\varepsilon^*=\varepsilon-j\sigma/\omega$ wobei die Dielektrizitätskonstante $\varepsilon=\varepsilon_r\varepsilon_0$, die relative Dielektrizitätskonstante ε_r und die elektrische Leitfähigkeit σ bedeuten.

Strömungswiderstand. Wenn eine Relativbewegung zwischen Flüssigkeit und Fouling-Festkörper besteht, übt die Flüssigkeit eine Widerstandskraft auf die Partikeloberfläche aus. Für kugelförmige Teilchen kann die Widerstandskraft wie folgt ausgedrückt werden:

$$\mathbf{F}_{\text{Drag}} = \frac{1}{2}\pi a^2 \rho_{\text{m}} C_{\text{D}} (\mathbf{u}\text{-}\mathbf{v})^2 \qquad (5)$$

wobei C_D der von der Reynoldszahl abhängige Widerstandskoeffizient der Partikel, **u** die Strömungsgeschwindigkeit und **v** die Partikelgeschwindigkeit ist.

Schwerkraft. In einem Gravitationsfeld unterliegt ein Festkörper den Auftriebskräften, die von der umgebenden Flüssigkeit ausgeübt werden. Für kugelförmige Teilchen beträgt diese Auftriebskraft

$$\mathbf{F}_{\text{g}} = \frac{4}{3}\pi a^3 \left(\rho_{\text{p}} \text{-} \rho_{\text{m}}\right) \mathbf{g} \qquad (6)$$

wobei ρ_p die Dichte des Teilchens ist.

Gestaltungsgrundsätze:

Das Konstruktionsprinzip des vorgeschlagenen Antifouling-Systems für Unterwasseroberflächen ist in **Abbildung 2** dargestellt. Es ist zu beachten, dass die vorgeschlagene Technologie für die praktische Reinigung von Unterwasseroberflächen eingesetzt werden soll. In diesem AP wurden lediglich die Durchführbarkeit und die Abhängigkeiten in einem laborgestützten Aufbau als Proof-of-Concept-Studie untersucht. Konkret wird eine Anordnung asymmetrischer, ineinandergreifender Elektroden entworfen. Transparentes ITO wird als Elektroden auf der Oberfläche von Unterwassergeräten gewählt, um DEP-Kräfte und Flüssigkeitsströme zu erzeugen. Viele Partikel haben im Vergleich zu Meerwasser eine geringere Polarisierbarkeit, so dass sie bei nDEP von der Oberfläche wegbewegt werden. In der Zwischenzeit erzeugen die durch die Joule'sche Erwärmung induzierten Strömungen, d. h. ACET und Auftrieb, asymmetrische Wirbel in der Nähe der Elektrodenoberflächen und unidirektionale Flüssigkeitsströmungen weg von den Elektroden. Durch die synergetische Wechselwirkung zwischen der asymmetrischen Wirbelströmung und dem nDEP-Effekt werden Partikel, die sich auf der Oberfläche optischer Geräte ablagern, nach oben gehoben und durch die unidirektionale Flüssigkeitsströmung aus dem System getrieben. Um die Fähigkeit der Oberflächen-Antifouling-Strategie besser zu bewerten, wurde eine kombinierte Wirkung der Netto-Strömungsgeschwindigkeit auf den Oberflächen und der nDEP-Geschwindigkeit der Trübungspartikel mit dem vorgeschlagenen Modell numerisch simuliert.

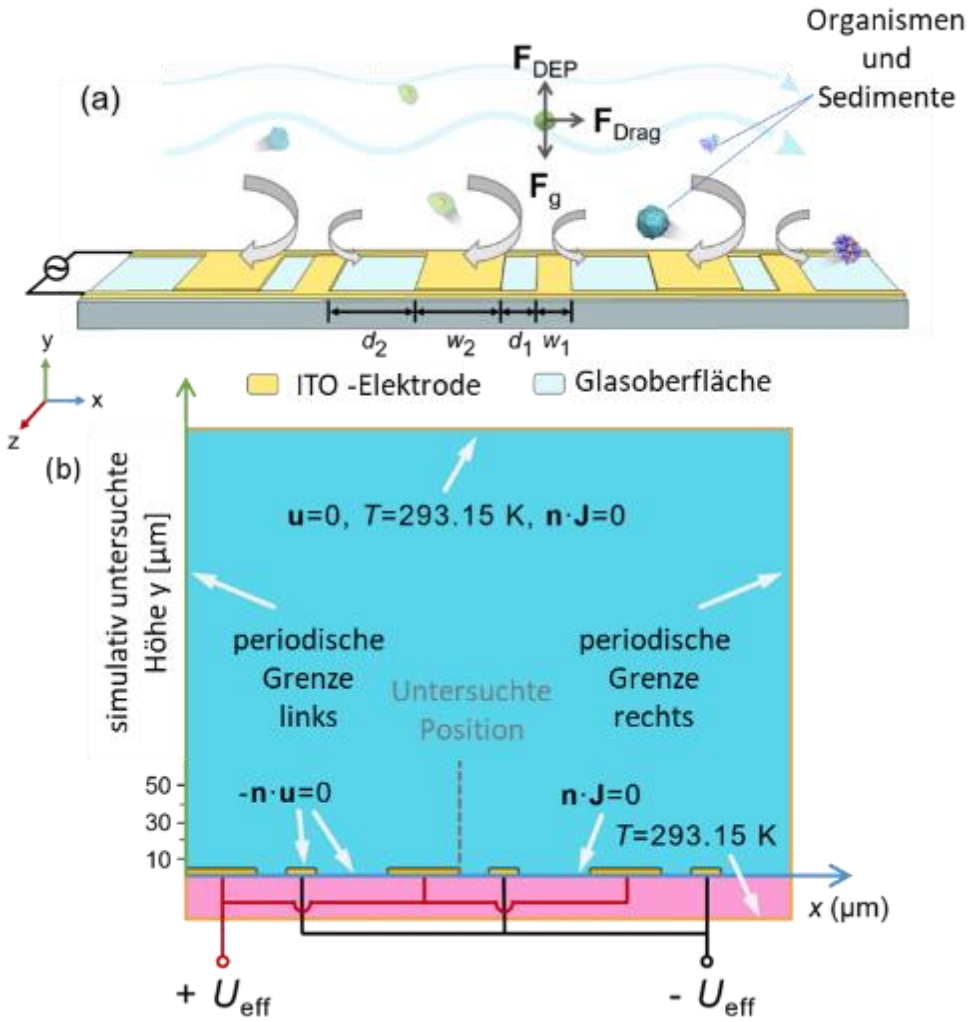

Abbildung 2: (a) Skizze des vorgeschlagenen Unterwasser-Antifouling-Systems mit (b) Berechnungsgebiet und Randbedingungen für die numerischen Simulationen.

Durchgeführte numerische Simulationen zur Elektrodenauslegung

Bestimmende Gleichungen

Das Finite-Elemente-Softwarepaket COMSOL Multiphysics 5.5 wurde verwendet, um numerische Simulationen durchzuführen und die Wirksamkeit eines ACET-basierten Oberflächen-Antifouling-Systems zu bewerten. Um das System zu vereinfachen, reduzierten wir die Variablen, indem wir den Abstand zwischen den Elektroden (d_1) gleich der Größe der kleinen Elektrode (w_1) und den Abstand zwischen den Elektrodenpaaren (d_2) gleich der Größe der großen Elektrode (w_2) beließen. Das bestimmende Seitenverhältnis r wird eingeführt, um den Grad der Asymmetrie der Elektrodenanordnung zu charakterisieren, und wird wie folgt angegeben

$$r=w_2/w_1 \qquad (7)$$

Der Simulationsrahmen besteht aus einem zweidimensionalen Modell, das Elektrostatik, Wärmeübertragung und laminare Strömung einbezieht. Zusätzlich wird das Partikelverfolgungsmodul verwendet, um die Effizienz des Systems in Bezug auf die Partikeltrajektorien zu untersuchen. In einem System mit starken Temperaturschwankungen weicht die Strömungsdynamik des durch die elektrothermische Kraft erzeugten Wirbels erheblich von den Vorhersagen herkömmlicher Modelle ab, die eine kleine Temperaturannäherung verwenden.

Die Energiebilanzgleichung löst den Joule'schen Erwärmungseffekt unter dem elektrischen Wechselfeld durch Kopplung des elektrischen Feldes und des thermischen Feldes:

$$\nabla\cdot(k_{\mathrm{m}}(T)\nabla T)+\frac{\sigma_{\mathrm{m}}(T)}{2}|\mathbf{E}|^2=0 \qquad (9)$$

wobei k_{m} die Wärmeleitfähigkeit des Mediums in Abhängigkeit von der Temperatur ist.

Die Lösung des Strömungsfeldes basiert auf der Kontinuitätsgleichung und den Navier-Stokes-Gleichungen:

$$\rho_{\mathrm{m}}(T)\mathbf{u}\cdot\nabla\mathbf{u}=-\nabla P+\nabla\cdot(\eta(T)\nabla\mathbf{u})+\mathbf{F_{ET}}+\mathbf{F_b} \qquad (10)$$

$$\nabla\cdot\left(\rho_{\mathrm{m}}(T)\mathbf{u}\right)=0 \qquad (11)$$

wobei η die dynamische Viskosität des Mediums ist, die mit der Flüssigkeitstemperatur zusammenhängt, und *P der* Druck des Strömungsfeldes ist.

Die Trajektorien von Teilchen, die durch Strömungswiderstand, Schwerkraft und DEP-Kräfte beeinflusst werden, werden durch das zweite Newtonsche Gesetz gelöst:

$$\frac{\mathrm{d}(m_{\mathrm{p}}\mathbf{v})}{\mathrm{d}t}=\mathbf{F}_{\mathrm{Drag}}+\mathbf{F}_{\mathrm{g}}+\mathbf{F}_{\mathrm{DEP}} \qquad (12)$$

wobei m_{p} die Teilchenmasse und t die Zeit ist.

Berechnungsgebiet und Randbedingungen

In dieser numerischen Studie kann das berechnete System auf eine zweidimensionale Geometrie vereinfacht werden, da die Elektroden im Vergleich zu ihrer Höhe und Breite lang sind (Abbildung 2). Das Berechnungsgebiet besteht aus drei Gruppen asymmetrischer Plattenelektroden, die auf einem 1,1 mm dicken Glassubstrat (Objektträger) eingebettet sind, wobei sowohl für die linke als auch für die rechte Begrenzung periodische Randbedingungen gelten. Für das elektrische Feld sind die Geräteoberfläche (ohne die Elektrode) und die obere Flüssigkeitsgrenze elektrisch isolierend mit $\mathbf{n}\cdot\mathbf{J}=0$, wobei **n** der Einheitsnormalvektor ist und

$\mathbf{J}=\sigma_m\mathbf{E}$ die Stromdichte ist. Für das Strömungsfeld wird die Flüssigkeitsgeschwindigkeit an der oberen Grenze als stationär mit einer Geschwindigkeit von u=0 angenommen, während die Flüssigkeitsgeschwindigkeit an den beiden Oberflächen der Elektroden und des Glassubstrats als Gleitgrenze gegeben ist mit $-\mathbf{n}\cdot\mathbf{u}=0$ aufgrund der Glätte der Materialoberflächen. Da sich das Gerät in einer unendlich großen natürlichen Flüssigkeitsumgebung befindet (im Vergleich zur Größe des Geräts selbst), werden die obere Grenze der Flüssigkeit und die untere Grenze des Geräts als bei Raumtemperatur (T = 293,15 K) befindlich angenommen.

Studie zur Unabhängigkeit von Modell und Netz

Das in dieser Studie verwendete Modell wurde durch den Vergleich numerischer Simulationen der Feldverteilungen mit Literaturwerten von Williams [5] validiert. Wie in Abbildung 3 dargestellt, stimmen das simulierte elektrische Feld und die Strömungsmuster gut mit denen aus der Grundlagenliteratur überein, was auf eine gute Genauigkeit unseres Modells hindeutet. Darüber hinaus zeigt die angepasste Beziehung zwischen der Geschwindigkeit und der angelegten Spannung (siehe Abbildung 4), dass die Durchflussrate proportional zur Potenz von 5,28 der Spannung ist.

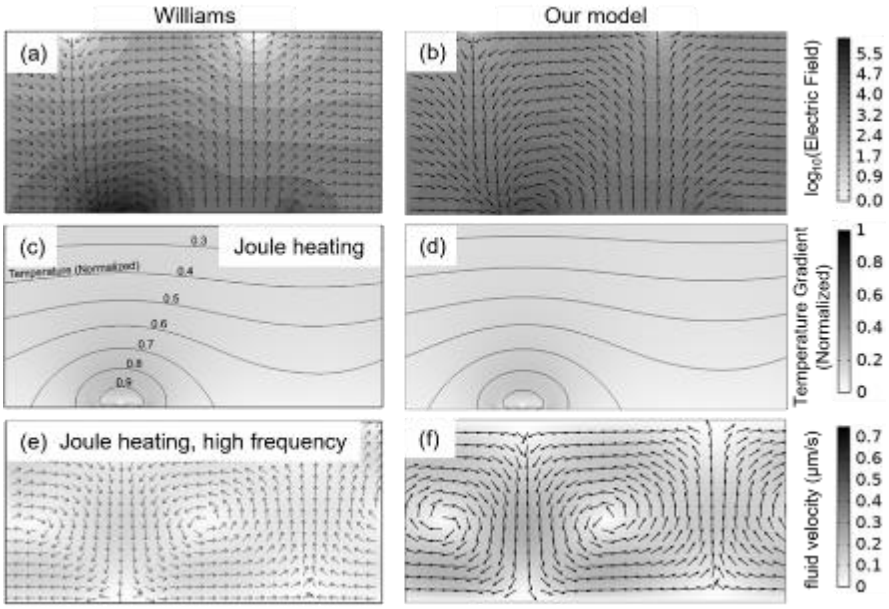

*Abbildung 3: Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Literatur: (a, c, e) Berechnungen von Williams [5] und (b, d, f) Berechnungen mit dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Modell; (a, b) elektrisches Feld; (c, d) Temperaturfeld; (e, f) Strömungsfeld. (Ueff = 1 V, σ = 1 S/m, und f = 2*1010 Hz für die obigen Simulationen).*

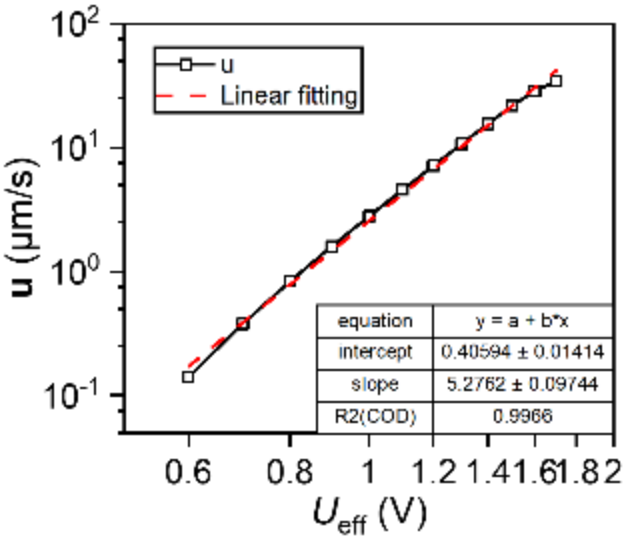

Abbildung 4: Lineare Anpassungsbeziehung zwischen Geschwindigkeit und angelegter Spannung. (w1 = 40 µm, r = 5, σ = 5,31 S/m, und f = 100 kHz)

Für das Modellsystem wurde eine Studie zur Netzunabhängigkeit durchgeführt (siehe Abbildung 5), um zuverlässige Simulationsergebnisse unabhängig von der Netzgröße zu erhalten. Die maximalen relativen Abweichungen des Strömungsfeldes und des elektrischen Feldes zwischen Simulationsergebnissen mit unterschiedlichen Maschenzahlen von 426.938 und 329.865 betragen 1,22 % bzw. 1,03 %. Eine weitere Erhöhung der Maschenzahl hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnungen, erhöht aber die Rechenkosten erheblich. Daher wurde in dieser Studie eine Gesamtmaschenzahl von 329.865 im Rechengebiet gewählt.

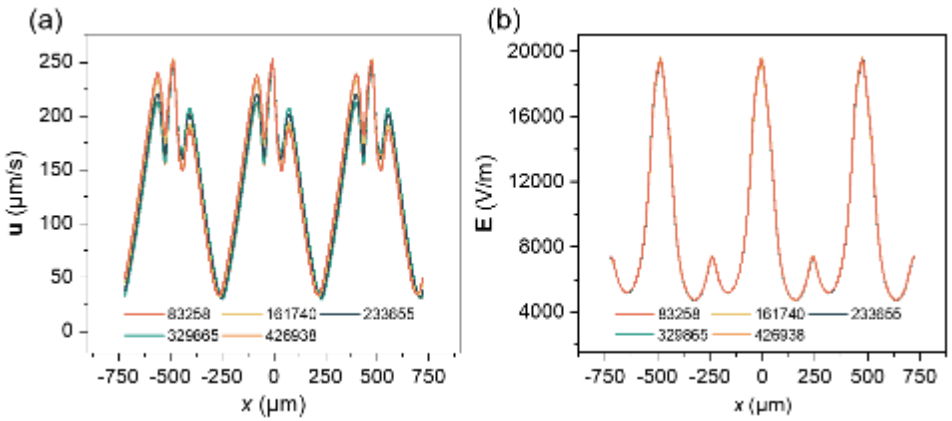

Abbildung 5: Validierung der Maschenunabhängigkeit: Verteilung (a) des Flüssigkeitsdurchsatzes, (b) des elektrischen Feldes. (w1 = 40 µm, y = 25 µm, w1: w2 = 5, Ueff = 2 V, σ = 5,31 S/m, und f = 100 kHz)

Aufgrund der viel höheren Leitfähigkeit und Permittivität des Meerwassers haben alle Meeresmikroben im Meerwasser einen negativen DEP-Effekt bei Frequenzen unter 1MHz. Das bedeutet, dass in einem DEP-System alle Mikroben im Meerwasser von den Elektroden wegbewegt werden, wo die elektrische Feldstärke hoch ist, was zu einem negativen DEP-Effekt führt. Daher werden in der in diesem Projekt durchgeführten Simulation alle Partikel (Feststoffe und Zellen im Meerwasser) als nDEP-Partikel betrachtet.
Die DEP-Kraft von Partikeln im Meerwasser ist dabei proportional zur Partikelgröße. Aufgrund des großen Unterschieds zwischen Nanometern und Mikrometern bei den Partikeln im Meerwasser variiert das erforderliche elektrische Feld sehr stark und kann nur sehr schwer zur Entfernung aller kleinster Partikel eingesetzt werden. Daher wird ein anderer elektrokinetischer Effekt, der elektrohydrothermische Effekt (ETE), als Hauptmechanismus zur Bewegung von Partikeln betrachtet. Der elektrothermische Effekt ist eine Flüssigkeitsströmung, die durch einen Temperaturgradienten ausgelöst wird, der durch Joulesche Erwärmung in einem inhomogenen elektrischen Feld entsteht. Die induzierte Flüssigkeitsströmung ist unabhängig von der Partikelgröße. Wenn also nur ein ausreichend großer ETE-Fluidstrom induziert wird, werden kleine Partikel entfernt, um die Reinigungsfunktion zu erreichen. Daher wird die Untersuchung des Einflusses der Parameter und der Konstruktionsregeln eines solchen elektrokinetischen Systems zunächst mit einer theoretischen Simulation des ETE-induzierten Flüssigkeitsstroms durchgeführt.
Bei einer asymmetrischen Elektrodenkonfiguration sind die Elektrodengröße und das Verhältnis der Elektroden Schlüsselparameter, die die Verteilung des elektrischen Feldes und damit den Flüssigkeitsstrom bestimmen. Je größer das Verhältnis der Elektroden ist, desto höher ist die Geschwindigkeit und die Arbeitshöhe der induzierten ETE-Flüssigkeit, siehe Abbildung 6. Das bedeutet, dass die höhere Asymmetrie der Elektrodenkonfiguration, die ein inhomogeneres elektrisches Feld hervorruft, eine höhere Geschwindigkeit des ETE-Fluidstroms erzeugen kann.

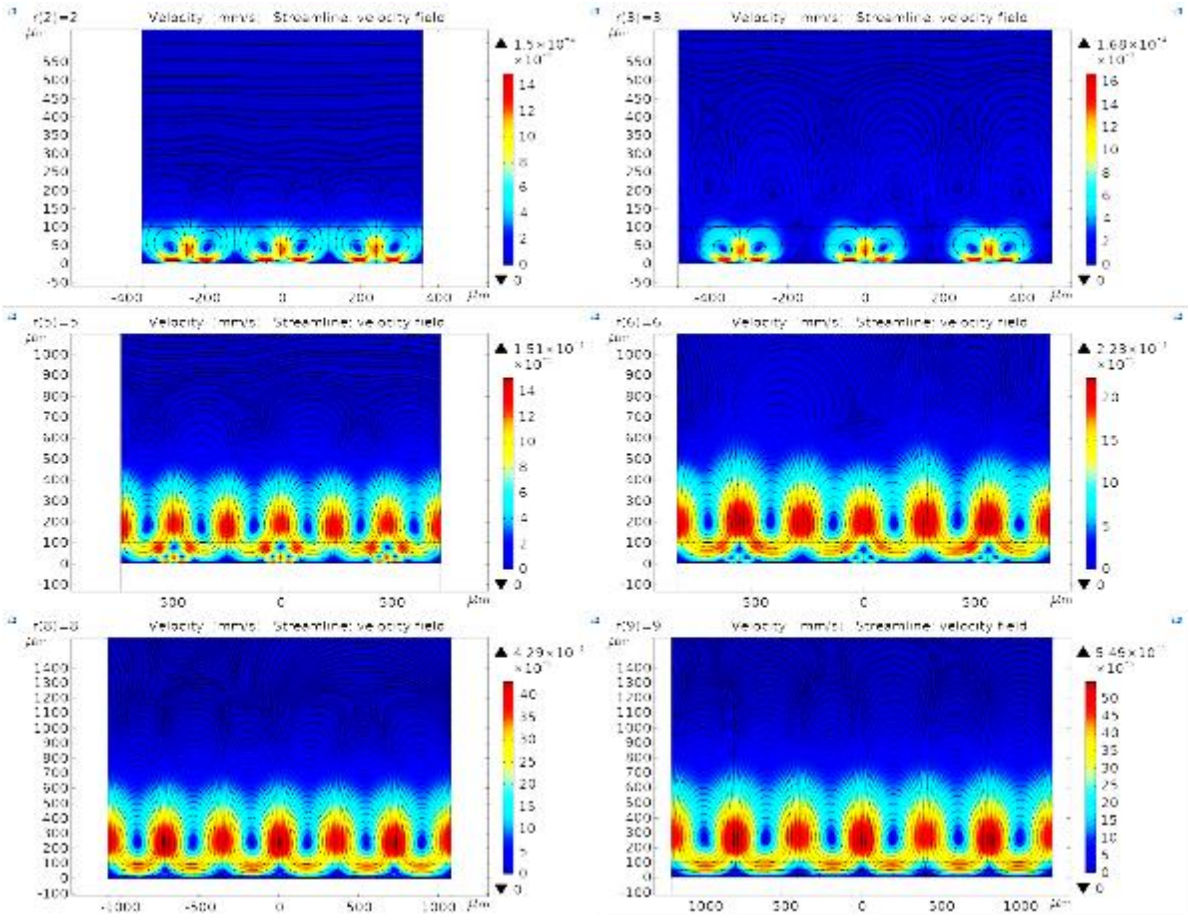

Abbildung 6: ETE-Flüssigkeitsströme aus den Simulationen (Leitfähigkeit von 1 S/m), die in an beispielhaften, verschiedenen Elektrodenkonfigurationen mit unterschiedlichem Elektrodenverhältnis induziert werden. Die angelegte Spannung betrug 0,5 Veff bei einer Frequenz von 200 kHz.

Es ist sehr interessant festzustellen, dass die Strömungsprofile bei den verschiedenen Elektrodenkonfigurationen recht unterschiedlich sind. Wenn das Verhältnis der Elektrodenkonfiguration unter 3 liegt, scheint es nur einen Wirbel über den Elektroden zu geben, wie das Beispiel von r = 3 in Abbildung 3 zeigt. Es gibt zwei Arten von Wirbeln über den Elektroden, wenn das Verhältnis der Elektroden über r > 3 erhöht wird. Während an den Elektrodenrändern kleine Wirbel mit einer Höhe von weniger als 50 µm über der Elektrodenoberfläche mit größerer Geschwindigkeit beobachtet werden, entstehen größere Wirbel mit geringerer Geschwindigkeit und entgegengesetzter Drehrichtung zu den kleineren Wirbeln meist zwischen 50 und bis zu 650 µm Höhe. Oberhalb von 650 µm wird eine unidirektionale Flüssigkeitsströmung beobachtet. Dieses Phänomen basiert auf dem beschriebenen Zusammenwirken von induzierter Auftriebskraft und der elektrothermischen Fluidbewegung ETE. Aufgrund der entgegengesetzten Strömungsrichtungen wird die Strömungsgeschwindigkeit des ETE-Fluids durch Gegenströmungen reduziert, was sich in einer

niedrigeren Maximalgeschwindigkeit zeigt, die durch beide Effekte (a) als durch nur einen elektrothermischen ETE-Fluidstrom (c) verursacht wird (siehe Abbildung 7).

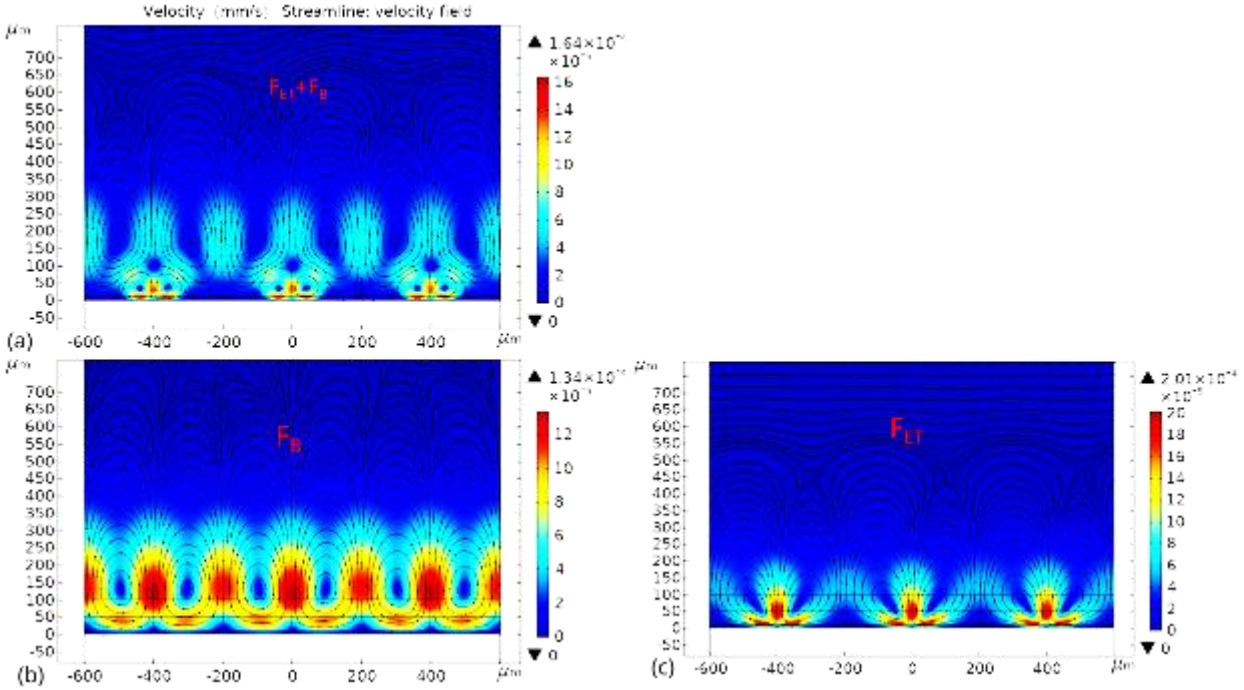

Abbildung 7: Strömungsprofile unter verschiedenen ETE-Effekten: kombinierte Effekte (a), NUR Auftrieb (b) und NUR elektrothermische Effekte (c), für r = 4, Leitfähigkeit von 1 S/m, Frequenz von 200 kHz und Spannung von 0,5 Veff.

Im Prinzip treten immer beide ETE-Effekte gleichzeitig auf. In vielen Fällen dominiert nur eine Art von ETE-Effekt bei der Erzeugung der Flüssigkeitsströmung. Wie in Abbildung 7 dargestellt, dominiert mit zunehmendem Elektrodenverhältnis die Auftriebs-Elektrodenströmung stärker. Um alle Partikel auf den Oberflächen der Elektrode und des Glases zu entfernen, ist ein größerer Arbeitsbereich und ein stärkerer Flüssigkeitsstrom erforderlich. Ein direkter Vergleich der durchschnittlichen ETE-Fluidströmungsgeschwindigkeit für verschiedene Elektrodenverhältnisse, wie in Abbildung 8 dargestellt, zeigt deutlich, dass ein höheres Elektrodenverhältnis eine höhere Fluidströmungsgeschwindigkeit erzeugen kann. Dies ist genau das Strömungsprofil, das die Elektrodenkonfiguration mit einem höheren Elektrodenverhältnis erzeugt. Daher sollte bei der Auslegung der Elektrodenkonfiguration ein höheres Elektrodenverhältnis gewählt werden.

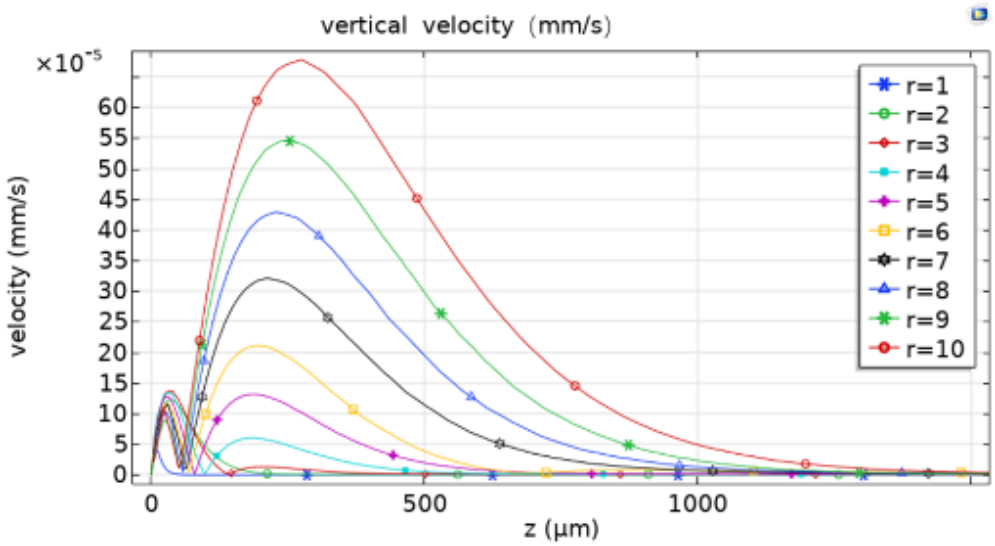

Abbildung 8: Durchschnittliche Geschwindigkeiten der ETE-Flüssigkeitsströme in verschiedenen Elektrodenkonfigurationen bei unterschiedlichen Elektrodenverhältnissen r in Abhängigkeit des Höhenabstands von der Elektrode (z).

Ein weiterer Schlüsselparameter bei der geometrischen Gestaltung der Elektrodenkonfiguration ist die Größe der Elektrode, d. h. der Abstand der Elektroden, w1. Je kleiner der Abstand zwischen den Elektroden bei gleicher Spannung ist, desto höher ist die elektrische Feldstärke und damit die ETE-Flüssigkeitsgeschwindigkeit, wie die Simulationsergebnisse in Abbildung 9 zeigen. Der sehr steile Geschwindigkeitsabfall tritt auf, wenn der Elektrodenabstand unter 40 µm liegt. Eine so kleine Elektrodengröße wie 10 µm könnte einen 10-mal höheren Flüssigkeitsstrom erzeugen (Abbildung 9). Daher bildet eine kleinere Elektrodengröße das theoretisch optimale Design.

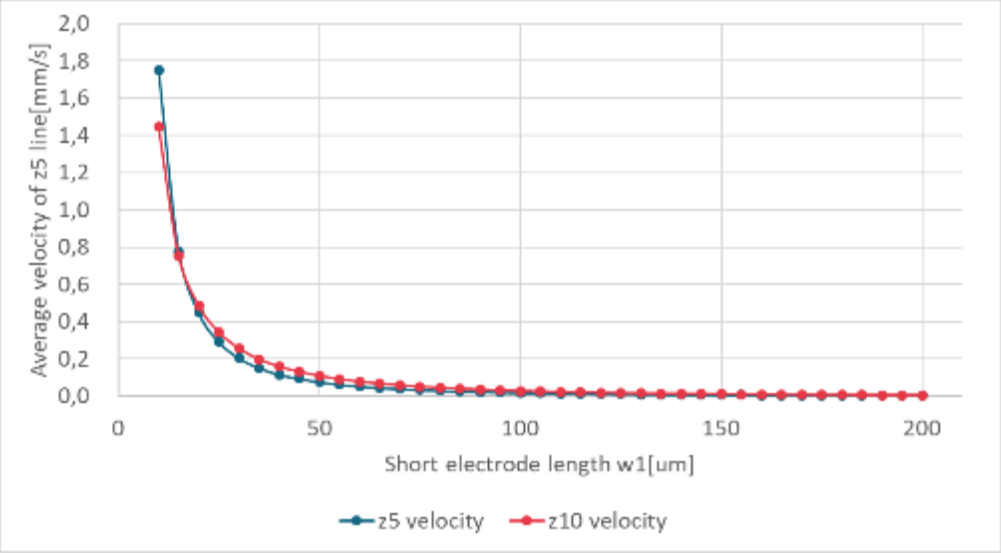

Abbildung 9: Durchschnittliche Geschwindigkeit der Flüssigkeit in verschiedenen Höhen über den Elektroden, 5 µm und 10 µm, in verschiedenen Elektrodenkonfigurationen mit verschiedenen Elektrodenabständen w1. Die Parameter sind identisch: r = 2,4, Spannung U = 0,5 Veff, Leitfähigkeit von 5,3 S/m.

Die variable Leitfähigkeit des Meerwassers beeinflusst den ETE-Flüssigkeitsstrom. Die Leitfähigkeit variiert aufgrund der Höhe und der Temperatur des Meerwassers. Die in Abbildung 10 dargestellte Simulation zeigt die Abhängigkeit zweier unterschiedlicher ETE-Fluidströme von der Leitfähigkeit. Der elektrothermisch induzierte ETE-Fluidstrom ist stärker von der Leitfähigkeit des Meerwassers abhängig. Insbesondere wenn die Leitfähigkeit größer als 1 S/m ist, wirkt sich die elektrothermische Beeinflussung am stärksten auf den ETE-Effekt aus. Die zur Erzeugung des elektrischen Feldes angelegte Spannung ist einer der entscheidenden Parameter zur Bestimmung des ETE-Fluidstroms und damit des induzierten Reinigungseffekts. Je höher die angelegte Spannung ist, desto größer ist der ETE-Fluidstrom, wie in Abbildung 10 b dargestellt. Der elektrothermisch induzierte ETE-Fluidstrom ist stärker von der Spannung abhängig. Wenn die angelegte Spannung größer als 3 V ist, dominiert der elektrothermisch induzierte ETE-Fluidstrom.

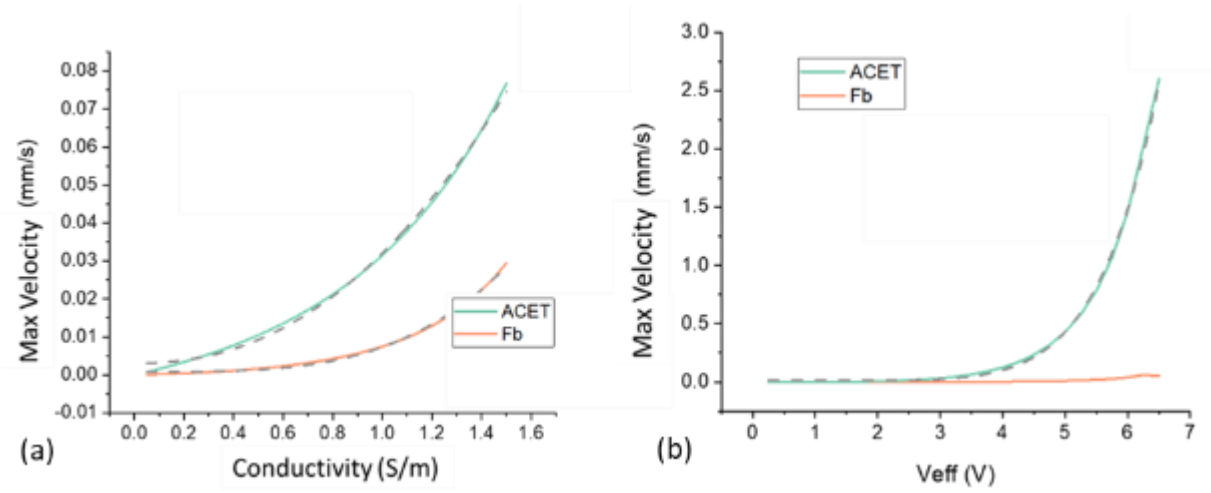

Abbildung 10: ETE-Flüssigkeitsströme in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit und der Spannung für eine Elektrodenkonfiguration mit einem Elektrodenabstand von 40 µm und einem Elektrodenverhältnis von 5.

Die Spannungsvariation beeinflusst sowohl die Größe des Fluidstroms als auch die Fluidstromprofile. Eine kleine Änderung der Spannung, von 1,3 Veff auf 2,9 Veff, verändert offensichtlich die ETE-Fluidstromprofile, wie in Abbildung 11 dargestellt, und erhöht die maximale Geschwindigkeit von etwa 0,079 µm/s auf 2,11 µm/s, für eine Wasserleitfähigkeit von 0,01 S/m bei einer Frequenz von 200 kHz. Die Profilveränderung durch die Spannungsvariation zeigt, dass die Dominanz des ETE-Effekts von der auftriebsinduzierten Strömung zur elektrothermisch erzeugten ETE-Fluidströmung wechselt.

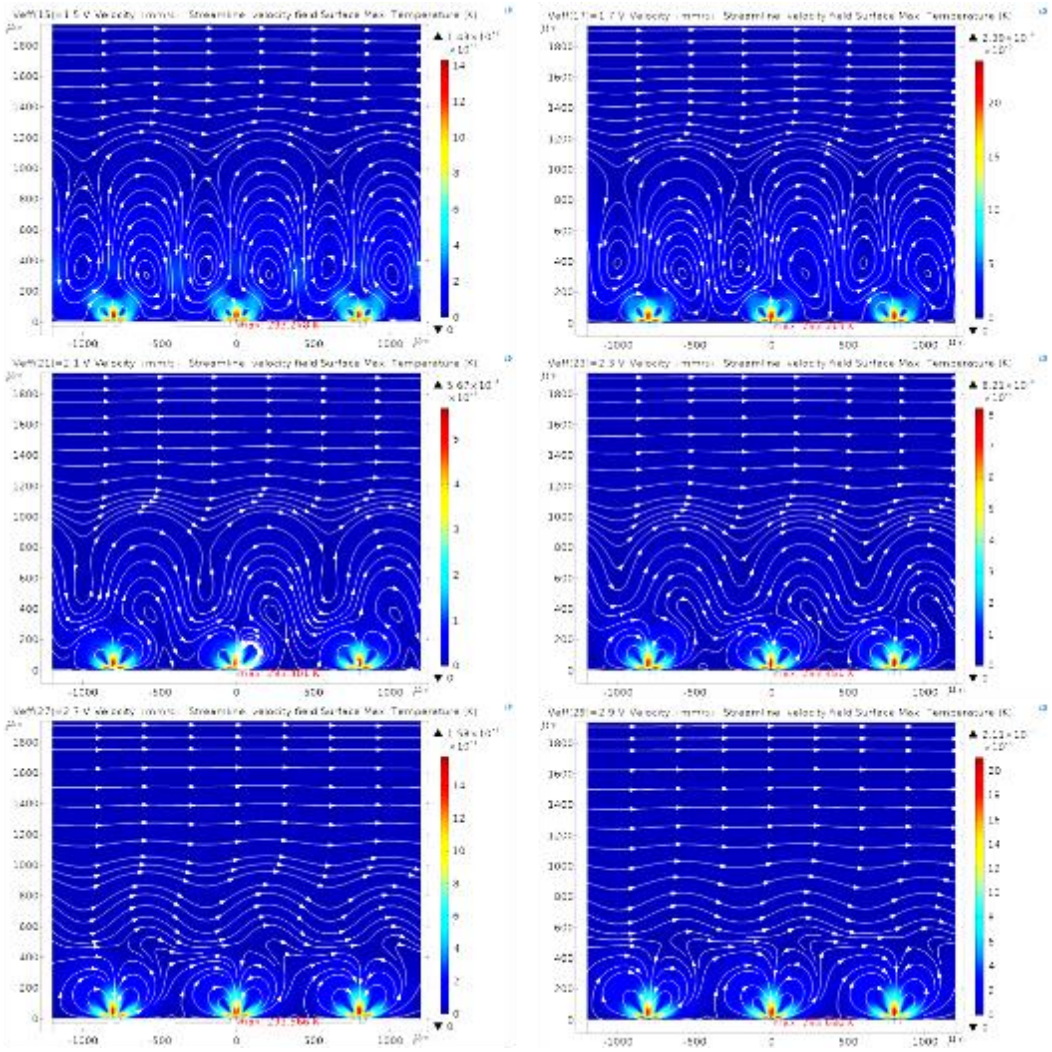

Abbildung 11: Fließgeschwindigkeit und Profile der ETE-Flüssigkeit (Leitfähigkeit von 0,01 S/m) in Abhängigkeit der angelegten Spannung für eine Elektrodenkonfiguration mit einer Elektrodengröße von 40 µm und einem Elektrodenverhältnis von 9.

Die in Abbildung 11 gezeigte Geschwindigkeit bei niedriger Spannung reicht theoretisch aus, um Partikel zu entfernen, da die Dimension der Brownschen Bewegung ähnlich ist. Um die Geschwindigkeit zu erhöhen, ist eine höhere Spannung erforderlich, wie in Abbildung 12 dargestellt. Wie bereits erwähnt, ist die ETE-Flüssigkeitsströmung bei gleichem elektrischem Feld umso stärker, je höher die Leitfähigkeit des Meerwassers ist. Daher ist der ungünstigste Fall für den geringsten ETE-Fluidstrom derjenige, der im Meerwasser mit der geringsten Leitfähigkeit von 0,1 S/m induziert wird. In diesem Fall kann bereits eine angelegte Spannung von 6,5 Veff eine durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit von etwa 1 mm/s erzeugen, wie in Abbildung 12 dargestellt.

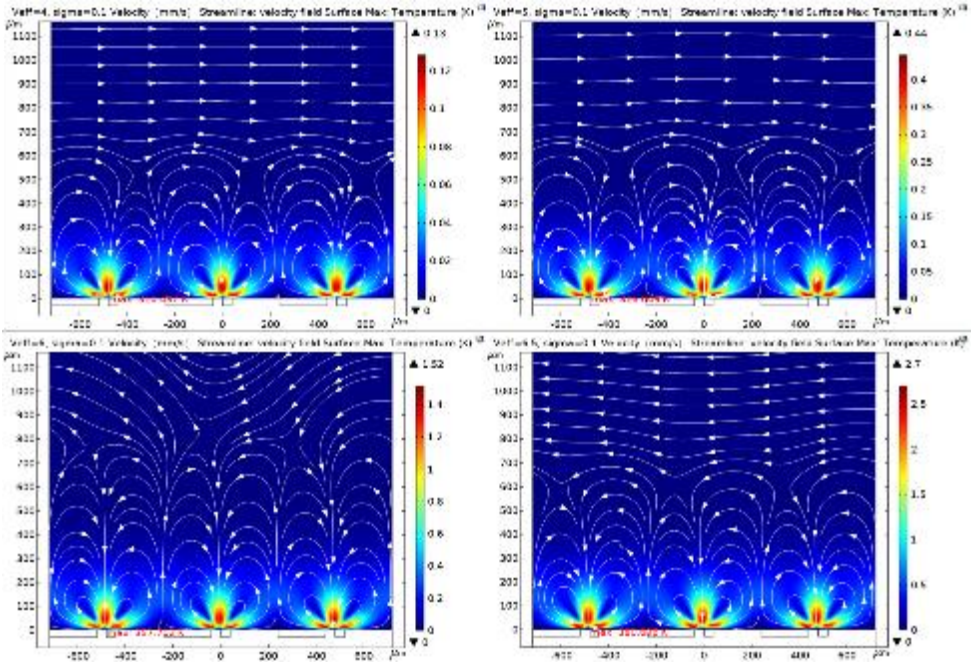

Abbildung 12: Geschwindigkeit des ETE-Flüssigkeitsstroms in einer asymmetrischen Elektrodenkonfiguration mit einem Elektrodenverhältnis von 5, einem Abstand zwischen den Elektroden von 40 µm, unterschiedlichen Spannungen zwischen 4 V und 6,5 V und einer Frequenz von 1 kHz

Die Auswirkung der Frequenz auf die ETE-Fließgeschwindigkeit ist in Abbildung 13 dargestellt. Die maximale ETE-Flüssigkeitsströmungsgeschwindigkeit ist unterhalb von 100 kHz nahezu unverändert. In Anbetracht der Tatsache, dass die Anwendung höherer Frequenzen einen teureren Stromgenerator erfordern, und die abstoßenden DEP-Effekte bei niedrigen Frequenzen auf Partikel (Makromoleküle, Zellen, Stäube und andere) wirken, wird eine Frequenz von 100 kHz im experimentellen Aufbau angestrebt.

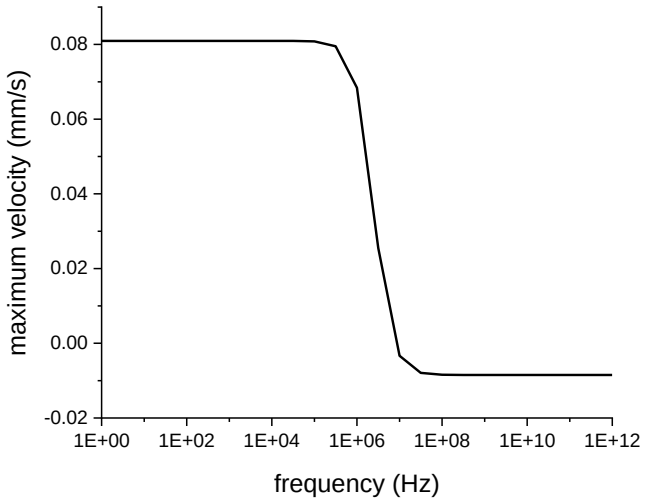

Abbildung 13: Frequenzabhängige ETE-Flüssigkeit (0,01 S/m) Strömungsgeschwindigkeit (Maximum) in einer asymmetrischen Elektrodenkonfiguration mit einem Elektrodenabstand von 40 µm, einem Elektrodenverhältnis von 5 und einer angelegten Spannung von 7 V_{eff} .

Das in Abbildung 12 gezeigte Strömungsprofil der ETE-Flüssigkeit kann in zwei Teile unterteilt werden: Wirbel an der Oberfläche der Elektroden und unidirektionale Strömung. Die Wirbel in unmittelbarer Nähe der Elektroden könnten die Partikel von der Oberfläche abtragen, welche dann von der unidirektionalen Strömung weggespült werden. Die Partikeltrajektorien wurden simuliert, um die Partikelbewegung unter der ETE-Flüssigkeitsströmung und dem nDEP-Effekt zu demonstrieren (siehe Abbildung 14).

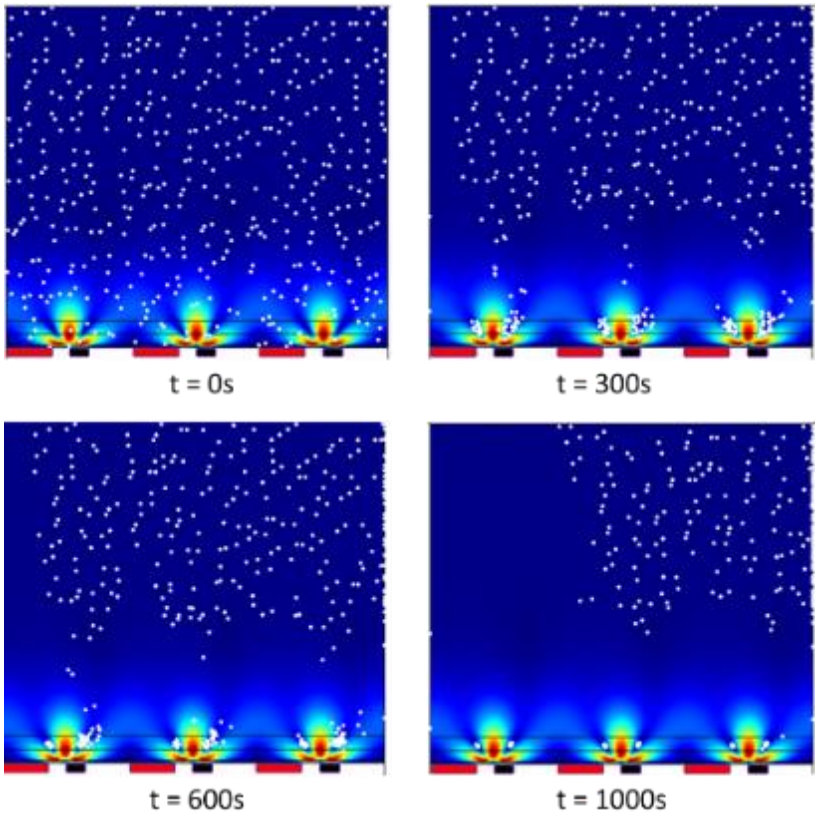

Abbildung 14: Partikeltrajektorien (weiß) unter nDEP- und ETE-Effekten in einer asymmetrischen Elektrodenkonfiguration mit einer kleinen Elektrode von 40 µm (schwarzer Balken) und einer großen Elektrode von 200 µm (roter Balken). Die Hintergrundfarbe ist die Simulation der Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit.

Die Simulation der Partikeltrajektorien (1 µm Durchmesser, Polystyrol) in Abbildung 14 zeigt genau das oben beschriebene Ergebnis. Es ist jedoch auch offensichtlich, dass einige Partikel zwischen den Elektroden gefangen sind. Die elektrische Feldstärke zwischen den Elektroden ist dabei am geringsten, und daher auch der ETE-induzierte Flüssigkeitsstrom (Abbildung 12). Darüber hinaus wirkt die nDEP-Kraft nur in einer Höhe von weniger als 10 µm und bewegt alle Partikel zum niedrigsten elektrischen Feld. Dadurch werden diese Orte zu toten Zonen. Dies gilt nur für den in diesem Projekt untersuchten ungünstigsten Fall, dass die transparente Oberfläche horizontal zur Wasseroberfläche liegt. Die in Abbildung 12 dargestellte Flüssigkeitsströmung zeigt auch, dass es sich bei der Flüssigkeitsströmung in der Nähe der Elektroden um zyklische Wirbel und nicht um eine kontinuierliche Flüssigkeitsströmung handelt.

Das bedeutet, dass einige Partikel möglicherweise nicht nach oben transportiert und weggespült werden, sondern in dem Kreislauf verbleiben. Ein solcher Effekt von toten Zonen mit eingeschlossenen Partikeln wurde in AP3 validiert und experimentell beobachtet. Dieser Effekt kann bei Zellen im Meerwasser zu partiellem biologischem Fouling führen. Daher muss ein kontinuierlicher Flüssigkeitsstrom in eine Richtung über der Oberfläche der Elektroden erzeugt werden, um tote Zonen zu vermeiden.
Um dieses Problem zu lösen, wurde eine neuartige schwimmende Elektrodenkonfiguration entwickelt, indem eine kleine Elektrode zwischen zwei Elektroden eingefügt wurde (Abbildung 15). Die neu installierte Elektrode ist nicht elektrisch aktiviert und wird daher als schwimmende Elektrode bezeichnet. Mit der schwimmenden Elektrode wird das Strömungsprofil zu einer unidirektionalen, kontinuierlichen Flüssigkeitstrajektorie, die es ermöglicht, alle Partikel auf der Oberfläche abzutragen.

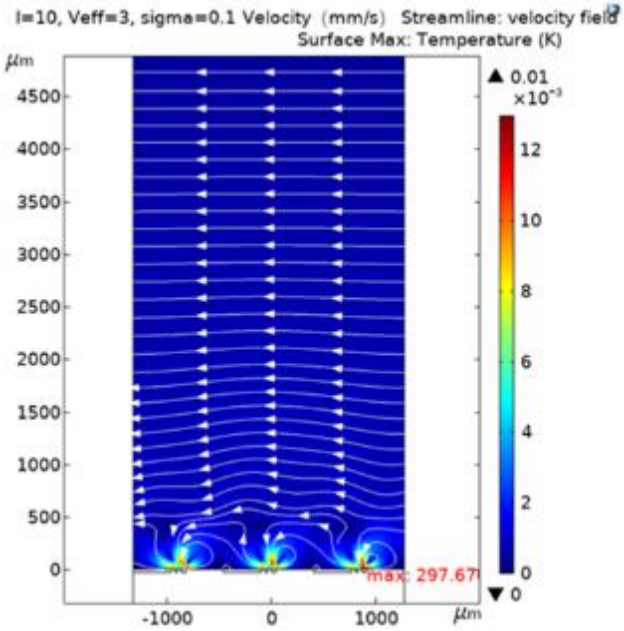

Abbildung 15: Strömungsprofil der ETE-Flüssigkeit in einer schwimmenden Elektrodenkonfiguration.

Insgesamt wird eine asymmetrische Elektrodenkonfiguration mit schwimmender Elektrode verwendet und experimentell im Labormaßstab in AP3 bewertet. Zur Erzeugung der ETE-Fluidströmung treten sowohl Auftrieb als auch Elektrothermie gleichzeitig auf. Angesichts der oben beschriebenen Eigenschaften von Meerwasser und Partikeln müssen alle Partikel einen nDEP-Effekt unterhalb von 1 MHz aufweisen. Die Frequenz muss auf unter 100 kHz begrenzt werden, um den besten ETE-Fluidstrom zu erzielen und den nDEP-Effekt zu gewährleisten. Obwohl der optimale Elektrodenabstand so klein wie möglich sein sollte, wird die Ökonomie der Fertigungstechnik limitiert. Aufbauend auf Experimenten, des Fraunhofer IFAM in AP2 konnte 40 µm als minimale Größe des Elektrodenabstands sicher erzielt werden. Bei einem Elektrodenabstand von 40 µm könnte das größere Verhältnis der Elektroden als r = 9 dazu

führen, dass das gesamte System einen größeren Widerstand aufweist. Bei gleicher Spannung ist der Strom geringer und damit energieeffizienter. Alle optimalen Simulationsdesigns werden in AP 3 experimentell evaluiert.

Parametrische Studie zur Einsatzumgebung und der Energieeffizienz

Wie in den Gleichungen (1), (2) und (7) dargestellt, wird der Flüssigkeitsstrom in erster Linie von der Leitfähigkeit des Mediums, der Spannung und der Elektrodengeometrie beeinflusst. Die Auswirkung der Leitfähigkeit des Mediums, als einer der Schlüsselparameter, auf die Partikelbewegung und den Fluidstrom wird an verschiedenen beobachteten Positionen untersucht. Aus Abbildung 16 a geht hervor, dass die Flüssigkeit entlang der Elektrodenanordnungen (x-Richtung) aufgrund der unterschiedlichen elektrischen Feldstärke an kleinen und großen Elektroden schwankt. Für die drei ausgewählten Leitfähigkeiten des Mediums zeigen die Geschwindigkeitsprofile eine ähnliche Form bei ähnlichen Höhen (y = 20 µm), was auf einen möglichen Zusammenhang zwischen der Leitfähigkeit des Mediums und dem Flüssigkeitsstrom hindeutet. Die Flüssigkeitsmenge ist nahezu linear proportional zur Leitfähigkeit des Mediums (Abbildung 16 b). Darüber hinaus wurde die Änderung der Leistung pro Flächeneinheit (PPA), die als Stromdichte multipliziert mit dem elektrischen Potenzial definiert ist, als Funktion der Leitfähigkeit des Mediums berechnet, um die Energieeffizienz des Antifouling-Systems zu bewerten, und zwar wie folgt

$$\mathrm{PPA}=\mathbf{J}\cdot\varphi \qquad (13)$$

Ähnlich wie der Flüssigkeitsstrom hängt auch die PPA linear von der Leitfähigkeit des Mediums ab. Dies ermöglicht die Vorhersage der Leistung und des Energieverbrauchs des Antifouling-Systems für verschiedene Arbeitsumgebungen. Insbesondere arbeitet das Antifouling-System bei niedriger Leitfähigkeit (z. B. in städtischen Süßwasserumgebungen) mit relativ hoher Energieeffizienz, benötigt aber aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten viel Zeit, um Partikel vom System zu entfernen. Unter Bedingungen mit hoher Leitfähigkeit (z. B. in Meeresgewässern) ermöglicht eine hohe Fließgeschwindigkeit eine schnelle Entfernung von Oberflächensedimenten, während der Energieverbrauch entsprechend hoch ist. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass das vorgeschlagene Antifouling-System eine universelle Anwendbarkeit unter verschiedenen Arbeitsszenarien besitzt. Um die Berechnungsergebnisse an die tatsächlichen Arbeitsbedingungen des Sensors (Meeresumgebung oder Seewasser mit hohem Salzgehalt) anzunähern, werden die nachfolgenden Berechnungen unter den Bedingungen von 5,31 S/m durchgeführt. Es ist jedoch notwendig, die in der Berechnung verwendete elektrische Frequenz

auf 100 kHz zu erhöhen, um den Einfluss von unerwünschtem ACEO zu verringern (die berechnete maximale ACEO-Durchflussrate unter 5,31 S/m wird bei 334 Hz erreicht, reduziert sich jedoch auf weniger als 1 % ihres Spitzenwertes bei $f < 17$ Hz oder $f > 6550$ Hz).

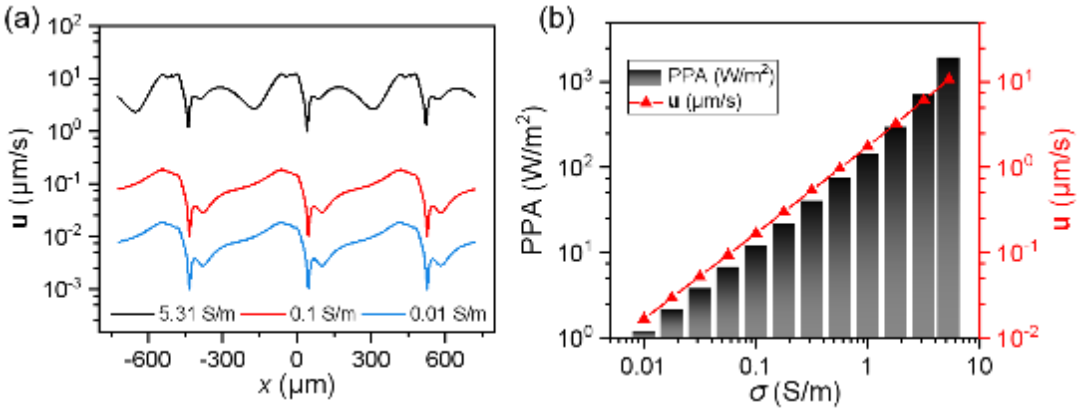

Abbildung 16: (a) Simuliertes Strömungsprofil unter verschiedenen Leitfähigkeiten des Mediums bei einer konstanten Höhe von y = 20 µm. (b) Die Variation von PPA und Fluidströmung an einem der experimentellen Beobachtungspunkte bei einer Partikelhöhe von 20 µm als Funktion der Leitfähigkeit des Mediums. (w1 = 40 µm, w2 = 200 µm, Ueff = 1,3 V, f = 100 kHz)

Wie bereits erwähnt, beschreibt das Elektrodenbreitenverhältnis (*r*) den Grad der Asymmetrie der Elektroden des Antifouling-Systems. Die Asymmetrie der Elektrodenanordnung wirkt sich auf die Intensität des elektrischen Feldes und den Temperaturgradienten aus und beeinflusst somit die Flüssigkeitsströmungen, die sowohl durch ACET als auch durch den Auftrieb verursacht werden. Daher simulieren wir die Veränderung des zweidimensionalen Strömungsmusters in Abhängigkeit von *r*. Wie in den Abbildung 17 gezeigt, überwiegen die asymmetrischen Wirbel mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten in der Nähe der Elektrodenoberfläche bei kleinem *r* (Abbildung 17 a und b), nehmen aber mit zunehmendem *r* an Stärke ab. Stattdessen überwiegen bei großem *r* die symmetrischen Wirbel mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb der Elektrode, die sich mit zunehmendem *r* noch verstärken (Abbildung 17 c und d). Die Existenz unterschiedlicher Strömungswirbelmuster mit der Variation von *r* wird auf die Änderung der vorherrschenden Rolle zwischen ACET und Auftriebseffekten zurückgeführt. Die Trajektorien der Foulingpartikel wurden ebenfalls für verschiedene Strömungsregime berechnet. Im Vergleich zu Entwürfen mit einem größeren *r* (d. h. *r* = 8 oder 9) können Sedimente aufgrund der ausgeprägten Asymmetrie in den Wirbeln schnell entfernt werden, wenn *r* kleiner ist (d. h. *r* = 2 oder 3). Ein kleineres *r* führt jedoch zu "Stagnationszonen" und einer geringeren Strömungsgeschwindigkeit in den oberen Regionen, was zu einer geringeren Abtragseffizienz bei *r* = 2 im Vergleich zu *r* = 3 führt.

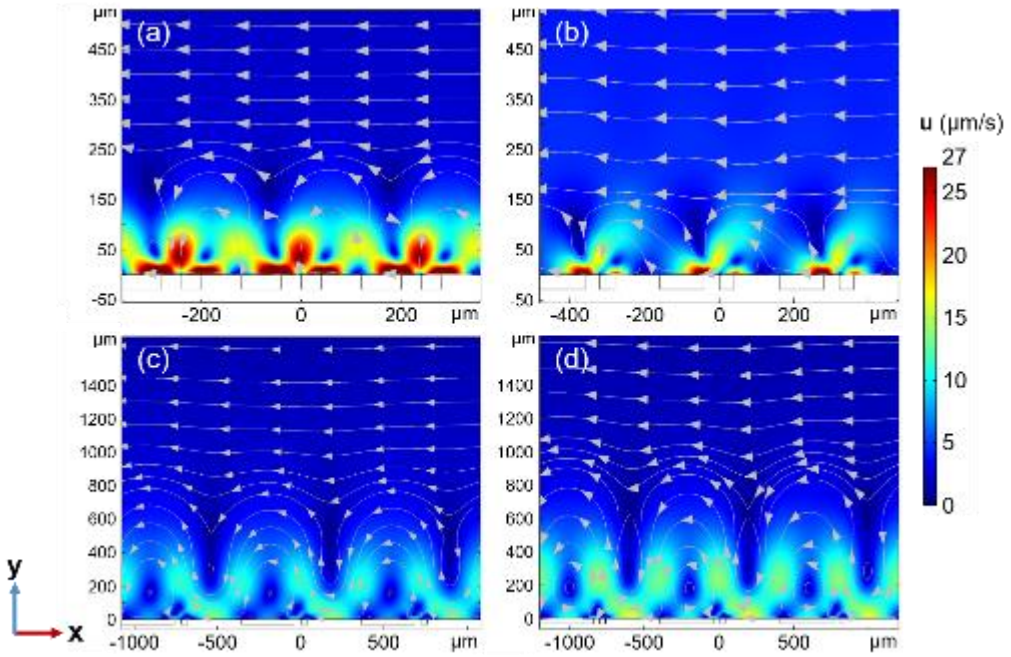

Abbildung 17: Numerische Simulation des Strömungsprofils bei verschiedenen Seitenverhältnissen: (a) r = 2, (b) r = 3, (c) r = 8, (d) r = 9. Beachten Sie, dass die Dicke der Elektroden bei allen Seitenverhältnissen konstant ist. (w_1 = 40 µm, U_{eff} = 1,3 V, σ_m = 5,31 S/m, und f = 100 kHz)

Die Flüssigkeitsströmung zeigt symmetrische Wirbelzustände mit einem vollständig entwickelten Muster (d. h. keine unidirektionale Strömung), wenn nur der Auftrieb simuliert wird (Abbildung 18 b und e), wobei Sedimente nicht entfernt werden. Im Gegensatz dazu weisen die von ACET erzeugten Wirbel asymmetrische Strömungswellen in der Nähe der Elektroden und eine unidirektionale Nettoströmung in den von den Elektroden entfernten Positionen auf (Abbildung 18 c und f). Dieses durch ACET verursachte Strömungsmuster kann in Kombination mit nDEP für die meisten Unterwassersedimente eine hocheffiziente Entfernung von Partikeln von Unterwasseroberflächen ermöglichen. Wie bereits erwähnt, weisen Wirbel, die vollständig von ACET dominiert werden, "Stagnationszonen" auf, in denen ein Teil der Sedimente hängen bleibt, wobei die Restrate nur auf 7 % reduziert wird. Darüber hinaus ändern sich die auftriebsinduzierten Strömungsmuster nicht wesentlich, wenn die Eingangsspannung von 0,7 V (Abbildung 18 b) auf 1,3 V (Abbildung 18 e) erhöht wird. Wenn nur ACET simuliert wird, wurde bei hoher Eingangsspannung (Abbildung 18 f) im Vergleich zu niedriger Spannung (Abbildung 18 c) eine deutliche Zunahme der hohen Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe der Elektroden beobachtet. Infolgedessen führt der zunehmende Einfluss von ACET auf die Geschwindigkeit im kombinierten Modell zu einer verstärkten Flüssigkeitsstörung an Positionen in der Nähe der Elektrodenoberflächen (Abbildung 18 a und d). Unter dem kombinierten Einfluss von ACET und

Auftrieb erreichte das System einen optimalen Partikelabtrag und reduzierte die verbleibenen Partikelrestrate nach 400 s vollständig. Ferner wurde festgestellt, dass der ACET empfindlicher auf Spannungsschwankungen reagiert als der Auftrieb.

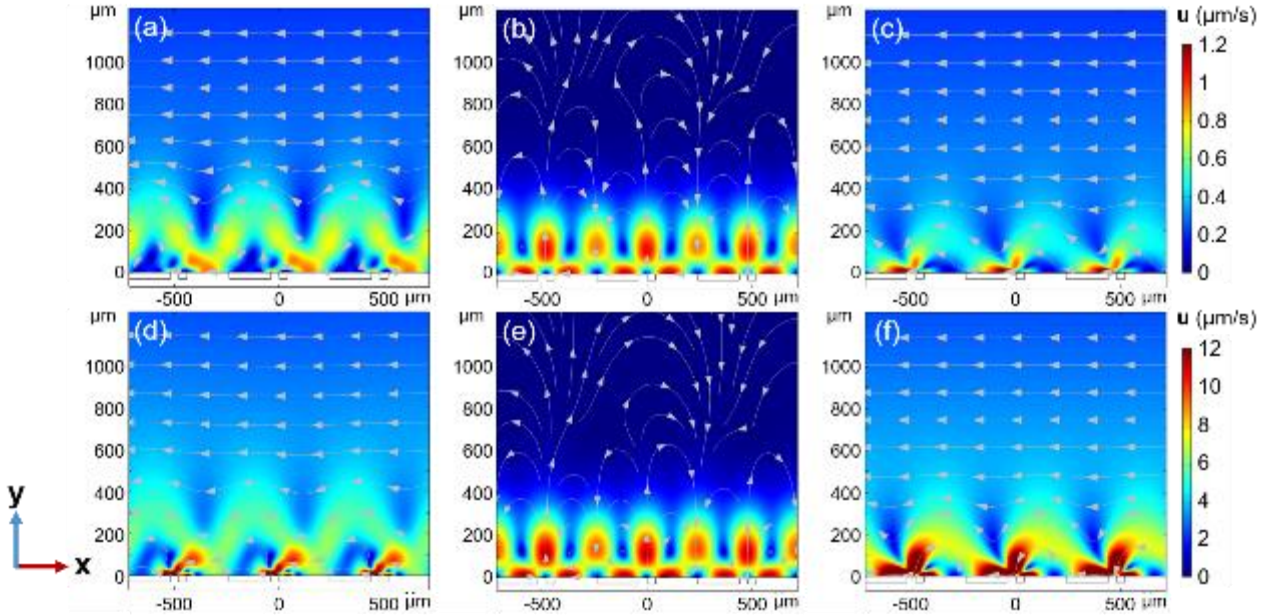

Abbildung 18: Simulierte Strömungsmuster bei (a, b, c) 0,7 V und (d, e, f) 1,3 V Eingangsspannungen. (a, d) Das kombinierte Modell, das sowohl ACET als auch Auftrieb berücksichtigt; (b, e) nur der Effekt des Auftriebs wird berücksichtigt und (c, f) nur der Effekt von ACET wird im numerischen Modell berücksichtigt. (w1 = 40 µm, r = 5, bei = 5,31 S/m, und f = 100 kHz)

Die konkurrierende Beziehung zwischen ACET und Auftrieb lässt sich auch bei unterschiedlichen Elektrodenbreiten deutlich nachweisen. Wie in Abbildung 19 a zu sehen ist, nimmt die Flüssigkeitsgeschwindigkeit mit zunehmender Breite der kurzen Elektrode w_1 bei niedrigem w_1 stark ab, was auf den schnellen Rückgang des elektrischen Feldgradienten zurückzuführen ist. Mit zunehmender Breite w_1 nimmt die Flüssigkeitsgeschwindigkeit jedoch wieder zu, was auf den zunehmenden Auftriebseffekt bei großen charakteristischen Abmessungen zurückzuführen ist. Die Temperaturvariation bei großen w_1 Werten, wie in Abbildung 19 b gezeigt, reagiert auf die Verstärkung des Auftriebseffekts bei Vergrößerung der charakteristischen Dimension des Systems.

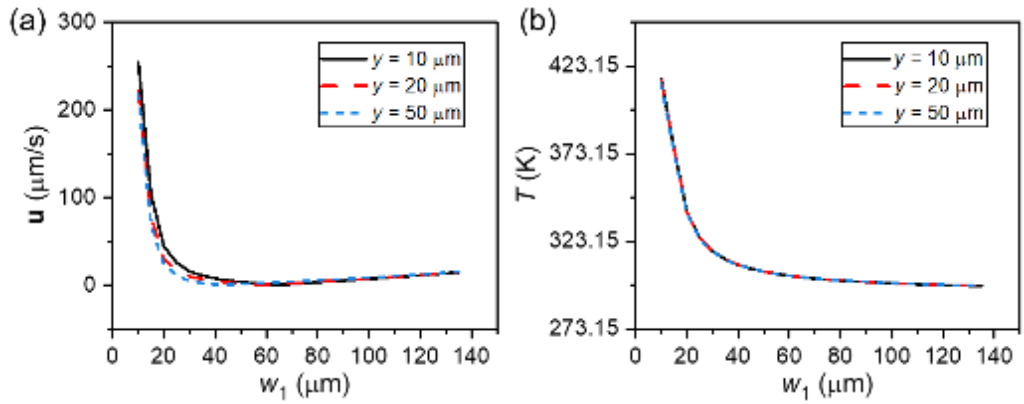

Abbildung 19: Die numerische Auswirkung einer kurzen Elektrodenbreite w_1 auf (a) Geschwindigkeit, (b) Temperatur bei unterschiedlicher Höhe zu den Elektroden (y = 10, 20, 50 µm). (r = 5, U_{eff} = 1,1 V, σ_m = 5,31 S/m, und f = 100 kHz)

Zusammenfassung zum AP1:

Die Zielgewässer wurden mit dem projektbegleitenden Ausschuss definiert, und die physikalischen Eigenschaften (Salzgehalte, pH-Werte, Temperaturen und Feststoffgehalte) abgeleitet. Auf dieser Grundlage wurde ein physikalisches Modell zur Beschreibung und numerischen Simulation der elektrokinetischen Effekte zur Fouling-Partikelabreinigung entwickelt. Dafür wurden die bestimmenden Gleichungen definiert und ein FEM-Modell abgeleitet. Auf Basis der FEM-Simulationen und der möglichen Herstellungstechniken für die Elektroden, wurden Elektrodengeometrien abgeleitet, welche hinsichtlich einer Kraftwirkung auf Fouling-Partikel und eine reduzierte elektrische Leistung hin optimiert wurden. Die Simulationen ergeben dabei unterschiedliche anzustrebende Elektrodenanordnungen (AP2) zum Test des Modells und der Antifoulingwirkung (AP3 und AP4). Das entwickelte Antifouling-System besteht aus Gruppen von asymmetrischen Elektroden, die eine negative DEP-Kraft und einen unidirektionalen ACET-Fluss auslösen, um die im System abgelagerten Partikel zu resuspendieren und zu entfernen. ITO wurde als Elektrodenmaterial gewählt, um die Transparenz der optischen Oberflächen zu erhalten. Ein theoretisches Modell, das elektrostatische, Flüssigkeits- und Temperaturfelder eng miteinander verknüpft, wurde erstellt, um die durch die Joule'sche Erwärmung induzierten ACET- und Auftriebsströme sowie die Trajektorien von Modellpartikeln im Submikrometerbereich innerhalb des Systems vorherzusagen. Numerische Simulationen bestätigten die Notwendigkeit eines asymmetrischen Elektrodendesigns, bei dem der ACET eine deutliche asymmetrische Wirbelströmung in der Nähe der Elektrodenoberflächen und eine starke unidirektionale Strömung weg von den Elektroden induziert. Die Leistung des entworfenen Antifouling-Systems wurde anschließend durch Variationen der Elektrodenstruktur und der Betriebsparameter des Systems numerisch bewertet. Wie erwartet, hat das Seitenverhältnis, das den Grad der Asymmetrie der Elektroden

charakterisiert, großen Einfluss auf das Strömungsmuster. Es wurde festgestellt, dass ACET die gesamte Flüssigkeitsströmung bei kleinen Aspektverhältnissen dominiert, wobei ein optimales Aspektverhältnis von etwa 3 mit dem gewünschten Strömungsprofil und der gewünschten Energieeffizienz identifiziert werden kann. Das entwickelte Modell wurde zusammen mit den folgenden experimentellen Untersuchungen im Nature-Verlag, in Scientific Reports veröffentlicht [4], open access.

AP 2: Laserprozessentwicklung für die Erzeugung von ITO-Elektroden und Easy-To-Clean Isolationsbeschichtung (IFAM, UFT)

Ziel: Reproduzierbare Erzeugung geeigneter ITO-Elektrodengeometrien auf Glasoberflächen; Verkapselung der Elektroden mittels Easy-To-Clean Beschichtung mit zusätzlicher Isolations- und Kratzschutzwirkung.

Durchgeführte Arbeiten:

Mit dem PA wurde Glas als Schwerpunktsubstrat der Untersuchungen definiert. Ursächlich ist die hohe Kratzschutzstabilität von Glas gegenüber polymeren Oberflächen, sodass für optische Anwendungen Glas bevorzugt im maritimen Bereich eingesetzt wird [mündliche Mitteilung Projekttreffen 05.2022]. Polycarbonat ist wegen der geringen UV-Stabilität und Kratzschutzbeständigkeit in Diskussion mit dem projektbegleitenden Ausschuss nicht weiterverfolgt worden. Stattdessen wurden Arbeiten auf Quarzglas wegen der höheren optischen Qualität durchgeführt.

Zunächst wurden kommerzielle ITO-Beschichtungen auf Glasobjektträgern, zur Elektrodenherstellung mittels selektivem Laserabtrag, beschafft:

Substratmaterial Probenmaterial:

- Erste Probencharge Lieferant Osilla NL [6]:

Substratgröße: 25mm x 75mm (Mikroskopobjektträger, 50 st.); Dicke: 1,1 mm; Glasart:Float-Glas; ITO-Dicke: 100 nm; ITO angegebener Widerstand: 20 Ω/sq

Die hohen Flächenwiderstände, zweigen in ersten Experimenten Widerstandsverluste, sodass weitere Proben beschafft wurden.

- Zweite Probencharge Lieferant BIOTAIN CHN beschafft wurde (Abbildung 20):

Substratgröße: 25mm x 75mm (Mikroskopobjektträger, 128 st.); Dicke : 1,1 mm
Glasart: Float-Glas; Substratbeschichtung: Vollständig oxidiertes ITO; ITO-Dicke:650 nm; ITO angegebener Widerstand:2 Ω/sq

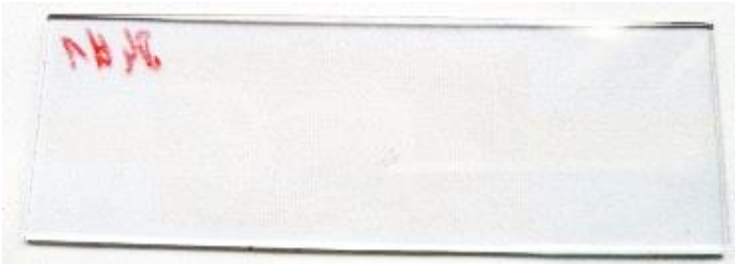

Abbildung 20: Glasobjektträger (75 x 25 x 1,1 mm) mit ITO-Beschichtung (650 nm), Lieferant Biotain CHN

- In einem Erweiterten Versuch wurde versucht Quarzgläser mit einer Laserstruktur zu versehen, um die Reinigungswirkung durch Dielektrophorese und Easy2Clean-Beschichtung zu verbessern (21212082707, Suprasil 2 Grade A, 20±0,1x20±0,1x0,5±0,05mm beziehungsweise 20 mm x 0,5 mm, beidseitig mechanisch poliert, Rand geschliffen, Aachner Quarzglas-Technologie Heinrich GmbH& Co. KG, Aachen, Deutschland).

Erzeugung der Elektroden mittels Lasertechnik:

Das Konzept zur Elektrodenerzeugung sah einen selektiven ITO-Abtrag der vollflächig ITO-beschichteten Glasobjektträger vor. Dies sollte eine große Gestaltungsfreiheit der Elektroden ermöglichen. Für die Untersuchungen wurde sowohl das Nd:YAG-Laser-System CL300 als auch das Nd:YAG-Laser-System CL100 der Firma cleanLaser verwendet. Die Lasersysteme sind in nachfolgender Abbildung 21 zu sehen. Der diodengepumpte Nd:YAG-Laser (kurz für Neodym-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat als aktives Medium) emittiert eine gepulste infrarote Strahlung mit einer Wellenlänge von λ = 1064nm.

Abbildung 21: Zur Vorbehandlung verwendete Lasersysteme

Der vom CL300 emittierte Strahl weist ein Flat-Top Strahlungsintensitätsprofil auf, welches in Abbildung 22 links dargestellt ist. Dabei erreicht der Laser Pulsfolgefrequenzen f von 10 bis 40 kHz mit Pulslängen τ von 95 bis 200 ns. Die resultierende maximale Pulsenergie dieses Systems beträgt 18 mJ.

Im Gegensatz zum CL300 weist der vom CL100 emittierte Laserstrahl ein gaußförmiges Strahlungsintensitätsprofil auf, welches in Abbildung 22 rechts dargestellt ist. Dabei erreicht der

Laser eine Pulsfolgefrequenzen f von 100 bis 200 kHz mit Pulslängen τ von minimal 129 bis 200 ns. Die resultierende maximale Pulsenergie dieses Systems beträgt 1 mJ.

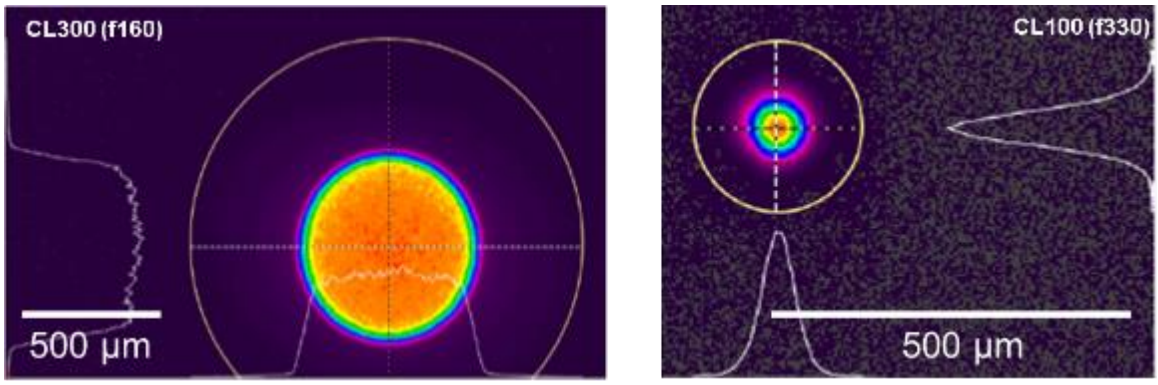

Abbildung 22: Energieverteilung innerhalb der Spotfläche: Links: FlatTop-Strahl des CL300-Lasers; rechts: Gaußstrahl des CL100-Lasers

Die Verwendung der beiden Strahlungsintensitätsprofile ermöglicht die Erzeugung von unterschiedlichen ITO-Abtragsprofilen und Kantenschärfen. Um einen flächigen Abtrag des ITO zu ermöglichen wird der Laserstrahl über die Oberfläche gescannt, s. Abbildung 23.

Abbildung 23: Lasereinflusszone und Scanschema

Hierbei wird der Laserstrahl mäanderförmig mit einem variablen Pulsabstand in x- und y-Richtung mittels 2D-Scanner über das Bauteil geführt.

Beim selektiven ITO-Abtrag mittels Laser können, je nach verwendeten Behandlungsparametern, verschiedene Effekte erreicht werden. Beim Laserreinigungsverfahren werden Kontaminationen von der Bauteiloberfläche abgetragen. Dabei wird der gepulste Laserstrahl so über das Bauteil

geführt, dass die Einwirkzeit der Laserstrahlung sehr kurz ist und das Grundmaterial dabei nur geringfügig erwärmt wird.

Der Laserabtrag lässt sich gut durch ein laserinduziertes Plasma an der Oberfläche verfolgen. In der Laserwechselwirkungszone entsteht durch das Auftreffen des Laserstrahls auf der Oberfläche und der damit verbundenen Schockwelle ein Plasma, in dem sowohl Schmutzpartikel als auch das Substratmaterial selbst verdampfen (siehe Abbildung 24).

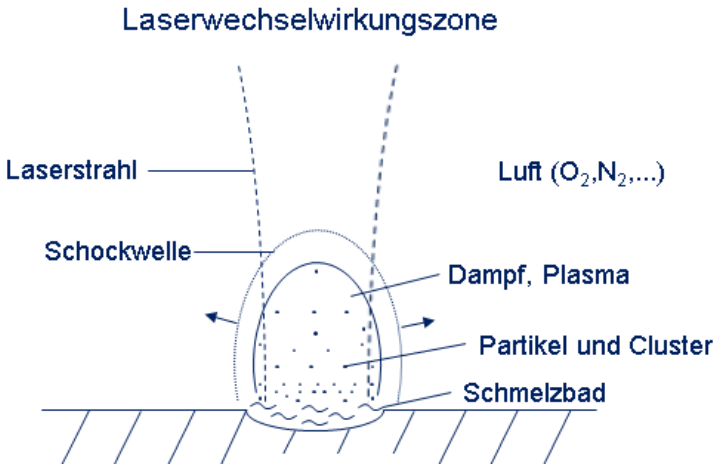

Abbildung 24: Schematische Darstellung der Laserablation

Das Trägermaterial besteht aus 1,1 mm dicken Glasobjektträgern (25 x 75 x 1,1 mm^3), die mit einer 650 nm dicken ITO-Schicht (BIOTAIN CRYSTAL CO., LIMITED, CHN) beschichtet sind, wie in Abbildung 20 dargestellt. Die Oberflächenelektroden wurden durch selektive Laserablation hergestellt. Ein 100 W Nd:YAG-Laser (FA Clean-Lasersysteme GmbH) mit einer Wellenlänge von 1064 nm wurde zum Scannen der Proben bei einer Brennweite von 160 mm in einem 2D-Scansystem verwendet. Die Leistung des Lasers wurde auf 5 W eingestellt, was zu einem kreisförmigen ITO-Abtrag von 30 µm im Laserfokus führte.

Zunächst wurden Versuche zum selektiven Laserabtrag des ITO für die Erzielung kleiner Elektroden durchgeführt. Die Intensitätsüberhöhungen im Gauß'schen Fokusprofil, ergeben um Größenordnungen kleinere Elektrodenabtragsbreiten als beim homogeneren TopHat-Fokusprofils. Die Verwendung der lokalen Ablationsschwelle unter Leistungsreduktion des Lasers (P in W) ermöglicht Abtragsstrukturen von ca. 20 µm Breite (siehe Abbildung 25 links). Zur Erreichung ausreichender elektrischer Widerstände (> 100 Ohm) zwischen benachbarten Elektroden erschien ein minimaler Abstand von 40 µm sinnvoll.

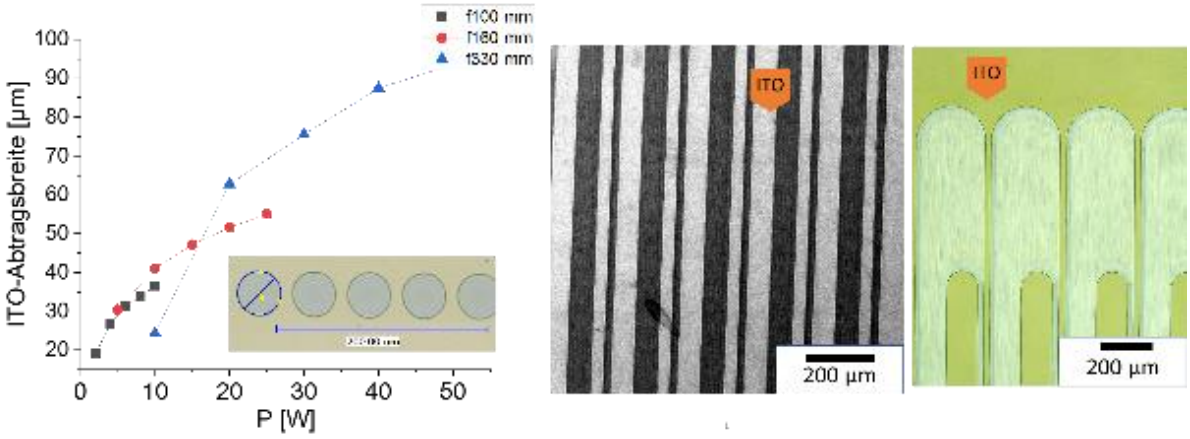

Abbildung 25: links) min. ITO-Abtragsbreite in Abhängigkeit der Laserleistung; Mitte und rechts) REM und Mikroskopie des selektiven Laser-ITO-Abtrags zur Elektrodenherstellung

Zur Charakterisierung der elektrokinetischen Eigenschaften der laserinduzierten Elektroden in AP3 wurden variable Elektrodenbreiten von 15 µm bis 400 µm in den Aspektverhältnissen benachbarter Elektroden von r = [3, 4, 5, 6, 9] = bE/kE sowie 15 Aspektverhältnisse der Behandlungsfläche mit den Längen W = 1 bis 5 cm und Breiten zwischen L = 1 bis 2 cm hergestellt. Die geometrischen Einflussparameter sind in Abbildung 26 gezeigt. Die ursprünglich veranschlagten 6 Varianten zur Charakterisierung in AP 3 genügten dabei nicht und mussten um 18 Varianten deutlich erweitert werden.

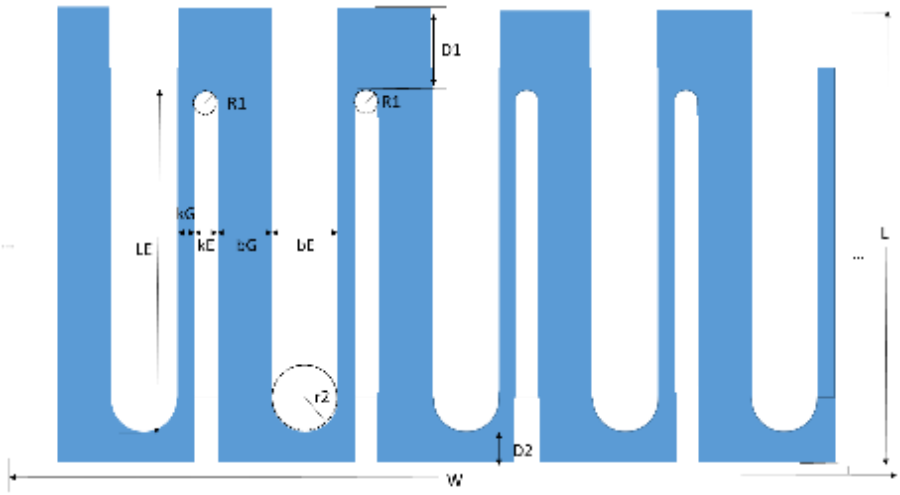

Abbildung 26: Geometrische Einflussparameter auf das Elektrodendesign.

Die zu behandelnden Flächen auf den Glasobjektträgern sind in Abbildung 27 dargestellt.

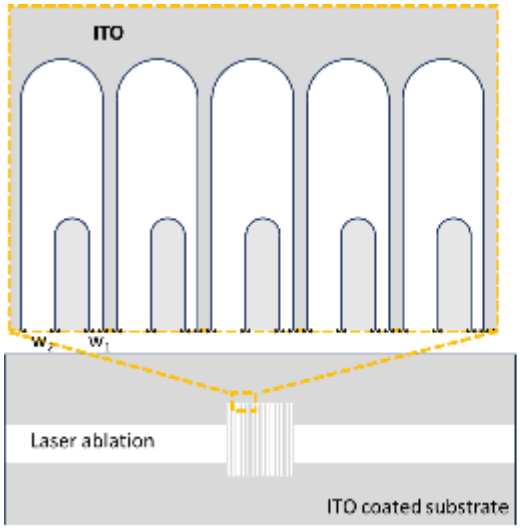

Abbildung 27: Skizze: zentrale Elektrodenfläche und die zur Isolation der Anschlüsse abgetragenen ITO-Flächen am Rand der Elektroden (10 mm Höhe)

Um interdigitale Elektroden auf den ITO-Glasobjektträgern zu erhalten, wurde ein CAD-Modell erstellt und auf den Laser übertragen. Die Elektroden wurden an ihren Enden halbkreisförmig abgerundet, um elektrische Spannungsspitzen zu vermeiden. Der ITO-Abtrag führt schließlich zu den Interdigitalräumen zwischen den Elektroden. Mit einem Laserfokusabstand entlang der Scanrichtung und zwischen benachbarten Laserscanlinien von 2 µm erhält man im Keyence VHX-600 Lichtmikroskop (siehe Abbildung 25**)** scharfkantige Elektroden. Der Widerstand zwischen den Elektroden an den Kontaktstellen betrug ca. 1,5 ± 0,5 kΩ.

Angepasstes Elektrodendesign: Um die Stabilität der ITO-Beschichtung im elektrischen Feld zu untersuchen, wurden die ITO-Elektroden in Salzwasser an einen Funktionsgenerator mit niedriger Spannung (< 7 Veff) und an einen Leistungsverstärker mit hohen Spannungen (≤ 20 Veff) angeschlossen. Wir untersuchten den Einfluss der elektrischen Feldparameter (Frequenz und Spannung) auf die ITO-Beschichtung, indem wir die Oberfläche der ITO-Elektroden mit einem Mikroskop qualitativ beobachteten. Bei Anlegen eines elektrischen Gleichfeldes (Frequenz 0 Hz) trat Elektrodenkorrosion zuerst bei 1,5 V Spannung auf. Bei niedrigerer Spannung (< 7 Veff) wurde im elektrischen Wechselfeld mit einer Frequenz von 50 Hz bis 200 kHz keine Korrosion beobachtet. Wurde eine höhere Spannung angelegt, trat Korrosion bei niedrigeren Frequenzen auf, während bei höheren Frequenzen als 100 kHz keine Korrosion beobachtet wurde. Die Korrosion im Wechselstromfeld trat immer an einem Ende der Elektrode auf, wie in Abb. 5 b und c zu sehen ist. Dafür konnten zwei Gründe identifiziert werden: erstens induziert die lokal sehr hohe elektrische Feldstärke an den scharfen Kanten der Elektroden lokal hohe Ströme, die zweite mögliche Ursache ist ein DC-Offset, die höhere DC-Offsetspannung, wenn eine höhere Wechselspannung angelegt wurde. Um das erste Problem zu vermeiden,

wurde ein halbkreisförmiges Ende der Elektroden verfolgt (Abbildung 27), welche die Korrosion vermeiden ließ.

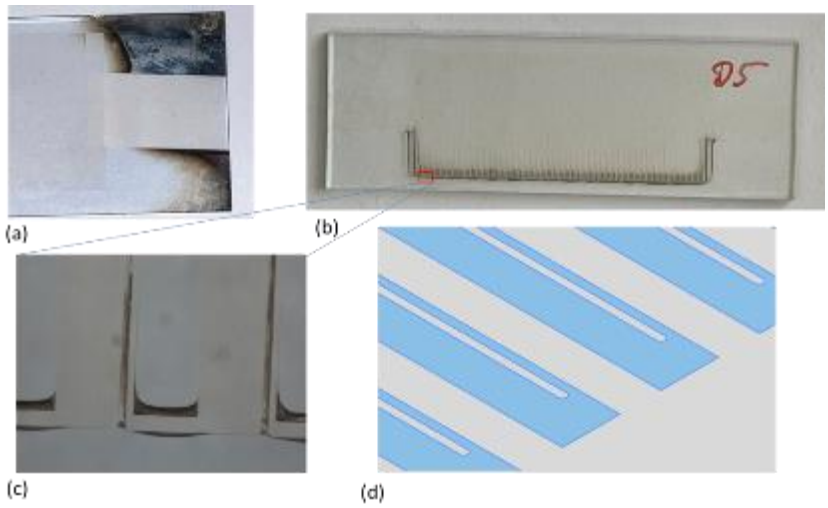

Abbildung 28: Korrodierte Elektroden bei einer Spannung von 1,5 V (a), Wechselstromfeld 50 Hz (12 Veff) (b), vergrößerte Korrosionsstelle (c), vorgeschlagene neue runde Endelektrode (d).

Verkapselungs-Beschichtungen

Im Rahmen des Projekts ELEKTRA wurden sowohl SiOx- als auch TiOx-Beschichtungen auf Glasobjektträgern mit ITO-Elektroden-Beschichtung Glasobjektträgern entwickelt und getestet, um die Funktionalität und Stabilität der Elektroden zu verbessern.

Easy2clean-Beschichtung: Um die Reinigungswirkung auf den elektrodenbeschichteten Glasobjektträgern zu verbessern, wurden plasmapolymerisierte Schichten auf den Oberflächen abgeschieden (Plasmaanlage Induflex Coating GmbH). Diese Alternative zu Fluorpolymeren basiert auf siliziumorganischen Beschichtungsausgangswerkstoffen (Precursors), die verdampft, im Plasma aufgebrochen werden und schließlich leistungsabhängig vom Plasma und Sauerstoffpartialdrücken zu siliziumorganischen Polymeren auf der Oberfläche kondensieren. Die SiOx-Beschichtung bietet zahlreiche Vorteile: Sie zeichnet sich durch ausgezeichnete und dauerhafte Antihaft- sowie Easy-to-Clean-Eigenschaften aus, was die Reinigung erheblich erleichtert. Zudem ist sie ähnlich hart wie Emaille, was ihre Schnitt- und Abriebfestigkeit erhöht, und bleibt dabei frei von schädlichen Fluorverbindungen, was ihre Umweltverträglichkeit unterstreicht. Abbildung 29 zeigt einen Rezipienten, in dem die SiOx-Beschichtungen aufgebracht wurden. Die erzielte Schichtdicke der SiOx-Beschichtung betrug 800 nm, sodass keine Lichtbrechungseffekte sichtbar waren. Abbildung 30 zeigt die hydrophob beschichtetet Elektrodenoberfläche mit aufgesetztem Wassertropfen.

Zusätzlich wurde im Rahmen des Projekts ELEKTRA die SiOx-Beschichtung als isolierende Schicht gewählt, um die Elektroden vor Korrosion zu schützen und die mechanische Stabilität zu verbessern. Ihre Eigenschaften sollen zur Funktionalität der Antifouling-Technologie beitragen und eine lange Lebensdauer und hohe Effizienz der beschichteten Oberflächen gewährleisten.

Abbildung 29: Die verwendete Niederdruck-Plasmakammer im geschlossenen Zustand (links) und das Innere der Kammer (rechts). An der linken Innenseite ist eine Elektrode zu erkennen, vor der die Proben platziert wurden.

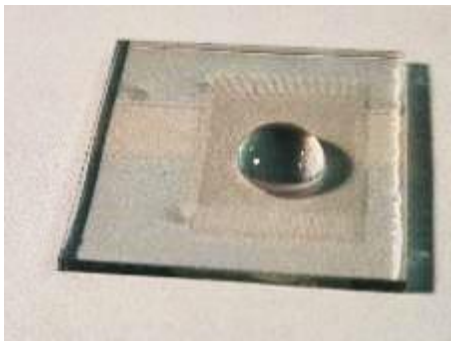

Abbildung 30: Wassertropfen auf Hydrophober easy2clean-Beschichtung, 800nm SiOx-Belichtung auf ITO-Elektroden

Dielektrische Beschichtung Titandioxid: Die TiOx-Beschichtung wurde entwickelt, um neben einer Elektrodenprotektion die Flussdichte des elektrischen Feldes für die Reinigungsanwendung der Elektroden zu verbessern. Die Schicht-Applikation erfolgte mittels chemisch induzierter Gasphasenabscheidung auf Basis von Titan(IV)isopropoxid unter Atmosphärendruck, wobei Parameter wie die Precursorzuführung, Temperatur des Substrats,

Düsenverfahrgeschwindigkeiten und Luftfeuchtigkeit die Schichtdicke determinieren (Düsensystem in Abbildung 31).

Die resultierende Titandioxidbeschichtung zeigte hervorragende Eigenschaften, darunter hohe Widerstandsfähigkeit gegen Abrieb und Kratzer sowie gute UV-Stabilität, die für maritime Anwendungen von großer Bedeutung sind.

Abbildung 31: geheiztes Düsensystem zur Applikation von Titandioxidschichten auf den ITO-Elektroden

Abbildung 32: Messung der TiO^2-Schichtdickenabscheidung mittels Reflektometer auf Refernz-Siliziumwafern (wegen erhöter Reflektion, gegenüber Glassubstraten)

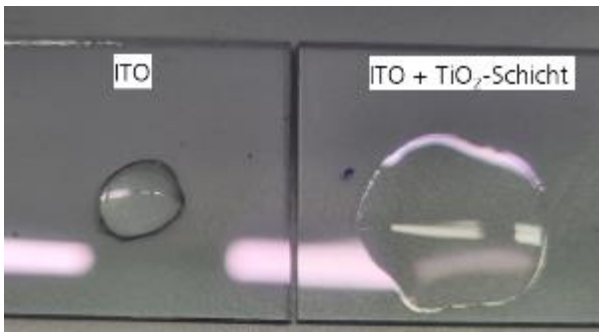

Abbildung 33: Benetzungseigenschaften der Titandioxidschicht im Vergleich zur ITO-Beschichtung: links ITO auf Glas mit Wassertropfen, rechts: Wassertropfen auf einer ITO-Schicht mit 40 nm Titandioxidbeschichtung

Erzielte Ergebnisse: Die Simulationen aus AP zur geforderten TiO_2-Besichtungsdicke lagen bei 40 nm auf den (40 µm/200 µm Elektroden). Mit der CVD-Technik ließen sich kontrolliert 40 nm ± 1 nm dicke TiO2-Schichten erzeugen. Die Schichtdickenmessung erfolge mittels Reflektometer (Abbildung 32) auf Referenz-Siliziumwafern, welche parallel zu den Glasobjektträgern beschichtet wurden. Abbildung 33 zeigt die erhöhte Hydrophilie beim Wassertropfenbenetzungstest der Titandioxidschicht im Vergleich zur ursprünglichen ITO-Oberfläche. Die Titandioxidschichten zeigen sich in der Praxis aufgrund der intrinsischen dielektrischen Eigenschaften des Titandioxids als untauglich, da diese bei 100 kHz, Wechselspannung zu Kurzschlüssen zwischen den Elektroden führten.

Einfluss auf die Transmissionseigenschaften: Die Transmissionseigenschaften wurden mittels UV-VIS-Spektrometer im UV-VIS-Bereich getestet (**Error! Reference source not found.**). Die relative Transmission des reinen Glasobjektträgers (Floatglas) wurde durch die 200 nm dicken ITO-Beschichtungen von 95 % auf 80 % gesenkt. Die 50 nm dünnen Titandioxid-Schichten zeigten hingegen keine Reduktion der relativen Transmission. Durch die Beschichtung mit SiOx konnte überraschenderweise eine Erhöhung der relativen Transmission bei ITO-beschichteten Glasobjektträgern nachgewiesen werden. Hier wird eine Anpassung der Brechungsindizes und die Minderung der Grenzflächenreflektion als ursächlich erachtet. Dies macht die SiOx-Beschichtung besonders vorteilhaft für Anwendungen, bei denen die optischen Eigenschaften von entscheidender Bedeutung ist, z.B. für Kameras.

AP 3: Laborprüfungen zum Reinigungseffekt der Elektrodenstrukturen(UFT, TUD)

Ziel: Experimentelle Überprüfung der simulierten Elektrodenparameter (AP 2) anhand der in AP1 definierten Modellsysteme; Finden von optimalen Parametern zur Erfüllung der in AP 1 definierten Anforderungen.

Laborprüfung der Simulationsergebnisse mit polymeren Partikeln

In der ersten Phase dieses Arbeitspakets zielen wir darauf ab, die theoretischen Simulationsergebnisse aus AP1, die experimentelle Beobachtung und die qualitative Geschwindigkeitsmessung der Flüssigkeitsströmung unter verschiedenen elektrischen Feldern für verschiedene flüssige Medien mit unterschiedlicher Leitfähigkeit zu validieren. Um die oben genannten Ziele zu erreichen, wurde ein Versuchsaufbau entworfen und mit einem 3D-Drucker

ausgedruckt, wie in Abbildung 34 dargestellt. Um die Arbeitssituation im Meerwasser zu imitieren, wurde die obere Platte (Abbildung 34 a) mit offener Oberseite entworfen, was auch die Beobachtung mit einem Fluoreszenzmikroskop (Zeiss, Axio Scope A1) von oben ermöglicht. Die untere Platte (Abbildung 34 b) dient zur Aufnahme der ITO-Glasobjektträger (75 x 25 mm) und zur Lagerung des Wassers.

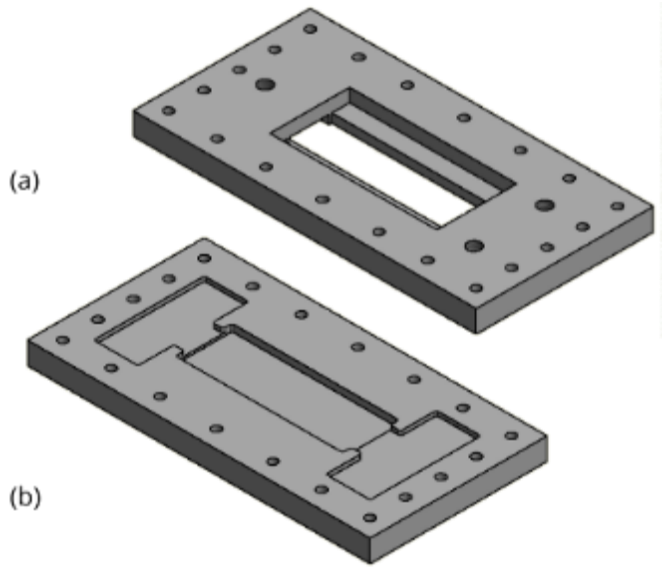

Abbildung 34: Schematischer Aufbau des Versuchsaufbaus mit oberer Platte (a) für Beobachtung und Stromanschluss und unterer Platte (b) für den ITO-Glasobjektträger.

Testpartikel: Fluoresbrite® gelbgrüne Polystyrol (PS)-Partikel (Polysciences, Deutschland) mit einem Durchmesser von 0,75 µm (1,08 x 10^{11} Partikel/mL, Anregungsmaximum = 441 nm, Emissionsmaximum = 486 nm) wurden für die Experimente verwendet. Natriumchlorid (NaCl) (Merck Deutschland) wurde mit Wasser in einer bestimmten Massenkonzentration gemischt, um salzhaltiges Wasser mit einer definierten Leitfähigkeit zu erzeugen, die mit einem tragbaren Leitfähigkeitsmessgerät (WTW Cond 3110) bei Raumtemperatur gemessen und bestimmt wird. Die Konzentration der Partikel in der NaCl-Suspension betrug 8,64 × 10^{9} Partikel/L. 0,005 Vol.-% Tween 20 (Merck Deutschland) wurde hinzugefügt, um die Wechselwirkungen zwischen den Partikeln zu verringern und die Suspension zu homogenisieren.

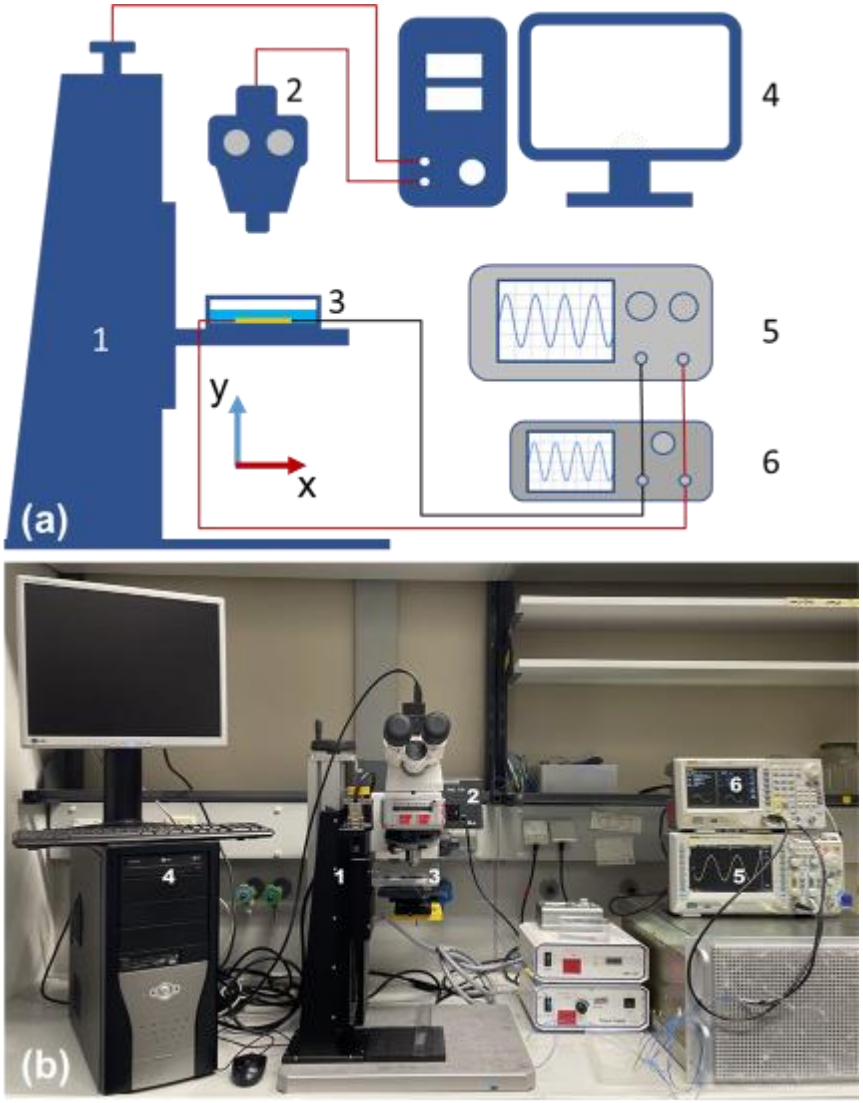

Abbildung 35: Schematische Darstellung (a) und Bild (b) des Versuchsaufbaus mit Lineartisch (1), Fluoreszenzmikroskop (2), elektrokinetischer Zelle (3), Computer (4), Oszilloskop (5) und Funktionsgenerator (6).

Abbildung 35 zeigt den Versuchsaufbau zur Partikelbeobachtung. Ein hochpräziser Lineartisch (LIMES150, OWIS) ermöglicht die präzise Bewegung in y-Richtung auf eine bestimmte Höhe durch den eingebauten Motor und wird durch die Software OWISoft v2.90 (OWIS, Deutschland) gesteuert. Er diente zum Halten, Steuern und Einstellen der Höhe der elektrokinetischen Zelle, die auf dem Boden eines Probenbehälters (85 × 130 × 20 mm^3) befestigt war (3 in Abbildung 35). Die Suspension wurde in den Probenbehälter gegeben, wobei die Höhe des Behälters bei 10 mm vom Boden des Probenbehälters gehalten wurde. Der Probenbehälter wurde auf zwei Translationstischen (THORLABS, DTS50/M) montiert, um die Positionen in x- und z-Richtung einzustellen. Ein Fluoreszenzmikroskop (ZEISS Scope A1) mit Kamera (FLIR Grasshopper 3, GS3-U3-51S5C-C), Objektiv (EC Epiplan 10X/0,25 M27) und Fluoreszenzfilterset (GFP) wurde zur Beobachtung, Erfassung und Speicherung der Videos der Bewegungsbahnen der Partikel auf einem Computer verwendet. Ein Funktionsgenerator

(RIGOL DG4062) wird verwendet, um ein elektrisches Signal der elektrokinetischen Zelle mit einer maximalen Spitze-Spitze-Spannung von 20 V und einer Frequenz von bis zu 40 MHz zu erzeugen. Die Signalausgabe des Funktionsgenerators wird mit einem Oszilloskop (RIGOL DS2072A) überwacht.

Nach dem Einfüllen der Partikelsuspension wird zunächst die Höhe des Nullpunkts ($y = 0$) ermittelt und festgelegt, indem das Objektiv des Fluoreszenzmikroskops auf die Oberfläche der ITO-Elektroden fokussiert wird. Die Null-Höhen-Position des Aufbaus wird für den Lineartisch in seiner Steuerungssoftware OWISoft v2.90 definiert. Durch die Einstellung der relativen Höhe des Lineartisches über OWISoft und den Motor können wir Partikeltrajektorien in verschiedenen Höhen vom ITO-Array aufnehmen. Der Funktionsgenerator wird eingeschaltet, um ein elektrisches Feld mit einer bestimmten Frequenz zu erzeugen, in dieser Arbeit 1 kHz. Das Oszilloskop misst das Ausgangssignal und zeichnet dann die effektive Spannung (U_{eff}) und die Frequenz auf. Die Videoclips der Partikelbewegung werden mit der Software FlyCapture 2 aufgenommen und gespeichert. Die Geschwindigkeit der Partikel wird mit der Software „Tracker“ gemessen und ausgewertet, einem kostenlosen Videomodellierungstool, das auf dem Open-Source-Physics (OSP)-Java-Framework basiert (https://physlets.org/tracker/).

Entsprechend den Ergebnissen von AP1 und AP2 wurde eine kleinste Elektrodengröße von 40 µm gewählt. Die Gestaltung der Geometrie der Elektrodenkonfiguration hängt ausschließlich von den Elektrodenverhältnissen ab. Die Elektrodenverhältnisse werden mit 3, 4, 5, 6 und 9 variiert, um die Auswirkungen der Elektrodenverhältnisse auf den ETE-Flüssigkeitsstrom zu demonstrieren. Das erste Gruppenexperiment hat eine feste Laserätzfläche für ineinandergreifende Elektroden von 20 x 50 mm (Abbildung 26) ergeben. Alle in diesem Arbeitspaket durchgeführten Experimente wurden fünfmal wiederholt, um die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse zu überprüfen.

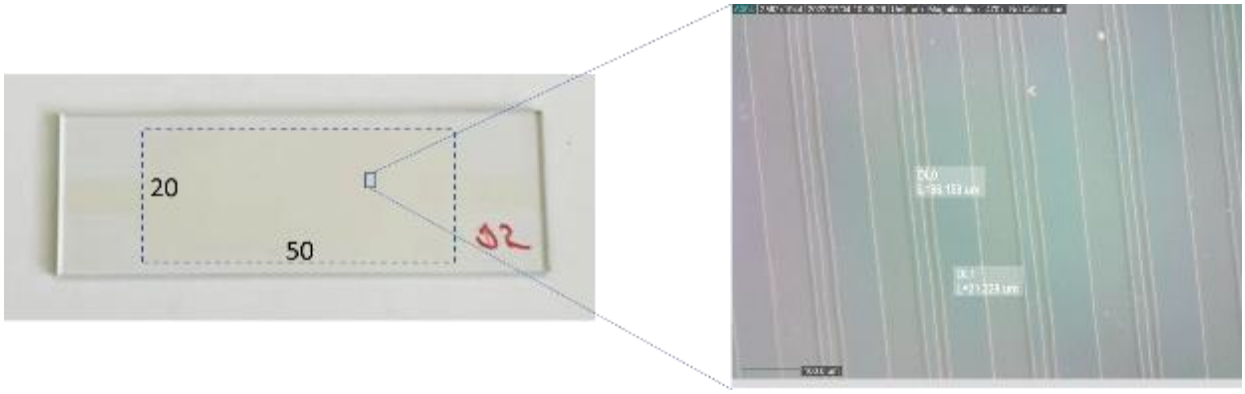

Abbildung 36: Lasergeätzte Elektroden auf einem Glasobjektträger

Abbildung 36 zeigt einen Glasobjektträger mit Elektroden. Die interdigitale Elektrodenkonfiguration mit einer kleinen Elektrode von 40 µm und einem Elektrodenverhältnis von 5 liegt im gestrichelten Rechteck mit einer Größe von 50 x 20 mm.
Experimentelle Ergebnisse mit Elektrodenkonfigurationen mit Verhältnissen von 3, 4 und 5 zeigen ähnliche ETE-Flüssigkeitsströmungen mit kleinen Wirbeln in der Nähe der Elektroden und größeren Wirbeln weit weg von den Elektroden sowie eine unidirektionale Flüssigkeitsströmung weiter weg von der Gleitfläche, wenn andere Parameter identisch sind. Daher konzentrieren wir uns in diesem Bericht auf die Darstellung der Ergebnisse mit einer der Elektrodenkonfigurationen. Die beobachteten Phänomene entsprechen genau den Simulationsergebnissen. Sobald das elektrische Feld eingeschaltet wurde, führen die induzierten DEP- und ETE-Effekte dazu, dass sich 1µm-PS-Partikel auf zwei verschiedene Arten von den Elektroden wegbewegen: nDEP bewegt die Partikel zu den schwächeren Stellen des elektrischen Feldes, während die ETE-Flüssigkeitsströmung die Partikel in Wirbeln dreht, wie in **Error! Reference source not found.** dargestellt. Nach 60 s ist die Oberfläche des Objektträgers vollständig mit Partikeln bedeckt, so dass sich keine Partikel mehr zwischen den Elektroden befinden. Einige Partikel sind in der Mitte der Elektroden gefangen, während andere Partikel sich in Wirbeln bewegen. Dies zeigt deutlich die beiden Arten von Flüssigkeitsströmungen, die durch Auftrieb und elektrothermische Effekte hervorgerufen werden, wie sie in der Simulationsstudie in AP1 vorhergesagt wurden. Der Reinigungseffekt ist schnell und gut. Wie in AP1 vorausgesagt, werden jedoch tote Zonen in der Mitte der Elektroden festgestellt.
Es wurden Experimente mit Elektrodenkonfigurationen mit Verhältnissen von 6 und 9 durchgeführt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass große Wirbel im gesamten Beobachtungsbereich dominieren. Der in der Simulation (AP1) gezeigte große Wirbel wird theoretisch hauptsächlich durch die durch Auftrieb erzeugte ETE-Fluidströmung hervorgerufen. Das bedeutet nicht, dass die elektrothermisch induzierte ETE-Fluidströmung nicht existiert. Wie unter dem Fluoreszenzmikroskop beobachtet, ist der ETE-Fluidstromwirbel sehr klein und befindet sich nur am Rand der kleinen Elektrode. Beide Elektrodenkonfigurationen mit einem Verhältnis von 6 und 9 zeigen ein recht ähnliches Phänomen, daher präsentieren wir in diesem Bericht qualitative Ergebnisse mit einem Elektrodenverhältnis von 9.

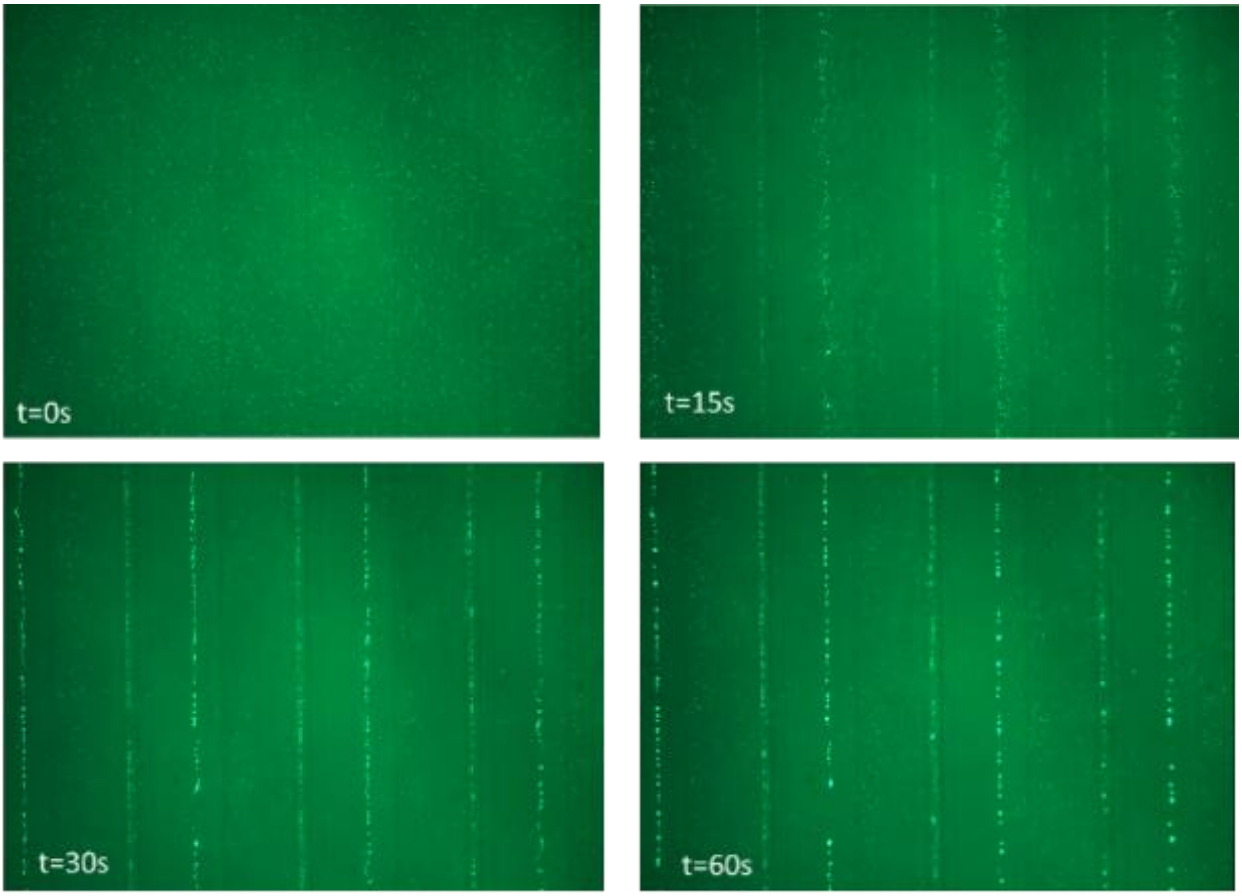

Abbildung 37: Strömungsphänomene einer ETE-Flüssigkeit (Leitfähigkeit 0,01 S/m) auf einer lasergeätzten asymmetrischen ITO-Elektrodenkonfiguration mit 40 µm Elektrodenbreite, einem Elektrodenverhältnis von 5, einer angelegten Spannung von 7 Veff und 1 kHz.

Zu Beginn des Experiments ist die Oberfläche des ITO-Objektträgers vollständig mit Partikeln bedeckt. Sobald das elektrische Feld eingeschaltet war, wurden große Wirbel beobachtet, die die Partikel in einer Richtung von links nach rechts auf und ab bewegten, wie in Abbildung 38 gezeigt. Kleine Wirbel wurden nur in unmittelbarer Nähe des Randes der kleinen Elektroden beobachtet. Nach 22 s ist die Oberfläche bereits frei. Aufgrund des geringeren Flüssigkeitsstroms und des nDEP-Effekts wurden auch zwei tote Zonen beobachtet (Abbildung 38). Im Gegensatz zu dem Phänomen, das bei Elektroden mit einem Verhältnis von 5 beobachtet wurde, werden bei den größeren Elektroden mehr Partikel eingeschlossen. Dies ist auf die viel geringere Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit zurückzuführen, die durch die geringere elektrische Feldstärke in der Mitte der viel größeren Breite der größeren Elektroden verursacht wird. Die maximale Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeit ist bei einem höheren Elektrodenverhältnis größer als bei einer Elektrodenkonfiguration mit einem niedrigeren Elektrodenverhältnis. Die gemittelte Geschwindigkeit bei einem Elektrodenverhältnis von 9 ist offensichtlich viel höher als bei einem kleineren Elektrodenverhältnis von 5 und kann auf etwa 190 µm/s geschätzt werden.

In allen oben durchgeführten Experimenten wurde bewiesen, dass die ETE-induzierte Flüssigkeitsströmung auftreten kann, wenn sich das System in einem offenen Feld befindet, was in der Literatur noch nie experimentell untersucht wurde, und es wurde sogar angenommen, dass eine geschlossene Oberfläche für die Erzeugung der ETE-Flüssigkeitsströmung entscheidend ist. Dies wiederum bestätigt, dass das Konzept auch in Meerwasser angewendet werden kann.

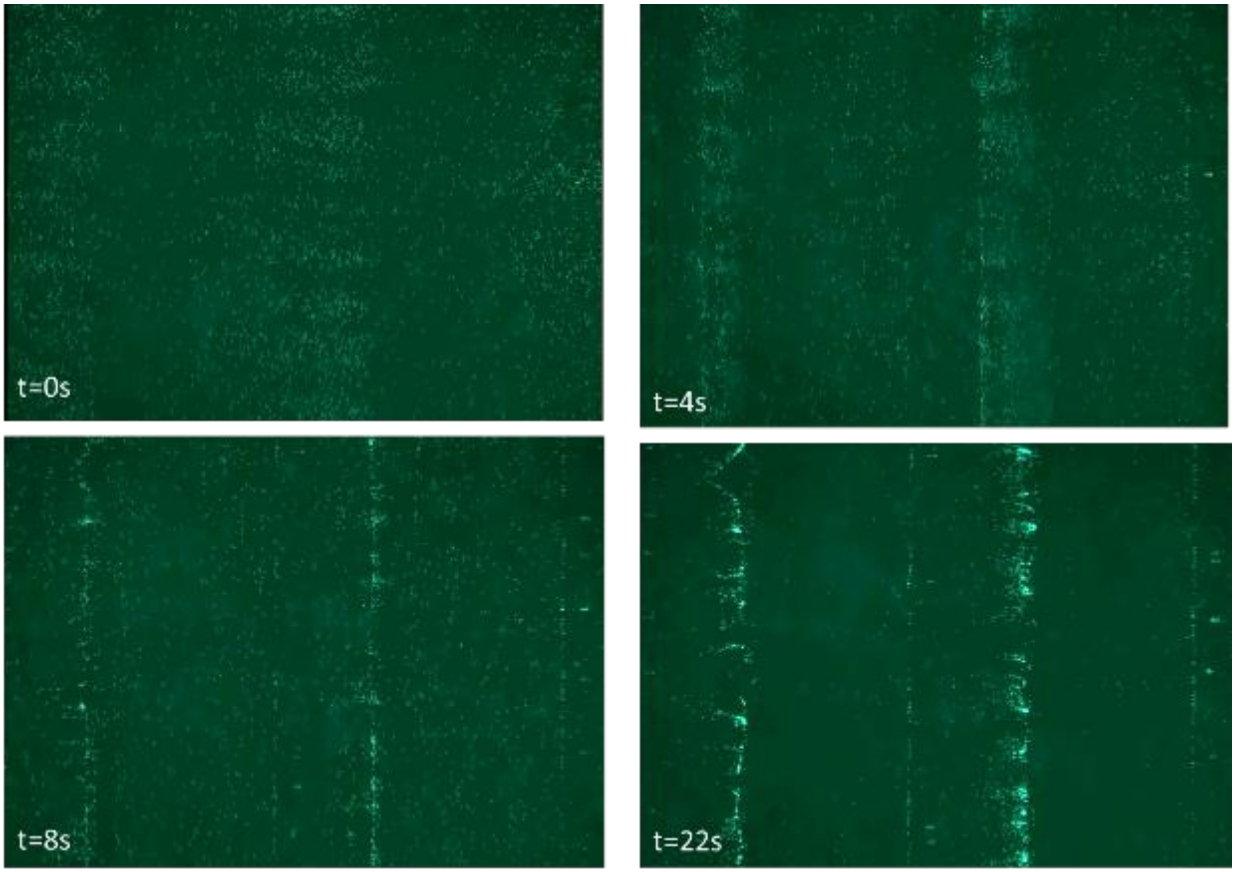

Abbildung 38: Strömungsphänomene der ETE-Flüssigkeit (Leitfähigkeit 0,01 S/m) auf einer lasergeätzten asymmetrischen ITO-Elektrodenkonfiguration mit 40 µm Elektrodenbreite, einem Elektrodenverhältnis von 9, einer angelegten Spannung von 7 Veff und 1 kHz.

Der Einfluss der angelegten Spannung auf den ETE-Flüssigkeitsstrom und damit auf die Reinigungswirkung wurde für beide Elektrodenkonfigurationen mit Verhältnissen von 5 und 9 untersucht. Die Spannung wurde von 3,5 V_{eff} bis 10 V_{eff} variiert, wobei die anderen Parameter unverändert blieben: Leitfähigkeit des Mediums 0,01 S/m, 1µm fluoreszierende Latexpartikel und 1 kHz Frequenz.

Tabelle 1: Einfluss der Spannung auf die Reinigungszeit bei verschiedenen Elektrodenverhältnissen.

Verhältnis der Elektroden	Spannung / $[V]_{eff}$	Reinigungszeit / [s]
9	3,5	41
	5,25	30
	7	22
	10,5	13
5	3,5	83
	5,25	66
	7	60
	10,5	45

Die Reinigungszeit ist definiert als die Zeit, in der das System einen stabilen Zustand der Flüssigkeitsströmung erreicht, in dem die Anzahl der eingeschlossenen Partikel nicht weiter ansteigt und die Wirbel und unidirektionalen Flüssigkeitsprofile konstant sind. Mit zunehmender Spannung verkürzt sich die Reinigungszeit für beide Elektrodenkonfigurationen mit unterschiedlichen Elektrodenverhältnissen. Dies entspricht genau den Vorhersagen aus dem Vorgeschlagenem theoretischen Modell und der Simulation in AP1: eine höhere elektrische Feldstärke aufgrund der angelegten Hochspannung erzeugt stärkere ETE- und DEP-Effekte. Ein Vergleich der simulierten Daten und der experimentell bestimmten ist dazu in Abbildung 39 zu sehen. Die gesamte Reinigungszeit bei einer Elektrodenkonfiguration mit größerem Elektrodenverhältnis ist kürzer als bei einem kleineren Elektrodenverhältnis. Der geringere Strom, der aufgrund des höheren Widerstands bei einem größeren Elektrodenverhältnis erzeugt wird, verbraucht bei gleicher angelegter Spannung auch weniger Energie. Daher wird ein größeres Elektrodenverhältnis für die Elektrodenkonfiguration als optimales Design angesehen. Die Frequenz als zweiter elektrischer Parameter in DEP- und ETE-Systemen ist wichtig zu untersuchen. Sie bestimmt die Anforderungen der Stromversorger und damit die Kosten des gesamten Systems. Die in den Experimenten gewählte Frequenz lag unter 200 kHz, wie in der Simulationsvorhersage vorgeschlagen.

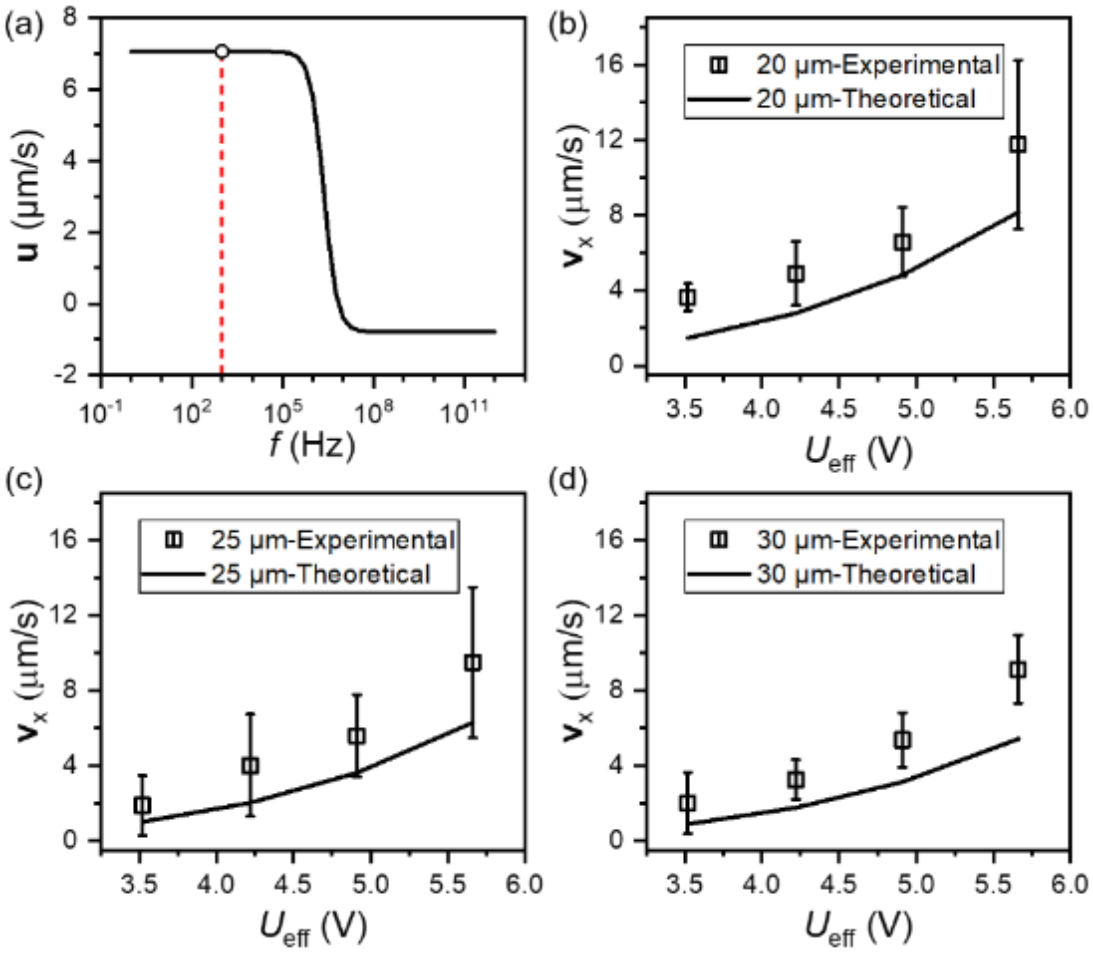

Abbildung 39: (a) Simulierte Durchflussrate in 20 µm Höhe mit einer Eingangsspannung von U_{eff} = 5,66 V als Funktion der Frequenz f. (b-d) Experimentell gemessene und simulierte Geschwindigkeiten in verschiedenen beobachteten Höhen von 20, 25 und 30 µm über den Elektroden. (w_1 = 40 µm, w_2 = 200 µm, σ_m = 0,01 S/m und f = 1 kHz)

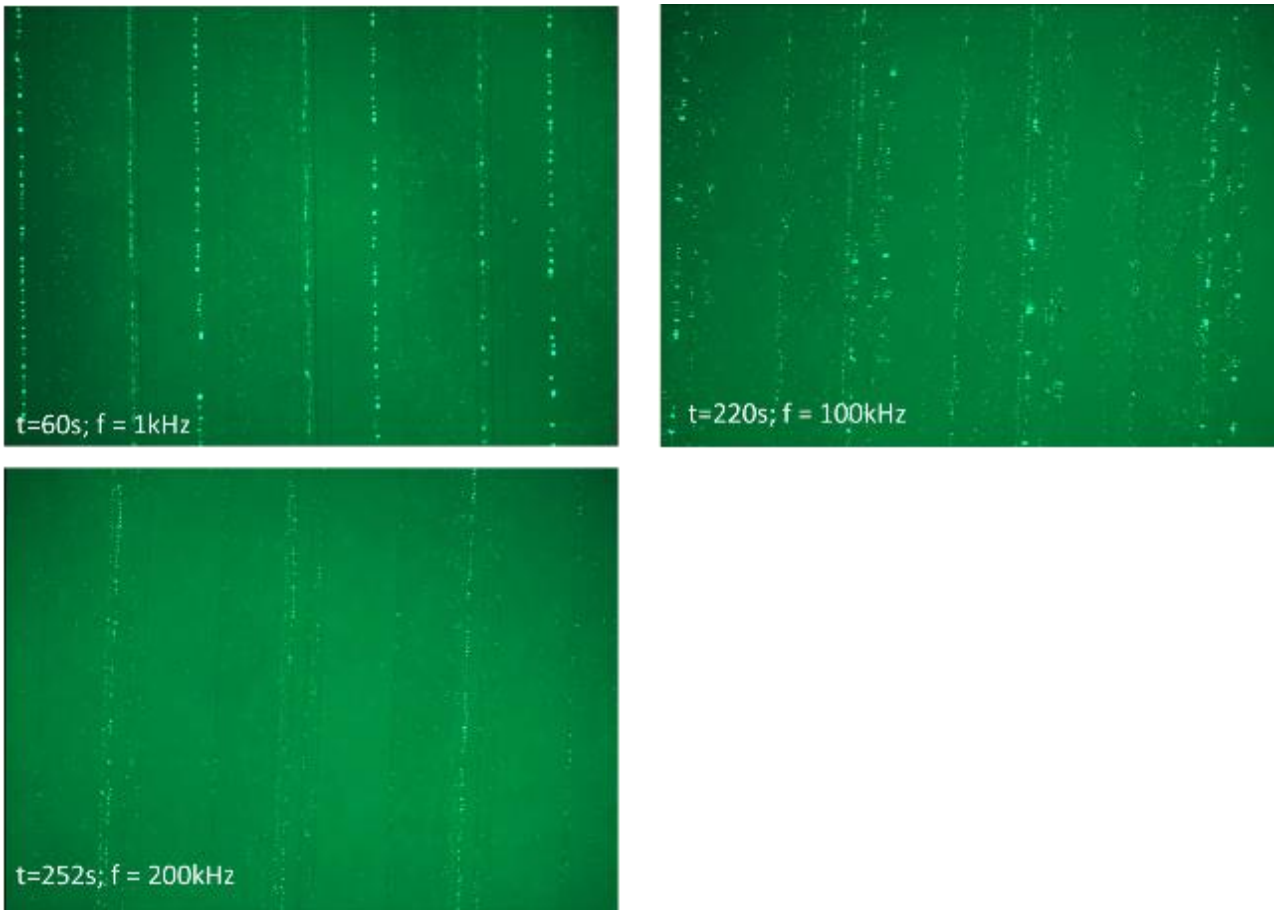

Abbildung 40: Einfluss der Frequenz auf den ETE- und DEP-Reinigungseffekt bei identischer Elektrodenkonfiguration mit einem Elektrodenverhältnis von 5 und einer Spannung von 7 Veff .

Anders als in der Simulation vorhergesagt, ist der ETE-induzierte Flüssigkeitsstrom stark von der Frequenz abhängig. Am Beispiel des Elektrodenverhältnisses von 5 zeigt sich, dass die ETE-induzierte Flüssigkeitsströmung bei niedrigeren Frequenzen einen viel stärkeren ETE-Effekt aufweist und somit die Oberfläche schneller und effektiver reinigt, wie in Abbildung 40 dargestellt. Bei den angewandten Frequenzen von 100 kHz und 200 kHz wurden sogar einige Partikel auf den ITO-Glasobjektträgern überhaupt nicht bewegt. Der Grund dafür könnte ein Tiefpassfiltereffekt aufgrund des relativ hohen Widerstands des ITO-Materials sein der folglich untersuchte wurde.

Neben den oben genannten Parametern wurde auch die Fläche der Elektroden variiert, um ihren Einfluss auf den Leistungsbedarf zu untersuchen. Die Fläche der Elektroden variierte von 20 x 50 mm, 20 x 20 mm, 10 x 30 mm und 10 x 10 mm. Bis jetzt ist es sehr offensichtlich, dass eine kleine Elektrodenfläche viel weniger Energie benötigt. Durch die Leistungsoptimierung konnte ein effektiver Reinigungseffekt bereits mit der Ausgangsleistung eines Funktionsgenerator erzielt werden, ohne dass ein zusätzlicher Verstärker notwendig war.

Als wichtiger Referenzindikator für elektrokinetische Systeme wurde das PPA berechnet, um das Verhältnis zwischen Antifouling-Leistung und Energieverbrauch des vorgeschlagenen Systems zu bewerten (Abbildung 41). Wie erwartet, nimmt PPA bei kleinem *r* schnell mit r ab und verlangsamt sich dann allmählich bei weiterem Anstieg von *r*. Das Antifouling-System weist bei kleinen Seitenverhältnissen ($r < 3$) einen hohen Energieverbrauch. Daher ist es notwendig, ein asymmetrisches Elektrodendesign anstelle einer symmetrischen Elektrodenanordnung zu wählen, um die Energieeffizienz des vorgeschlagenen Systems zu verbessern.

Bei einem Seitenverhältnis von etwa 3 wird die Flüssigkeit an der Oberfläche der Elektroden hauptsächlich durch ACET angetrieben, wobei der Auftriebseffekt gering. Diese Konfiguration zeigt eine starke unidirektionale Strömung mit hoher ACET- und DEP-Teilchengeschwindigkeit, während gleichzeitig der Energieverbrauch (PPA) erheblich geringer ist als bei einer symmetrischen Anordnung ($r = 1$). Wenn *r* groß genug ist, um den Wendepunkt der Durchflussrate zu überschreiten (Abbildung 41 a), wird die Flüssigkeitsströmung auf der Oberfläche des Antifouling-Systems durch Auftrieb angetrieben, wobei die Flüssigkeitsrate mit zunehmendem Seitenverhältnis weiter steigt. In diesem Fall arbeitet das System mit einem ausreichend niedrigen Energieverbrauch, während die schwächere unidirektionale Strömungsgeschwindigkeit und die nDEP-Kraft seine Fähigkeit zur Entfernung sedimentierter Partikel abschwächt. Andererseits bleiben die Strömungsgeschwindigkeit und die Geschwindigkeit der DEP-Partikel unabhängig von der Spannung bei einem Seitenverhältnis von etwa 3 auf ihrem Maximum. In diesem Fall ist eine leistungsstarke Entfernung von Oberflächensedimenten bei geringem Energieverbrauch durch Regulierung der Betriebsspannung des Antifouling-Systems möglich.

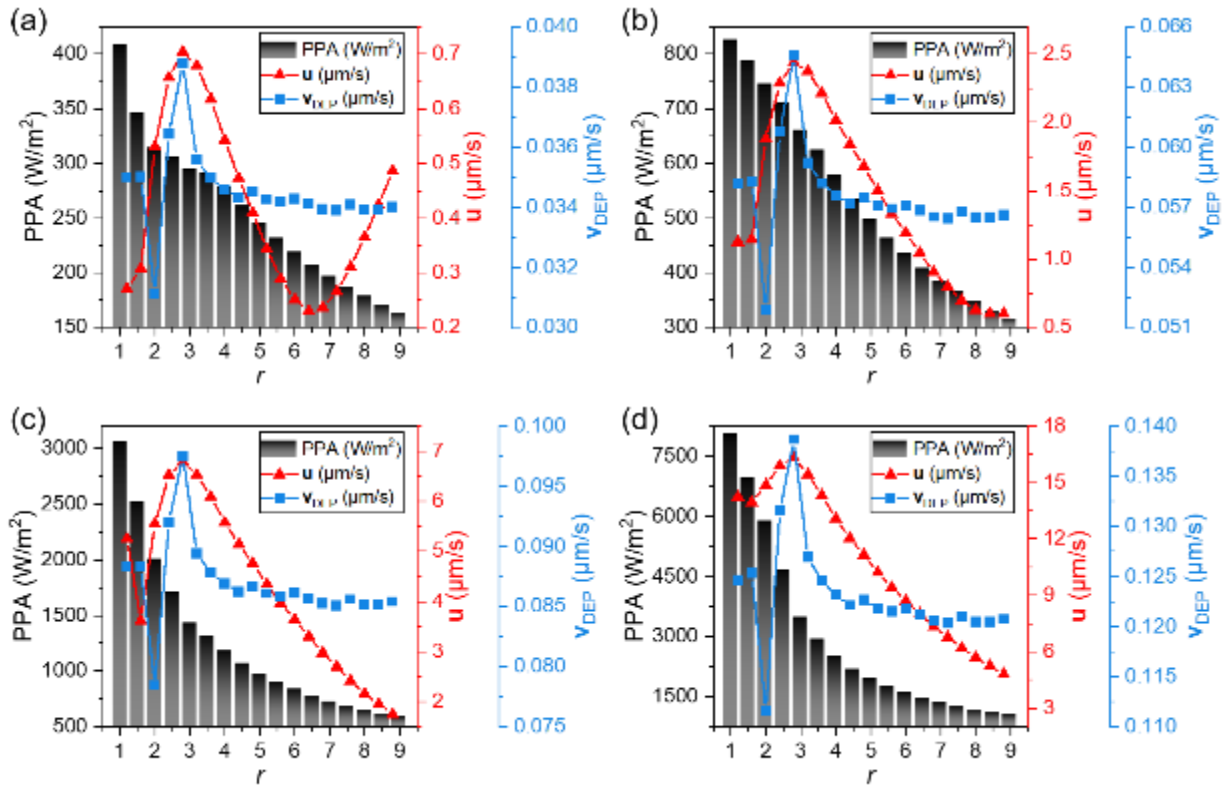

*Abbildung 41: Der Einfluss des Aspektverhältnisses (r) auf die berechnete Leistung pro Flächeneinheit (PPA), die Flüssigkeitsdurchflussrate (**u**) bzw. die DEP-Partikelgeschwindigkeit ($\boldsymbol{v}_{DEP}$) an einem der experimentellen Beobachtungspunkte bei einer Partikelhöhe von 20 µm mit verschiedenen Eingangsspannungen: (a) U_{eff} = 0,7 V; (b) U_{eff} = 0,9 V; (c) U_{eff} = 1,1 V; (d) U_{eff} = 1,3 V. (w_1 = 40 µm, σ_m = 5,31 S/m, und f = 100 kHz)*

Laboruntersuchungen zur Anti-Foulingwirkung

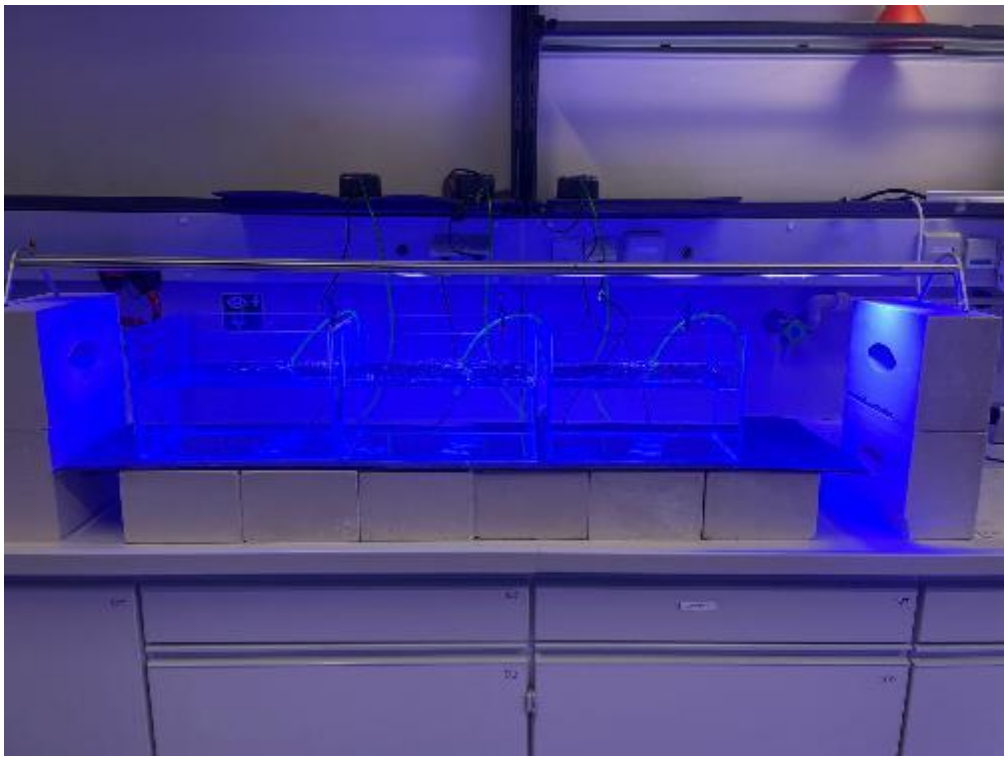

Abbildung 42: Aquarien für biologische Bewuchsversuche.

In diesem Arbeitspaket wurden drei Aquarien (Abbildung 42) eingerichtet, um den biologischen Bewuchs auf verschiedenen Objektträgern zu untersuchen. Blaues Licht wird verwendet, um sicherzustellen, dass genügend Licht durch das Meerwasser bis zum Boden der Aquarien gelangt, wo die Glasobjektträger waagerecht auf die Meerwasseroberfläche gelegt werden. Die Luftumwälzung durch eine Pumpe soll für ausreichend Sauerstoff sorgen und Kohlendioxid aus den Aquarien entfernen. Nach intensiver Diskussion mit Meeresbiologen des Marum Bremen schlagen wir vor, genau das Meerwasser zu verwenden, das sie in ihrer Forschung verwenden, um das biologische Fouling in einer realistischeren Umgebung zu untersuchen. Dadurch könnten Bewuchs- und Antifouling-Ergebnisse erzielt werden, die dem Phänomen, das in natürlichem Meerwasser auftritt, sehr viel näherkommen. Die Eigenschaften des Meerwassers, einschließlich Leitfähigkeit, pH-Wert und Temperatur, werden gemessen und überwacht. Aus dem Meerwasser wurden Proben entnommen und anschließend die Elementkonzentrationen mit ICP-OES gemessen (siehe Tabelle 2). Die Elementkonzentrationen entsprechen in etwa denen in der Literatur. Die Echtzeitmessung der Leitfähigkeit, des pH-Werts und des Salzgehalts des Meerwassers in den Aquarien zeigt stabile Ergebnisse von 5,4 S/m, 8,2 und 35 bei einer durchschnittlichen Temperatur von 21°C.

Tabelle 2: Mit ICP-OES gemessene Elementkonzentrationen im Meerwasser, das in diesem Projekt in Aquarien verwendet wurde.

ELEMENTE IN LÖSUNG IM MEERESWASSER (gelöste Gase nicht eingeschlossen)		
Element	Konzentration / [mg/kg] (Literatur) [7]	Konzentration / [mg/kg](ELEKTRA)
Natrium	10561	11208
Magnesium	1272	1343
Schwefel	884	910
Kalzium	400	450
Kalium	380	422
Brom	65	63
Strontium	13	9
Bor	4,6	4
Silizium	0,02-4,0	0,151
Aluminium	0,5	0
Lithium	0,1	0,193
Phosphor	0,001-0,10	0,037
Jod	0,05	0,034
Arsen	0,01-0,02	0
Eisen	0,002-0,02	0
Mangan	0,001-0,01	0,017
Kupfer	0,001-0,01	0
Zink	0,005	0,008
Blei	0,004	0
Molybdän	0,0005	0,011
Silber	0,0003	0
Vanadium	0,0003	0
Nickel	0,0001	0,0005
Indium	0	0
Chrom	0	0
Kobalt	0	0
Zinn	0	0

In den ersten Experimenten wird das Fouling auf blankem Glassubstrat (ohne ITO-Beschichtung) getestet und bewertet. Die Objektträger werden für eine bestimmte Dauer (5 min,

30 min, 60 min, 2 h, 12 h bzw. 24 h) in Aquarien gelegt und dann zur Messung der Lichtdurchlässigkeit mit einem Lichtdurchlässigkeitsmesser (Linshang, LS116) entnommen. Die Objektträger wurden dann mit einem Mikroskop beobachtet, das mit einer Kaltlichtquelle beleuchtet wurde, um Wasser, organische Verbindungen und biologische Mikroben darin zu erhalten. Alle Experimente wurden fünfmal wiederholt, und nur ein Beispiel wird in diesem Bericht gezeigt.

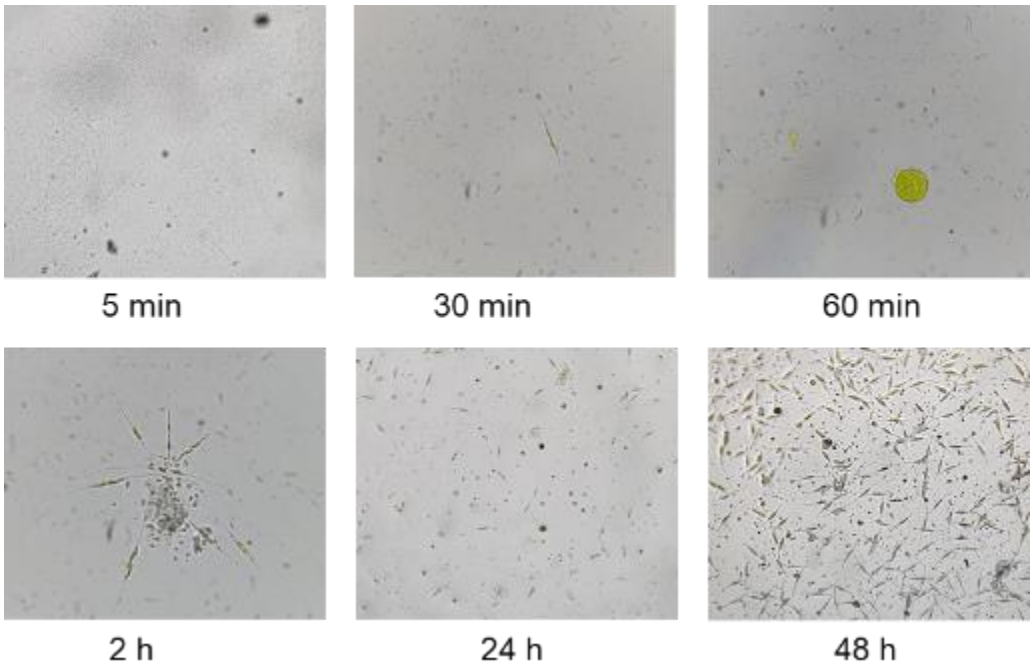

Abbildung 43: Biologischer Bewuchs auf blankem Glasobjektträger (ohne ITO-Beschichtung) in zwei Tagen.

Die Lichtdurchlässigkeit eines nackten Glassubstrats liegt im Durchschnitt bei 91,40 %. Nach 5 Minuten sinkt die Lichtdurchlässigkeit auf etwa 76 %. Nach 48 Stunden ist die Lichtdurchlässigkeit sogar auf etwa 62 % gesunken. Das Phänomen der verringerten Lichtdurchlässigkeit lässt sich anhand der unter dem Mikroskop aufgenommenen Bilder gut beschreiben (Abbildung 43). In 30 Minuten ist die Glasoberfläche bereits mit vielen kleinen Mikroben besiedelt. In 60 Minuten ist eine Mikroalge deutlich auf der Oberfläche zu sehen. Nach 48 Stunden ist die gesamte Oberfläche fast vollständig von aufgewachsenen Mikroben bedeckt.

Um den Antifouling-Effekt durch ein elektrisches Feld in Aquarien zu untersuchen, wurde ein neuer Versuchsaufbau zur Aufnahme der ITO-beschichteten Glasobjektträger entworfen und mit einem 3D-Drucker konstruiert (Abbildung 44). Er besteht aus zwei Teilen. Der obere Teil (Abbildung 44 a) dient dazu, die ITO-Elektroden an den Funktionsgenerator anzuschließen und sie für die Antifouling-Funktion dem Meerwasser auszusetzen, während die möglicherweise

freiliegenden elektrischen Verbindungen direkt auf dem ITO versiegelt und isoliert werden, um elektrochemische Reaktionen an den Metallanschlüssen zu vermeiden. Der untere Teil (Abbildung 44 b) dient zur Aufnahme der ITO-Glasobjektträger. An der Unterseite des unteren Teils (Abbildung 44 d) werden zwei kleine runde Buchsen zur Montage von Magneten verwendet, um den Aufbau am Boden von Aquarien zu befestigen.

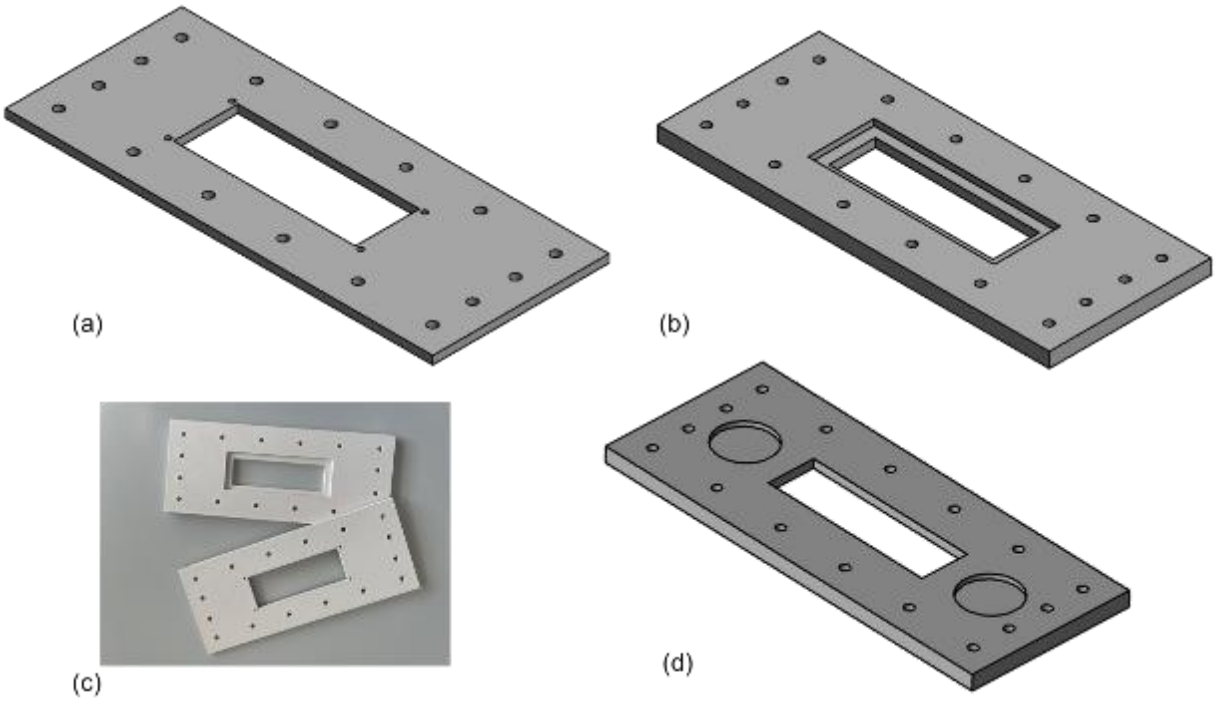

Abbildung 44: Versuchsaufbau für den Bewuchsschutztest in Aquarien, bestehend aus der oberen Platte (a), der Oberseite (b) und der Unterseite (d) der unteren Platte sowie einem 3D-gedruckten Aufbau (c).

Drei von vier vorbereiteten Versuchsaufbauten wurden für einen Zeitraum von 25 Tagen zur Bewuchsprüfung in das Aquarium gestellt, davon einer zur Kontrolle (ohne elektrisches Feld), einer zum Funktionstest mit elektrischem Feld und einer zur Impedanzmessung. Die Lichtdurchlässigkeit wurde zur quantitativen Bestimmung des Bewuchses auf den getesteten Objektträgern mit einem Lichtdurchlässigkeitsspektroskop (Linshang, LS116) intermittierend gemessen. Während der Messung der Lichtdurchlässigkeit wurde der Objektträger unter dem Mikroskop beobachtet, um den biologischen Bewuchs zu erkennen und die biologischen Spezies auf der Oberfläche der Proben zu bestimmen.

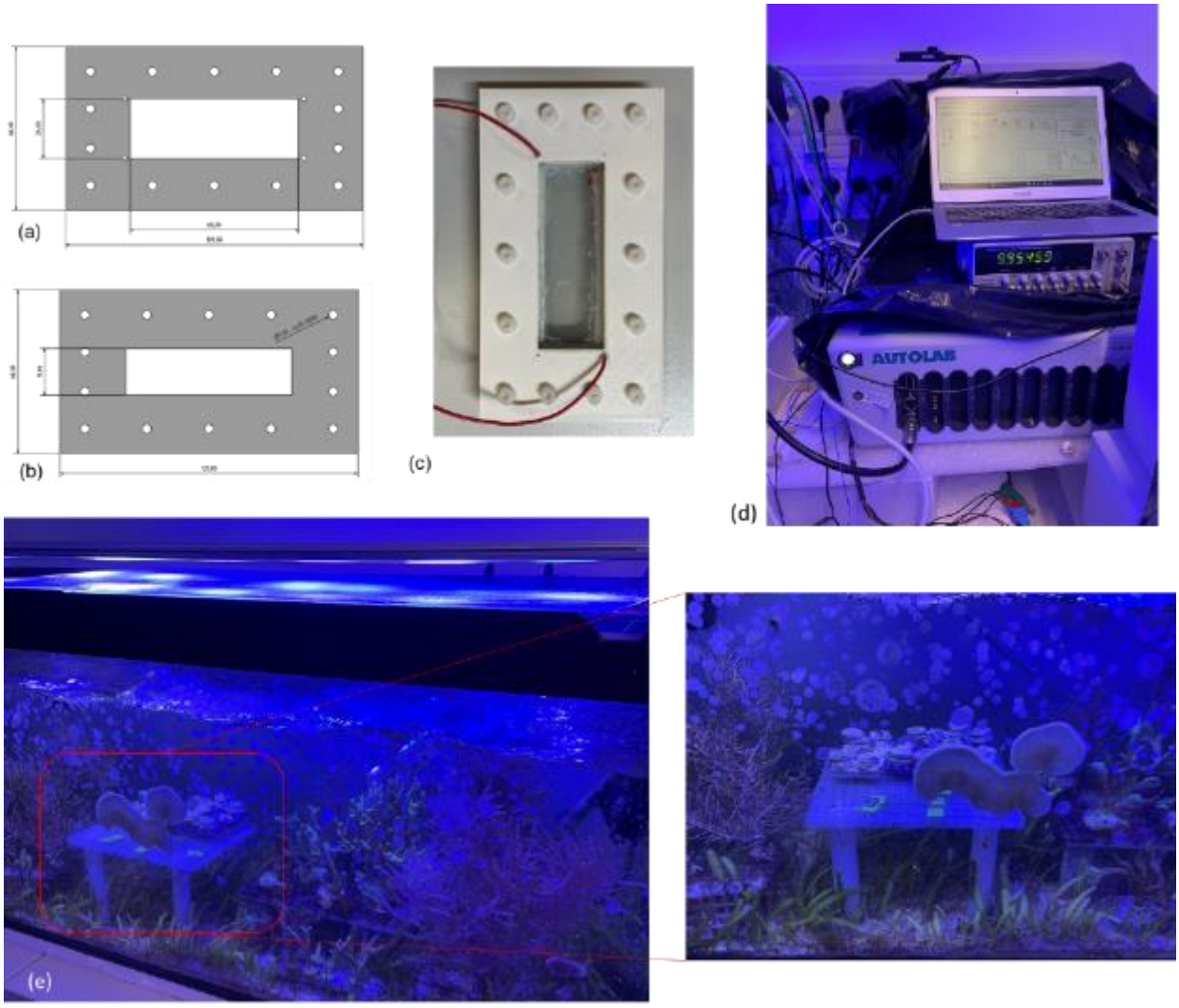

Abbildung 45: (Anti-)Fouling-Test mit 3D-gedruckten elektrokinetischen Zellen (a, b, c), die von einem Funktionsgenerator (d) im Aquarium (e) betrieben werden.

Das Testmuster mit elektrischem Feld, einer Spannung von 2 Veff und einer Frequenz von 2 MHz, zeigte eine sehr gute Wirkung bei der Unterdrückung der Verschmutzung, während die Oberfläche des Objektträgers ohne elektrisches Feld nach 16 Tagen stark verschmutzt war, wie in Abbildung 46 dargestellt. Bis zum 25. Testtag behielt der Objektträger mit dem angelegten elektrischen Feld immer noch eine gute Transparenz, wie in Abbildung 47 a dargestellt. Der Objektträger ohne elektrisches Feld ist jedoch bereits fast vollständig mit biologischen Bewuchsstoffen bedeckt (Abbildung 47 b). Der Objektträger ohne elektrisches Feld war im Vergleich zum Objektträger mit angelegtem elektrischem Feld sehr schnell verschmutzt. In den ersten 2 Tagen beträgt die relative Lichtdurchlässigkeit des Testobjektträgers ohne elektrisches Feld nur etwa 60 % derjenigen vor dem Experiment, während der Objektträger mit angelegtem elektrischem Feld die gleiche Lichtdurchlässigkeit aufweist, wie in Abbildung 48 dargestellt. Bis zum 16. Testtag war die Lichtdurchlässigkeit des Testobjektträgers ohne elektrisches Feld auf unter 20 % gesunken (Abbildung 48), was eine ernsthafte Verschmutzung darstellt (Abbildung

47 b). Am Ende des Versuchs (am 25. Tag) war der Objektträger ohne elektrisches Feld mit einer relativen Lichtdurchlässigkeit von nur noch 10 % fast vollständig verschmutzt (Abbildung 48). Bei gleicher Versuchsdauer von 25 Tagen zeigte der Testobjektträger mit angelegtem elektrischem Feld jedoch eine sehr gute Reinigungswirkung mit einer relativen Lichtdurchlässigkeit von über 80 % (Abbildung 48).

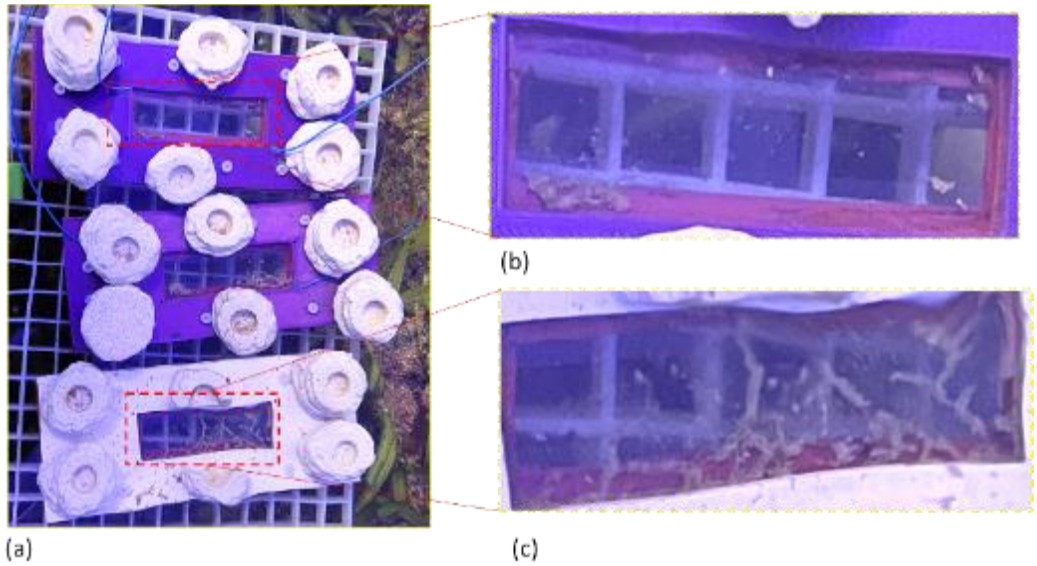

Abbildung 46: Ergebnisse des Bewuchstests nach 16 Tagen mit drei Objektträgerproben (von oben nach unten) für Antifouling mit elektrischem Feld, Impedanzmessung und Kontrolle (ohne elektrisches Feld) (a) im Aquarium, mit der kaum bewachsenen Objektträgeroberfläche mit elektrischem Feld (b) und der offensichtlich bewachsenen Oberfläche ohne elektrisches Feld (c).

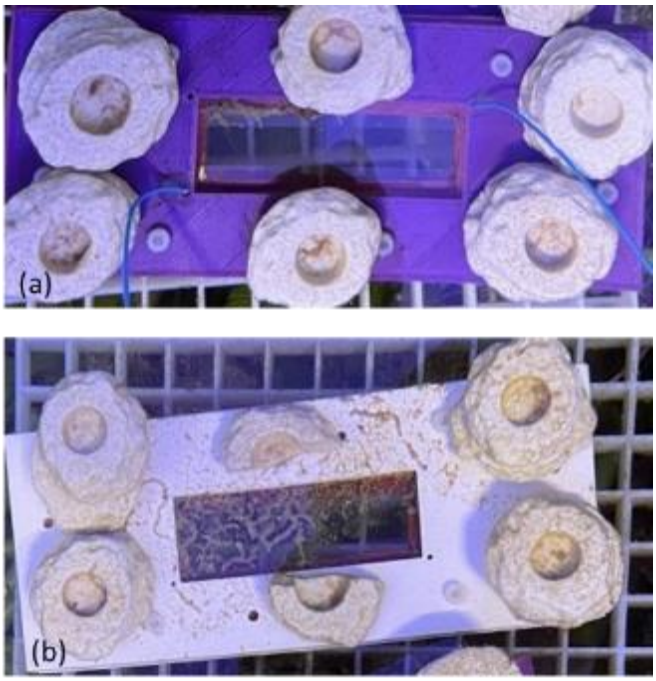

Abbildung 47:25-Tage-Verschmutzungstests im Aquarium mit (a) und ohne elektrisches Feld (b).

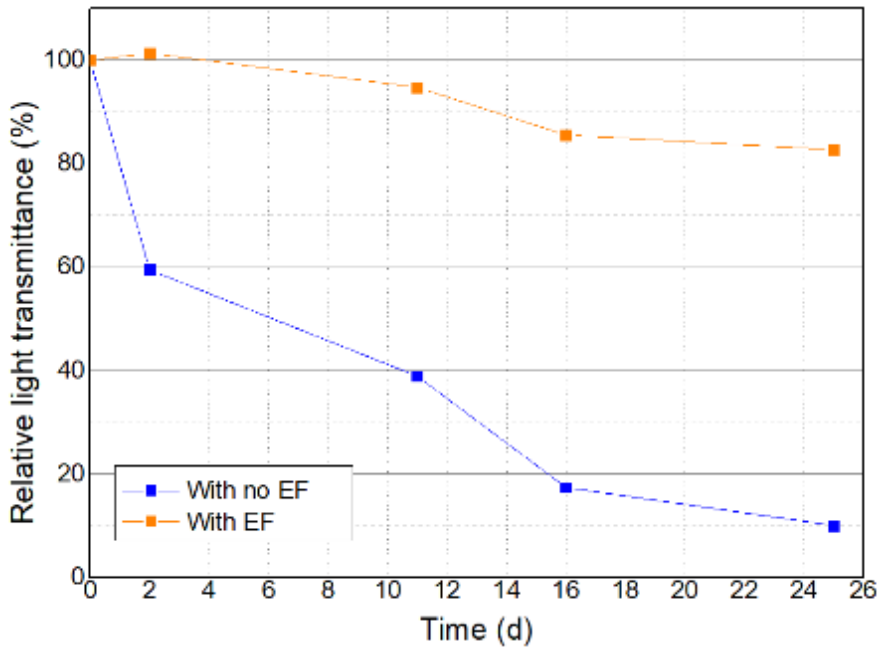

Abbildung 48: Ergebnisse der relativen Lichtdurchlässigkeit für ITO-beschichtete Objektträger mit und ohne elektrisches Feld in einem 25-tägigen Testzeitraum im Aquarium.

Die offensichtliche Antifouling-Wirkung der elektrokinetischen Zelle im Aquarium bewies das Prinzip und bestätigte die Angemessenheit des Konzepts in einer aktiven biologischen Umgebung mit hochleitfähigem wässrigem Medium. Auf der Grundlage der in diesem Arbeitspaket erzielten Ergebnisse haben wir elektrokinetische Zellen wie in Abbildung 49 dargestellt entworfen und konstruiert.

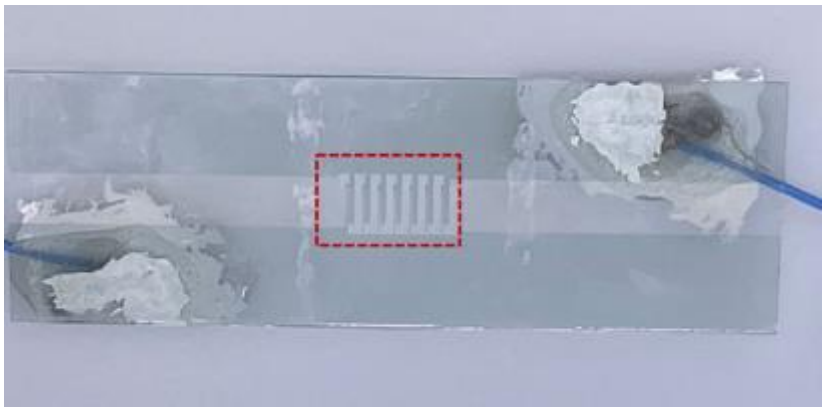

Abbildung 49: Aufbau der elektrokinetischen Zelle für den Feldtest mit der im roten Rechteck dargestellten Elektrodenanordnung. Die Elektroden sind mit einem Silberkleber (PANACOL Elecolit 323) verbunden, der mit einem Zweikomponentenkleber (UHU Plus Sofortfest) isoliert und mit einem Marinesilikonkleber (Silikaflex292x) versiegelt wurde.

Erweiterter Versuchsplan – Foulingmonitoring:

Da das Fouling die Permittivität an der Elektrodenoberfläche beeinflusst, und die Messung dieser zum Monitoring genutzt werden könnte haben daher die EIS für drei verschiedene Elektrodenkonfigurationen gemessen: symmetrische Elektrodenanordnung mit einem Abstand zwischen den Elektroden von 100 µm, symmetrische Elektrodenanordnung mit einem Abstand zwischen den Elektroden von 40 µm und asymmetrische Elektrodenanordnung mit einer kleineren Elektrode von 40 µm und einem Elektrodenverhältnis von 5. Um die Impedanzmessung statistisch auszuwerten und auch die Reproduzierbarkeit zu überprüfen, wiederholen wir jede Messung dreimal. Jede Messung dauert etwa 30 Tage, wobei das gleiche Messprotokoll verwendet wird. Nach jeder Messung wurden die Elektroden-Arrays mit Ethanol gewaschen und alle verunreinigenden organischen Verbindungen herausgespült. Die Erholung der Elektroden wurde durch Messung der Lichtdurchlässigkeit bewertet. Bei den etwa 5-monatigen Messungen stellten wir fest, dass das Wachstum einer so vielfältigen biologischen Spezies auf den Glasobjektträgern die Impedanz beeinflusst. Allerdings kann die Impedanz durch Bewuchs sowohl erhöht als auch verringert werden. Bei der 100-µm-Elektrodenanordnung stieg die Impedanz im ersten Monat mit dem Bewuchs an, während sie im zweiten Monat mit dem Bewuchs sank. Umgekehrt sank die Impedanz der asymmetrischen Elektrodenanordnung während des Bewuchses, aber im zweiten Versuchsdurchlauf stieg sie mit dem Bewuchs an. Im dritten Versuchsdurchgang nahmen beide Werte mit der Verschmutzung ab. Bei der symmetrischen Elektrodenanordnung mit 40 µm Elektrodenabstand ist bei allen drei Versuchsdurchläufen keine definierte Abnahme oder Zunahme bei Bewuchs festzustellen. Daher konnten wir kein logisches Modell zur Interpretation des Fouling-Phänomens bestimmen, das mit Hilfe der Impedanzmessung beobachtet und durch die Lichtdurchlässigkeit gemessen wurde. Die nicht systematisch Einzuordnenden Versuchsergebnisse können durch die EIS-Messergebnisse allein nicht zugeordnet werden. Dies mag am zufälligen Auftreten von biologischen Arten auf der Oberfläche rühren, und wird von vielen Faktoren beeinflusst, wie der Strömung des Meerwassers, der Bewegung von Mikroben, der Interaktion zwischen biologischen Arten und der Aktivität aller biologischen Arten. Wir haben zum Beispiel eine Seeschnecke beobachtet, die sich auf den Elektroden bewegte und dort einige Tage lang verweilte.

AP 4: Untersuchung der Schicht- und Elektrodenstabilität im Einsatz und Nachweis der Umweltverträglichkeit.

Ziel: Bestimmung der Stabilität der Elektroden während des Einsatzes in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Wassers und umgebender Medien; Einfluss der Feldparameter auf ein eventuelles Auflösungsverhalten der Elektroden und auf die Viabilität des Mikrobioms.

In der ersten Phase dieses Arbeitspakets soll die Stabilität der ITO-Oberfläche in leitfähigem salzhaltigem Wasser, wie z. B. Meerwasser, mit und ohne elektrisches Feld untersucht werden, ebenso wie die Auswirkungen der Eigenschaften des elektrischen Feldes auf die Stabilität der ITO-Elektrode.
Laut Literatur ist das ITO-Material stabil, wenn der pH-Wert größer ist, insbesondere um 8,0 [7]. Auch die Ostsee hat einen durchschnittlichen pH-Wert von 8,1, wie in Abbildung 56 aus der Literatur hervorgeht [8]. Dies ist genau der durchschnittliche pH-Wert des globalen Meeres, wie die United States Environmental Protection Agency (EPA) [9] mitteilt. Daher sollte sich das ITO in der Ostsee theoretisch in seiner stabilsten Umgebung befinden. In Anbetracht der Versauerung des Meerwassers durch die zunehmende Auflösung von Kohlendioxid im Meerwasser wird geschätzt, dass der durchschnittliche pH-Wert des Meerwassers auf 7,8 sinken könnte (Vorhersage der National Oceanic and Atmospheric Administration des U.S. Department of Commerce [10]). Wie in einigen Veröffentlichungen dargelegt, wird ITO nur dann instabil, wenn es sich in einer sauren Umgebung befindet (pH < 6) [10] und das ITO-Glassubstrat eine zusätzliche Silberbeschichtung aufweist und in eine chloridreiche Lösung gelegt wird [11].

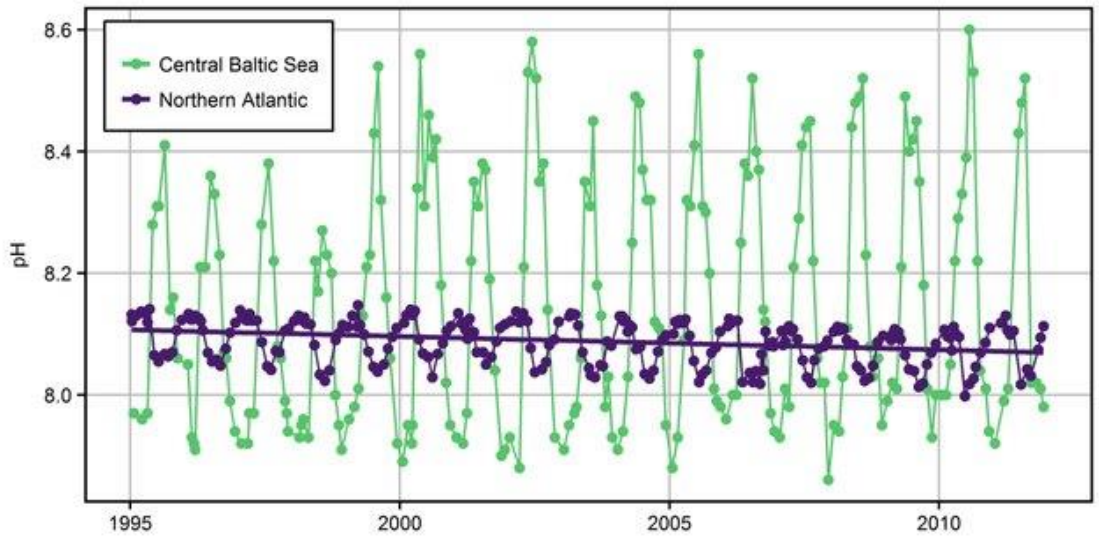

Abbildung 50: Statistische pH-Werte der Ostsee zwischen 1995 und 2012 (entnommen aus [8])

Wir führen zunächst Experimente durch, um die Stabilität von ITO in einer Umgebung mit niedrigem pH-Wert (7) und hoher Chloridkonzentration (3,5%ige NaCl-Lösung) zu überprüfen, insbesondere nach dem Laserätzverfahren. Obwohl das mit dem Laser geätzte ITO-Glassubstrat laut Literatur nicht für eine sichere Umgebung geeignet ist, ist die ITO-Oberfläche intakt, wenn kein elektrisches Feld angelegt wurde.

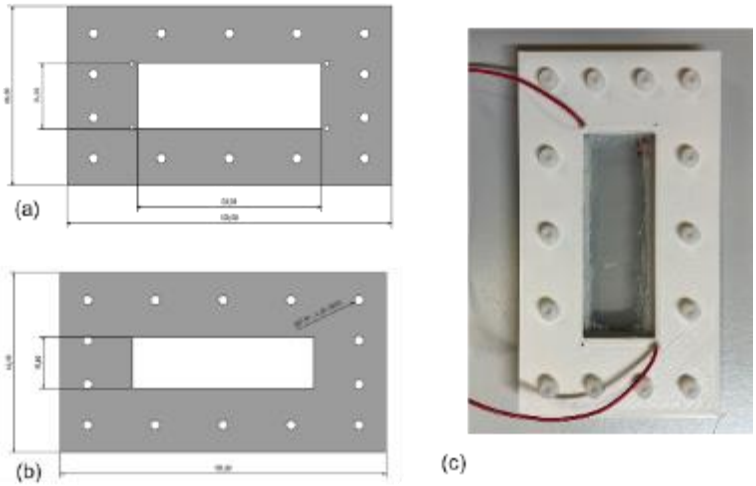

Abbildung 51: Versuchsaufbau zur Untersuchung der ITO-Stabilität in salzhaltigem Wasser in elektrischen Feldern, bestehend aus einer oberen Platte (a) und einer unteren Platte (b), zwischen denen ein lasergeätzter ITO-Glasschieber mit Kunststoffschrauben und Muttern montiert und mit einer Silikondichtung abgedichtet wurde (c).

Um die Stabilität der ITO-Beschichtung im elektrischen Feld zu untersuchen, haben wir einen Versuchsaufbau entworfen und 3D-gedruckt, wie in Abbildung 51 gezeigt. Das ITO ist für Experimente mit niedriger Spannung (< 7_{eff}) an einen Funktionsgenerator und für Experimente mit hoher Spannung (≤ 20 V_{eff}) an einen Leistungsverstärker angeschlossen. Wir untersuchten den Einfluss der Parameter des elektrischen Feldes (Frequenz und Spannung) auf die ITO-Beschichtung, indem wir die Oberfläche der ITO-Elektroden mit einem Mikroskop qualitativ beobachteten. Bei Anlegen eines elektrischen Gleichfeldes (Frequenz 0 Hz) trat Korrosion zuerst an Elektroden mit einer Spannung von 1,5 V auf, wie in Abbildung 52 a gezeigt. Bei niedrigerer Spannung (< 7_{eff}) wurde in einem elektrischen Wechselfeld mit einer Frequenz von 50 Hz bis 200 kHz keine Korrosion beobachtet. Wurde eine höhere Spannung angelegt, trat Korrosion bei niedrigeren Frequenzen auf, während bei Frequenzen über 100 kHz keine Korrosion beobachtet wurde. Die Korrosion im Wechselstromfeld trat immer an einem Ende der Elektrode auf, wie in Abbildung 52 b und c zu sehen ist. Dafür könnte es zwei Gründe geben: Erstens induziert die lokal sehr hohe elektrische Feldstärke an der scharfen Kante der Elektrode lokal extrem hohe Ströme, die zweite mögliche Ursache ist ein DC-Offset, die höhere DC-Offsetspannung, wenn eine höhere Wechselspannung angelegt wurde. Um das erste Problem zu vermeiden, wurde ein halbkugelförmiges Ende der Elektroden vorgeschlagen, wie in

Abbildung 52 d gezeigt. Die Elektrodenkonfiguration mit halbkugelförmigen Enden wurde in AP 2 hergestellt, und die experimentelle Untersuchung wird in diesem Arbeitspaket fortgesetzt.

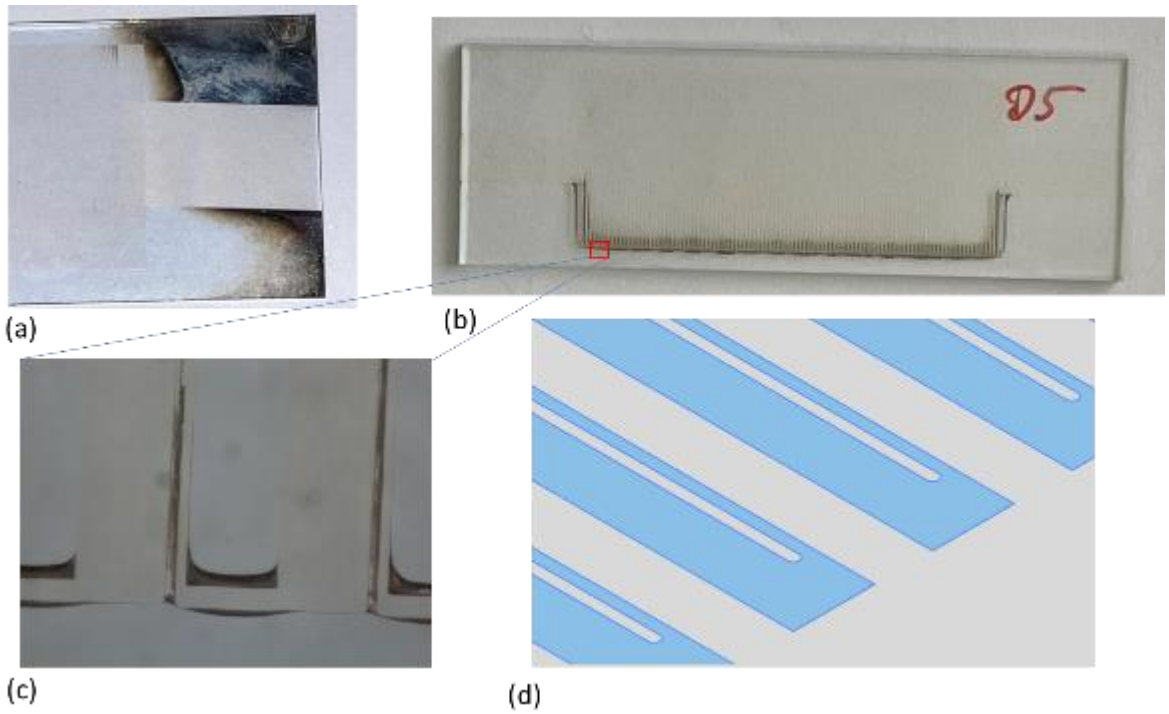

Abbildung 52: Korrodierte Elektroden im elektrischen Gleichfeld bei einer Spannung von 1,5 V (a), Wechselstromfeld 50 Hz (12 V_{eff}) (b), vergrößerte Korrosionsstelle (c), vorgeschlagene neue runde Endelektrode (d).

Die Korrosion, die bei Experimenten in einem elektrischen Wechselfeld auftritt, wird meist durch Stromüberlastung verursacht. Um zu verstehen, wie viel Strom die ITO-Elektrode stabil aushalten kann und welche maximale Spannung an eine ITO-Elektrode angelegt werden kann, wurden Experimente zur elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) konzipiert und durchgeführt. Ein Potentiostat (AUTOLAB) zusammen mit einer AgCl-Referenzelektrode wurde für die EIS-Messung verwendet. Die Software NOVA 2.1.5 wurde für die Durchführung der EIS-Messungen und die Datenanalyse verwendet. Die EIS-Messungen scannen den gesamten Frequenzbereich von 0 bis 100 kHz.

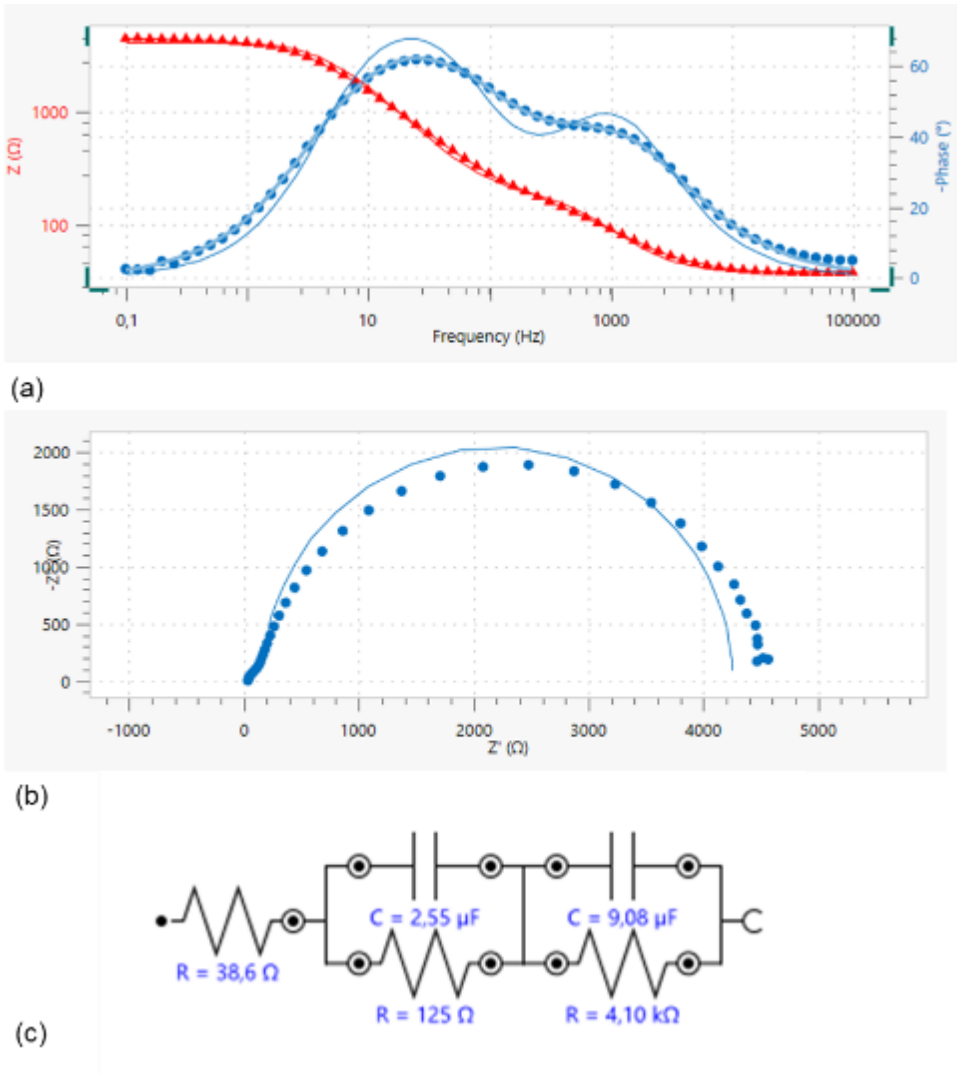

Abbildung 53: EIS-Messungen für lasergeätzte ITO-Folien (w1 = 40 µm, r = 5) in NaCl-Lösung (3,5 %), dargestellt und simuliert als Boden- (a) und Nyquist-Diagramm (b), sowie repräsentatives Ersatzschaltbild. Punkte und Dreiecke sind Messdaten, Linien sind passende Simulationslinien.

Gut übereinstimmende Anpassungs- und Simulationslinien mit den Messdaten bestätigen das in Abbildung 53 c dargestellte Ersatzschaltbild des lasergeätzten ITO-Dias. Es besteht aus der ITO-Elektrode als Widerstand (38,6 Ω), der mit anderen in Reihe geschaltet ist (Komponente 1), der NaCl-Lösung zwischen zwei gegenüberliegenden Elektroden (kleinerer Widerstand, 125 Ω, parallel geschaltet mit einem kleinen Kondensator, 2,55 µF) als Komponente 2 und der elektrischen Doppelschicht als Parallelschaltung zwischen einem größeren Widerstand (4,10 kΩ) und einem größeren Kondensator (9,08 µF) (Komponente 3). Die drei oben genannten Komponenten sind in Reihe geschaltet, daher hängt die Spannung an jeder Komponente vom Impedanzanteil und der angelegten Spannung ab. Wenn die an das System angelegte Spannung konstant ist, bestimmt allein der Impedanzanteil die auf das Bauteil im Ersatzschaltbild verteilte Spannung. Die durch das flüssige Medium (Komponente 2, NaCl-Lösung in diesem Experiment) entwickelte Spannung muss hoch genug sein, um ein

ausreichend hohes elektrisches Feld zu erzeugen, damit die erforderlichen DEP- und ETE-Effekte wirksam induziert werden. Daher konnten wir die Abhängigkeit der Spannung von der Frequenz nachweisen, indem wir die Impedanz von Komponente 2 mit der Summenimpedanz der drei Komponenten verglichen. Die unterschiedliche Leitfähigkeit des flüssigen Mediums verändert die Impedanz des flüssigen Mediums (Komponente 2). Daher haben wir die EIS-Messung für flüssige Medien mit unterschiedlichen Leitfähigkeiten von 50 µS/cm bis 50000 µS/cm durchgeführt.

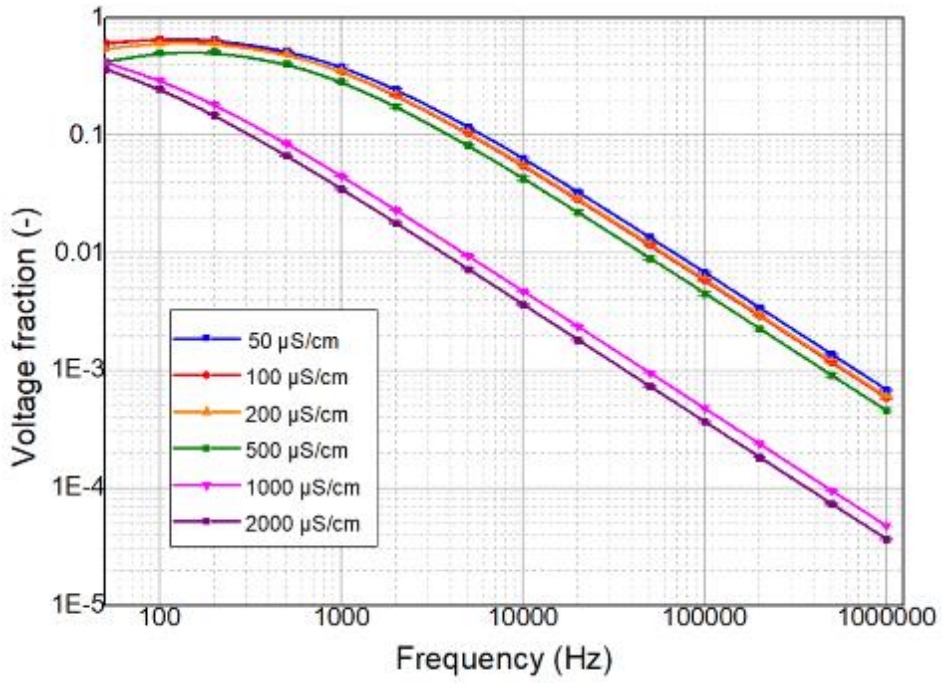

Abbildung 54: Spannungsanteil in Abhängigkeit von der Frequenz für salzhaltiges Wasser mit einer variablen Leitfähigkeit von 50 µS/cm bis 2000 µS/cm.

Wie die in Abbildung 54 dargestellten Ergebnisse zeigen, handelt es sich bei der Ersatzschaltung um einen Tiefpassfilterkreis. Das bedeutet, dass die an dem salzhaltigen Wasser entwickelte Spannung mit abnehmender Frequenz zunimmt. Daher sind bei niedrigeren Frequenzen bessere ETE- und nDEP-Effekte zu erwarten, was auch bei den in AP3 durchgeführten Experimenten der Fall ist. Das Ersatzschaltbild erklärt auch, warum eine höhere Eingangsspannung erforderlich war: Die Spannung wird durch den Widerstand der ITO-Elektrode stark reduziert. Der Widerstand der ITO-Elektrode ist abhängig von der Schichtdicke. In allen Experimenten, die in AP3 und AP4 durchgeführt wurden, beträgt der Widerstand der ITO-Elektrode etwa 20 Ω/sq bei einer relativ hohen Lichtdurchlässigkeit von 84 %. Dies scheint zu hoch zu sein, da es die Eingangsspannung verringert. Daher ist eine dicke ITO-Beschichtung erforderlich, um den Widerstand auf etwa 2 oder 3 Ω/qm zu senken, obwohl die Lichtdurchlässigkeit mit 80 % ein wenig beeinträchtigt ist.

Darüber hinaus wurden alle Wasserproben nach den EIS-Messungen entnommen und zur Messung der Zinn- und Indiumkonzentration verschickt, um zu untersuchen, ob und in welchem Umfang beide Metalle nach einer elektrochemischen Korrosion in der Lösung vorhanden sein könnten. Wegen der Wartung des ICP-OES-Instruments verzögert sich die Analyse der Elemente, soll aber bald abgeschlossen werden. Außerdem wird das EIS auch zur Messung der Impedanzänderung im Meerwasser verwendet, um ein Echtzeit-Überwachungssystem für Bewuchs zu entwickeln. Das Experiment ist für die nächste Phase dieses Arbeitspakets geplant.

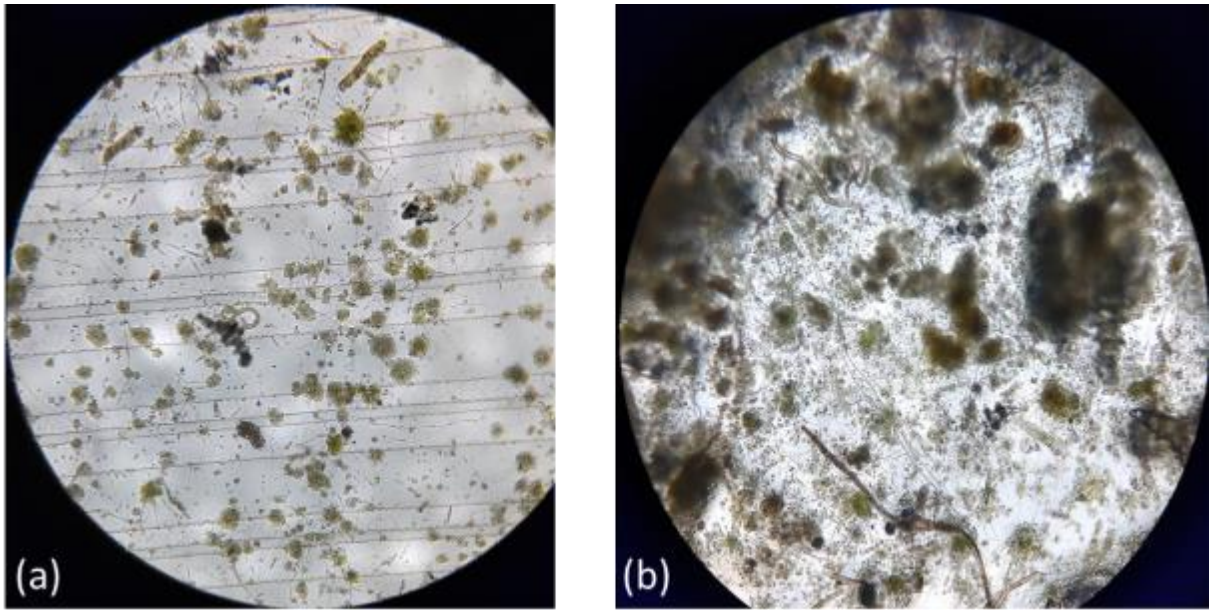

Abbildung 55: Vergleich der Oberflächen von ITO-beschichteten Objektträgern, die im Aquarium nach 25 Tagen mit elektrischem Feld (a) und ohne elektrisches Feld (b) getestet wurden

Elektrodenstabilität und biologische Wechselwirkung: Bei einer Langzeitexposition von 25 Tagen im Meerwasser mit Anlegen eines elektrischen Feldes blieb die ITO-Beschichtung unbeschädigt, nachweislich durch gleiche Systemeigenschaften.
Wie bereits in den vorangegangenen Tests beobachtet, handelt es sich bei den meisten Mikroben, die sich zuerst auf den Objektträgern befanden, um Grünalgen. Wenn man die Größe und Menge der Grünalgen auf den Objektträgern nach 25 Tagen Aquarienexposition in Abbildung 55**Error! Reference source not found.** a mit denen zu einem früheren Zeitpunkt in **Error! Reference source not found.** Abbildung 56a vergleicht, sind diese während der Versuche im elektrischen Feld deutlich größer geworden. Dies wiederum zeigt, dass das elektrische Feld die Zellen nicht schädigt. Das liegt daran, dass das angelegte elektrische Feld nicht groß genug ist, um die von den Zellmembranen aufgebaute Zellkapazität zu zerstören.

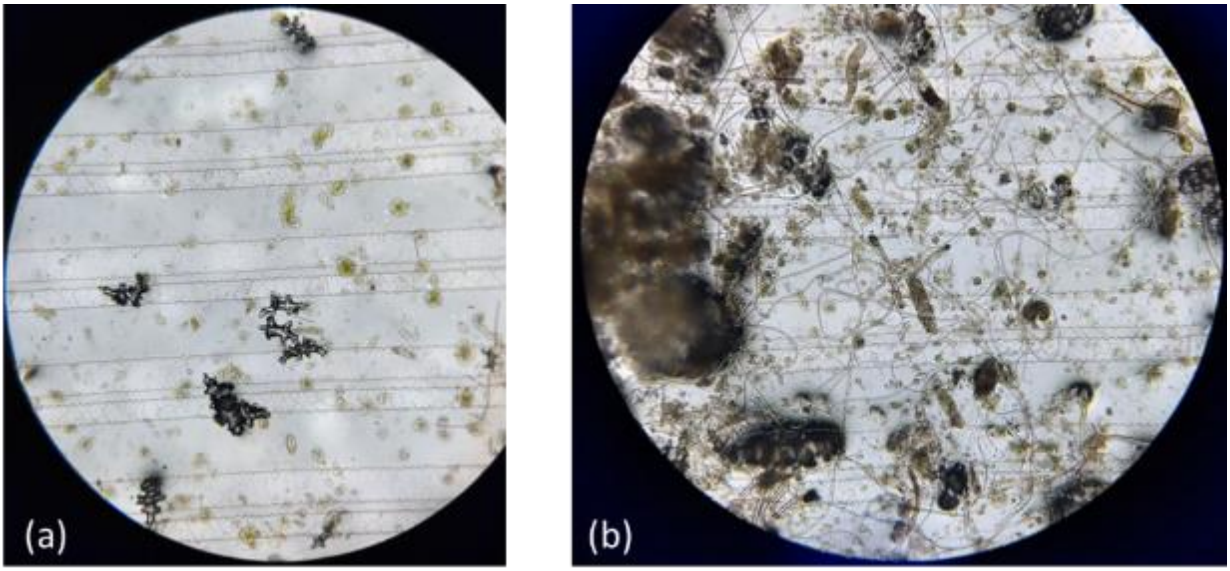

Abbildung 56: Vergleich der verschmutzten Oberflächen mit (a) und ohne (b) elektrisches Feld nach 16 Tagen Test im Aquarium.

Während der gesamten 25-tägigen Versuche im Aquarium wurden der pH-Wert und die Leitfähigkeit an jedem Versuchstag überwacht. Der pH-Wert, die Leitfähigkeit, der Salzgehalt und die Temperatur wurden mit Durchschnittswerten von 8,30, 34,79 psu, 5,347 S/m und 21,75 °C überwacht, wobei alle Standardschwankungen unter 1 % lagen. Die Metallelemente im Aquarium wurden gemessen, um den potenziellen Verlust von Metallen aus der elektrokinetischen Zelle zu bestimmen, einschließlich Zinn (Sn), Indium (In), Kupfer (Cu) und Silber (Ag) mit ICP-OES. Der Vergleich zwischen den Konzentrationen der oben genannten Metallelemente vor und nach den Experimenten mit der Anwendung des elektrischen Feldes zeigt, dass sowohl vor als auch nach den Experimenten im Aquarium keine Spuren von ihnen gefunden wurden. Dies wiederum beweist die Stabilität der ITO-Beschichtung im Meerwasser des Aquariums, und es kann keine potenzielle Verschmutzung verursacht werden, wenn das vorgeschlagene elektrische Feld angelegt wurde.

Stabilität gegenüber Reinigungslösungen:

ITO-beschichteten Glasobjektträger wurden zur Untersuchung der Stabilität gegenüber Reinigungsmitteln (mit PA ausgewählt) für je 5 min in Lösungen aus Isopropanol 99,9%, in Essigsäure (0,1 Vol. %, pH = 2,5) und Natronlauge (0,1 gew. %, pH = 13) getaucht (Beispiel siehe Abbildung 57) . In den Widerstandsmessungen über 25 mm konnten keine Veränderungen innerhalb der Standartabweichungen gemessen werden 65 +- 5 Ohm. Laut Literatur ergeben sich elektrochemische Degradationen des ITO bei angelegten Spannungen unter 1 V, daher leitet sich die Empfehlung der einer Reinigung der Oberflächen unter ausgeschalteter elektrischer Spannung ab.

Abbildung 57: Untersuchung der Medienstabilität der ITO-Elektroden durch Immersion in Säuren und Laugen

AP 5: Prüfung der ELEKTRA-Beschichtung unter realen Bedingungen (Feldtests) (IFAM, UFT)

Ziel: Bestimmung der Langzeiteffektivität und -stabilität der ELEKTRA-Beschichtung unter realen offshore Einsatzbedingungen.

Nach ausgiebiger Prüfung des Standorts-Helgoland und im engen Austausch mit dem projektbegleitenden Ausschuss und dem IFAM-Inselteam wurde der Helgoland-Yachthafen für die Auslagerung ausgewählt. Dieser in Abbildung 58 gezeigte Standort, verbindet die Ansprüche an Sensoren des projektbegleitenden Ausschusses, mit einem hohen Bewuchsdruck. Der Standort ist für Techniker leicht zu erreichen, um die Testproben zu untersuchen und die Ergebnisse zu sammeln (Lichtdurchlässigkeit), während der biologische Bewuchs am Feldteststandort schwerwiegend ist, da alle beweglichen Gewässer in der Umgebung die biologischen Nährstoffe ständig auffrischen.

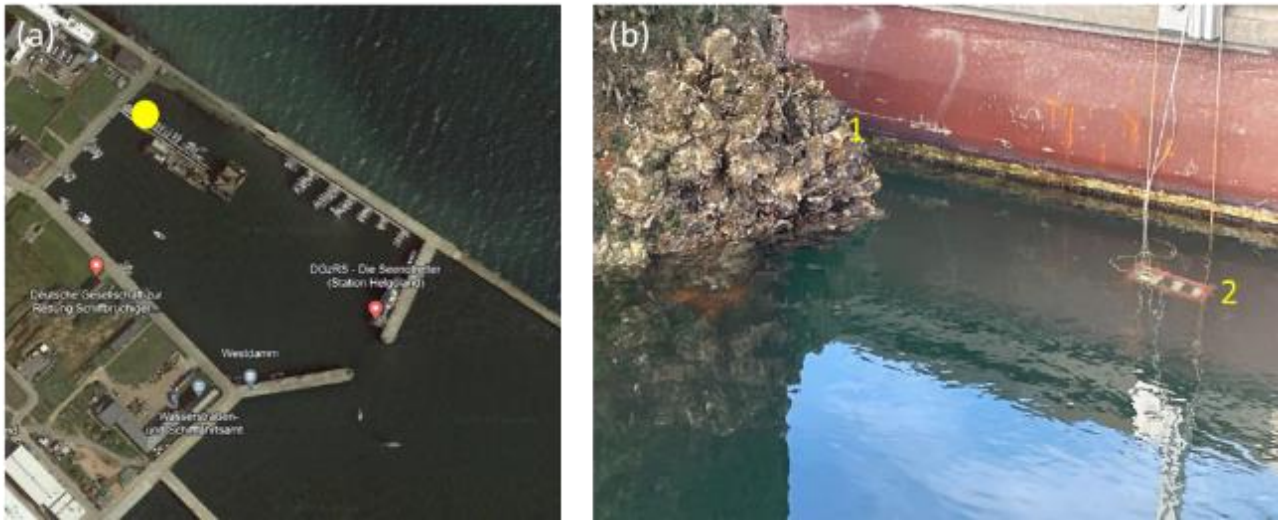

Abbildung 58: Feldversuchsstandort (a) mit starkem biologischem Bewuchs (gekennzeichnet mit 1 in b) um die Prüfmuster (gekennzeichnet mit 2 in b).

Der Versuchsaufbau besteht aus zwei Hauptteilen: Batterien und Funktionsgenerator und Siliziumrahmen mit den Diaproben, wie in Abbildung 59 dargestellt.

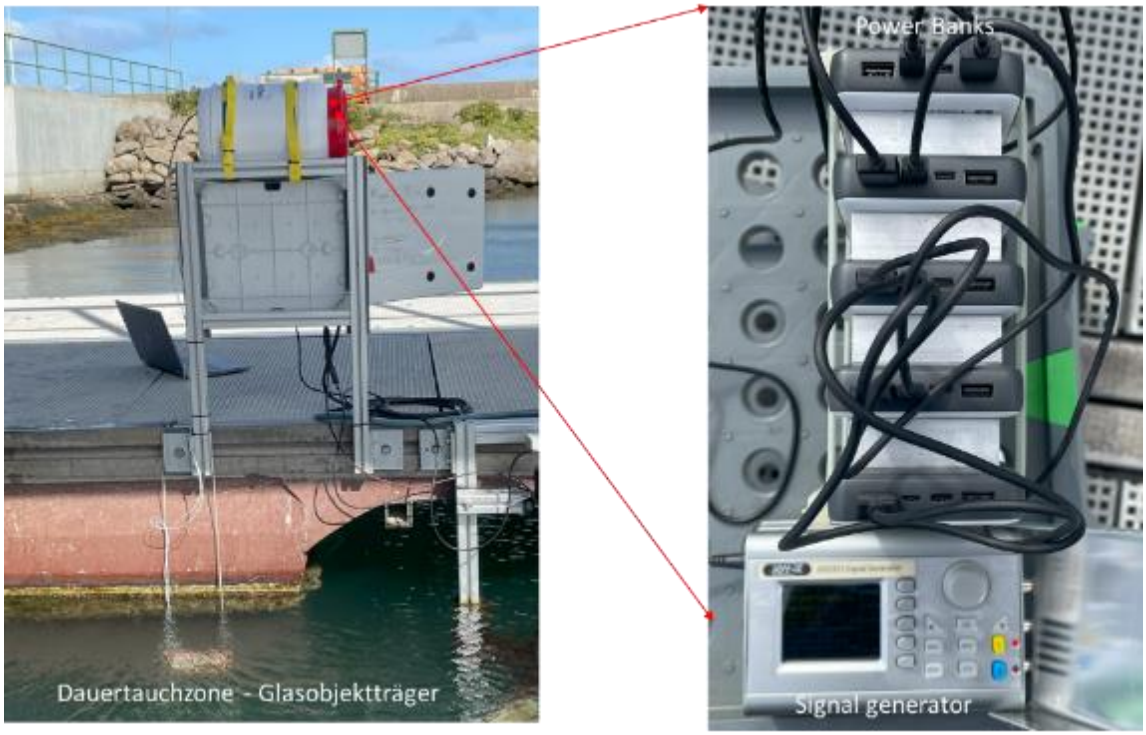

Abbildung 59: Aufbau für den Helgoländer Feldtest mit 5 in Reihe geschalteten Powerbanks (Varta je 20.000 mAh) zur Versorgung eines Signalgenerators (JT-JDS2915) mit einer maximalen Spannung von 20Veff bei einer Frequenz von 20 MHz.

Drei Objektträger wurden auf einem Silikonrahmen montiert (siehe Abbildung 60), wobei zwei ITO-beschichtete Glasobjektträger und ein Glasobjektträger ohne ITO-Beschichtung hergestellt wurden. Die drei Proben sind durch Kunststoffplatten getrennt, um die Wechselwirkung zwischen den Proben zu minimieren. Einer der ITO-Glasobjektträger wurde mit einem elektrischen Feld beaufschlagt, während der andere nicht elektrisch angeschlossen war.

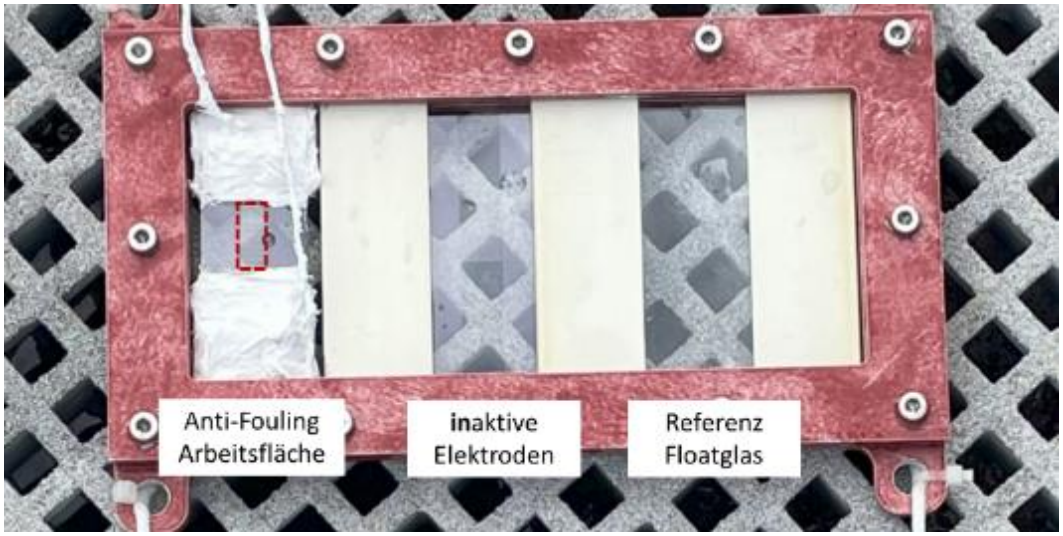

Abbildung 60: Silikonrahmen mit drei Testmustern, einer Antifouling-ITO-beschichteten elektrokinetischen Zelle mit einer Arbeitsfläche von 4 x 10 mm (durch rote gestrichelte Linien hervorgehoben), einem inaktiven ITO-beschichteten Glasobjektträger (kein elektrisches Feld angelegt) und einem Kontrollglasobjektträger ohne ITO-Beschichtung als Referenzfloatglas vor dem Feldtest in Meerwasser.

Die Zeit für den Feldtest wurde von September bis Oktober gewählt, da in der Ostsee das Bewuchsdruck in dieser Zeit am größten ist. Der biologische Bewuchs auf den Objektträgern war schneller und schwerwiegender als im Aquarium, da offensichtlich mehr biologische Spezies die Oberfläche bedeckten, ohne dass ein elektrisches Feld angelegt wurde (Abbildung 61, Tag25), verglichen mit dem Kontrollobjektträger mit ITO-Beschichtung nach 25 Tagen Experimenten im Aquarium (AP3). Aufgrund der mangelnden Zugänglichkeit zu Elektrizität wurden 5 Powerbanks verwendet, um die benötigte elektrische Energie zu liefern. Es scheint, dass die ITO-Beschichtung keine Funktion zur Unterdrückung der Verschmutzung hat, da die Verschmutzung viel größere Bereiche auf der ITO-beschichteten Oberfläche viel früher bedeckte als auf der Oberfläche des Kontrollglases ohne ITO-Beschichtung. Dies wiederum beweist, dass die im Feldtest beobachtete Antifouling-Funktion nicht durch die ITO-Beschichtung hervorgerufen wurde. Die Oberfläche, die mit einem elektrischen Feld beschichtet wurde, wies über einen längeren Zeitraum größere Flächen mit viel weniger biologischem Bewuchs auf (Abbildung 61) als die Oberfläche ohne elektrisches Feld und das blanke Kontrollglas. Vor allem das aktive Antifouling-Feld zeigte in den 36-Tage-Tests fast keinen offensichtlichen Bewuchs. Die Funktion der Unterdrückung von Bewuchs in den ersten 15 Tagen war signifikanter, vor allem im Vergleich zu den anderen beiden Oberflächen, wie in Abbildung 61 gezeigt, was in sehr guter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen im Aquarium ist. Ein quantitativer Vergleich erfolgt durch die Bewertung der relativen Lichtdurchlässigkeit, wie beim Test im Aquarium (AP3). In den ersten 15 Tagen des Feldtests konnte die relative Lichtdurchlässigkeit des ITO-beschichteten Objektträgers mit elektrischem Feld überraschenderweise bei etwa 95% gehalten werden. Von da an bis zum 30. Testtag wird die Verschmutzung auf dem ITO immer gravierender. Das liegt zum einen daran, dass die

biologische Spezies oder die Algen auf der rechten Seite des Separators wachsen. Andererseits werden die anhaftenden biologischen Arten auf der Oberfläche in den ersten 15 Tagen auch größer und bedecken somit mehr Oberflächen, wie es bei unseren experimentellen Tests im Aquarium der Fall war. Dennoch lag die relative Lichtdurchlässigkeit am Ende des Feldversuchs (36. Tag) bei etwa 70 %, was ungefähr dem Zehnfachen der Lichtdurchlässigkeit auf dem ITO-beschichteten Objektträger ohne elektrisches Feld entspricht (Abbildung 62). Der Energiebedarf wird auf etwa 5Wh geschätzt, die hauptsächlich durch den Signalgenerator verbraucht werden. Der offensichtliche Antifouling-Effekt, der im Feldversuch beobachtet und gemessen wurde, beweist die Durchführbarkeit des vorgeschlagenen Konzepts in der Realität mit einer robusten und stabilen Oberfläche für einen langfristigen Betrieb mit geringem Energiebedarf.

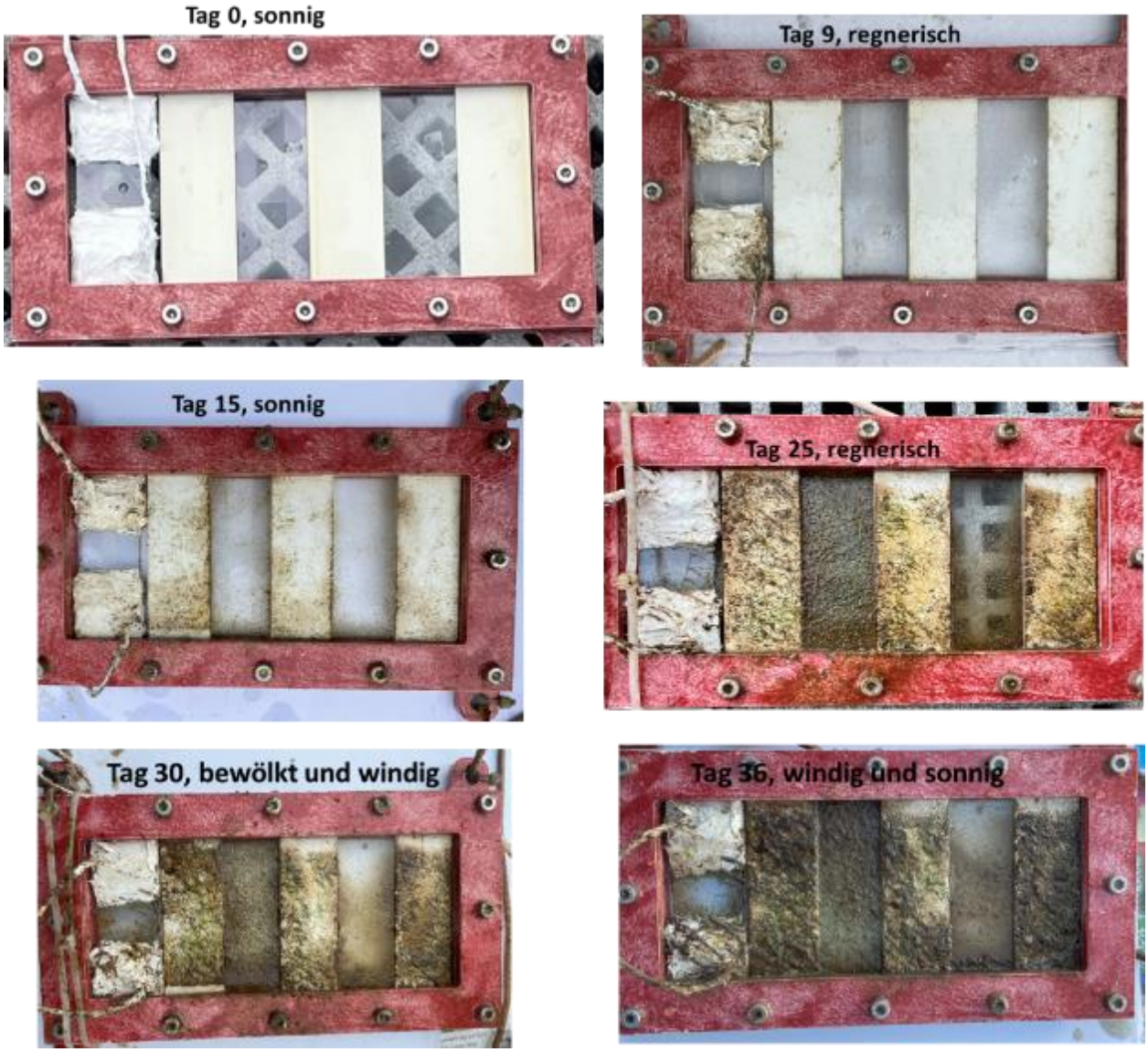

Abbildung 61: Fotos: Biologischer Bewuchs auf verschiedenen Oberflächen im Feldversuch auf Helgoland über 36 Tage.

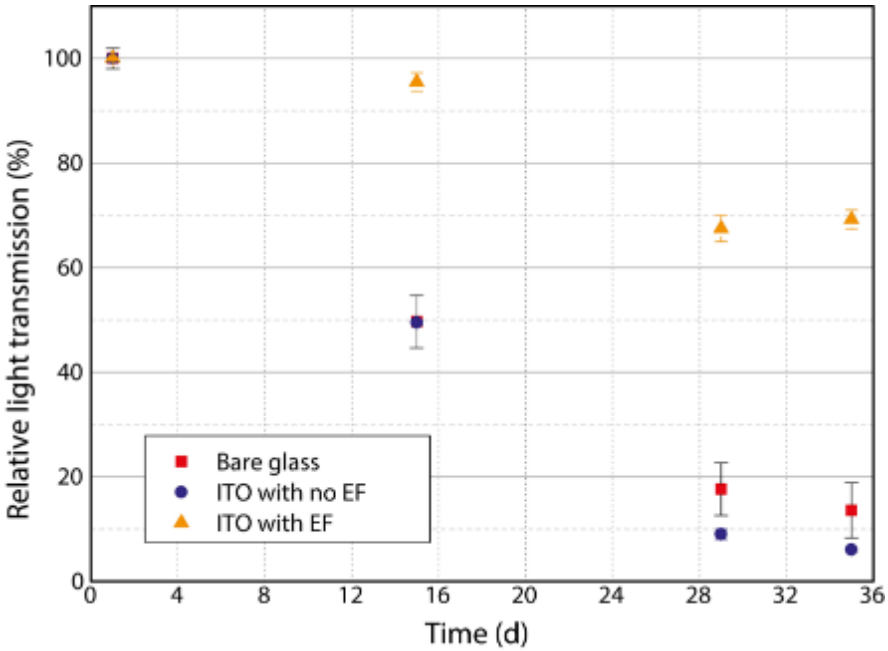

Abbildung 62: Vergleich der relativen Lichtdurchlässigkeit zwischen ITO-beschichteten Diaproben mit elektrischem Feld (EF), ITO-beschichteten Diaproben ohne elektrisches Feld und blankem Glas (ohne ITO-Beschichtung) im 36-Tage-Feldtest auf Helgoland.

Stabilität der ITO-Beschichtung: Das Meerwasser wurde vor und nach den Versuchen innerhalb eines Versuchszeitraums von 38 Tagen an verschiedenen Orten in der Nähe und in der Ferne des Versuchsfeldes auf Helgoland beprobt. Alle Proben wurden nach dem gleichen Protokoll untersucht wie die Wasserproben aus den Aquarienversuchen, um die Vielfalt der Metallelemente vor und nach den Versuchen an den verschiedenen Standorten zu bewerten. Die exakt gleichen Metallelemente wurden mit ICP-OES analysiert und es wurden keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Proben hinsichtlich dieser Metallelemente, einschließlich Sn, In, Cu und Ag, festgestellt. Die hier vorgestellten Ergebnisse stimmen gut mit denen überein, die wir in den Experimenten im Aquarium nachgewiesen haben, und bestätigen die gleiche Schlussfolgerung, dass die ITO-Oberfläche und die Konnektivität der elektrokinetischen Zelle in Meerwasser mit einem pH-Wert von etwa 8 chemisch stabil sind und keine chemische Verschmutzung durch das angelegte elektrische Feld verursacht wird, wenn die Frequenz über 2 MHz liegt (20 MHz im Feldversuch).

AP 6: Übertragbarkeit der Schichtsysteme auf weitere praxisrelevante Oberflächen; sowie Berichte und Veröffentlichungen(IFAM, TUD, UFT)

Ziel: Bestimmung der Effektivität und der Schichthaftung auf anderen Oberflächen.

Eine schützende Oberfläche auf ITO könnte die Haltbarkeit der beschichteten Oberfläche verbessern und somit ihre Lebensdauer verlängern. Insbesondere wenn eine extrem hydrophobe Oberfläche als Schutzfilm auf ITO verwendet wird, verringert die extrem niedrige Grenzflächenenergie zwischen Partikeln und der Oberfläche die Adhäsionskraft der Partikel an der Oberfläche erheblich. Dies wiederum reduziert die Menge an Nährstoffen und biologischen Lebewesen auf der festen Oberfläche und unterdrückt somit das Fouling. In diesem Projekt haben wir zwei Arten von hydrophoben Oberflächen, Titanoxid und Silikat (easy-to-go) auf ITO-beschichteten Glasobjektträgern getestet. Die Hydrophobie wurde durch Messung der Kontaktwinkel quantitativ bestimmt. Das leicht zu reinigende beschichtete ITO-Glas hat den größten Kontaktwinkel von 91,2° und damit die höchste hydrophobe Oberfläche. Die mit TiOx beschichtete ITO-Oberfläche hat einen Kontaktwinkel von 81,6°, der größer ist als der der ITO-beschichteten Oberfläche (67,5°). Die "transparente" Beschichtung von TiOx, ITO und der leicht zu reinigenden Glasoberfläche beeinträchtigt jedoch die Transparenz des Glases durch eine geringere Lichtdurchlässigkeit. Interessanterweise weist die hydrophobste easy-to-clean-Oberfläche von allen drei beschichteten Oberflächen die größte Lichtdurchlässigkeit auf.
Vier Arten von Glasobjektträgern ohne Beschichtung, nur mit ITO-Beschichtung, mit TiOx-Beschichtung auf ITO und mit Easy-to-Clean-Beschichtung auf ITO, jeweils 3 Stück, wurden 33 Tage lang auf ihr Bewuchsverhalten im Aquarium getestet. Wie in Abbildung 63 zu sehen ist, weisen alle Beschichtungen eine höhere relative Lichtdurchlässigkeit auf und unterdrücken den Bewuchs, wobei die Easy-to-Clean-Oberfläche in den ersten 15 Tagen den besten Antifouling-Effekt aufweist. Bei einem Langzeitversuch von 30 Tagen war die bewuchshemmende Wirkung der hydrophoben Beschichtung nicht so effektiv wie in den ersten 15 Tagen. Alle relativen Lichtdurchlässigkeiten liegen unter 60 % und damit weit unter dem Wert, den die elektrokinetischen Zellen mit elektrischem Feld sowohl im Aquarium als auch im Feldversuch aufwiesen.

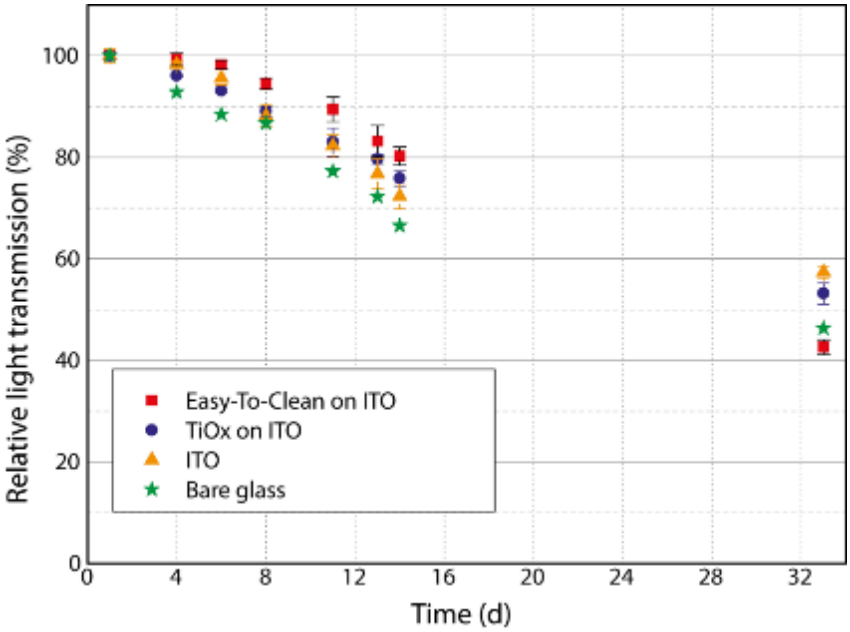

Abbildung 63: Vergleich der Beschichtungen auf biologischem Bewuchs auf einer transparenten Oberfläche im Aquarium.

Beide nichtleitenden beschichteten Oberflächen wurden elektrisch verbunden, um die Möglichkeit ihrer Anwendung zur Unterdrückung von Bewuchs zu untersuchen. Als jedoch alle Proben in salzhaltiges Wasser mit einer Leitfähigkeit von 1S/m gelegt wurden, waren unter dem Mikroskop keine elektrokinetischen Effekte zu beobachten. Wir gehen davon aus, dass sich das elektrische Feld nicht über den Isolationsfilm ausbreitete und somit keine elektrokinetische Kraft erzeugt wurde.

Theoretisch könnte eine viel dünnere, nichtleitende Beschichtung dieses Problem lösen. Daher testen wir zunächst den Einfluss der Schichtdicke auf die Wirkung das Antifouling ohne elektrisches Feld. Drei identische, leicht zu reinigende 100 nm beschichtete ITO-Objektträger wurden 18 Tage lang im gleichen Aquarium getestet. Wie in dargestellt, stellten wir fest, dass die dünnere easy-to-clean-Beschichtung keine gleich gute Fähigkeit zur Unterdrückung von Bewuchs zeigte. In einem kurzen Test von 12 Tagen lag die dargestellte relative Lichtdurchlässigkeit bereits unter 60 % und damit niedriger als bei dem Test mit der dickeren Beschichtung (Abbildung 64).

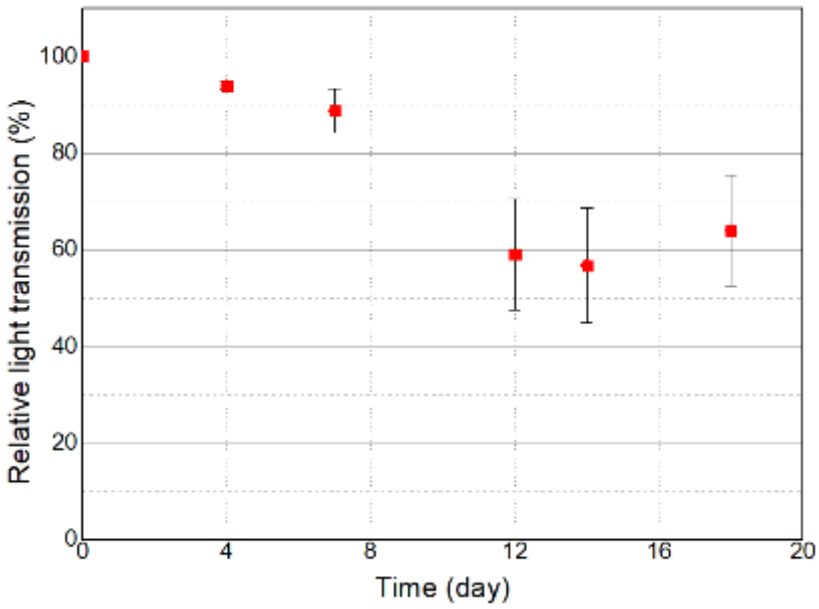

Abbildung 64: Relative Lichtdurchlässigkeit eines dünnen (100 nm), easy2clean-Plasmabeschichtung im Aquarium.

In der Praxis sind Sensoroberflächen oder Kameragehäuse häufig sphärisch geformt, um den wirkenden Wasserdrücken zu widerstehen. Die Nachrüstung der Elektra-Technik bzw. die Kontaktierung der Elektroden auf den Oberflächen wurde mit dem PA diskutiert. Als Lösung kamen die vom PA Mitglied ARA-Coatings hergestellten Laser-Transferfolien in Betracht. Diese können unter anderem ITO oder Gold, in einem sog. Laser Induced Forward Transferverfahren (LIFT), auf Oberflächen übertragen. Abbildung 65 zeigt Parameterstudien zum Goldübertrag auf Glas. Die in elektrodenform übertragenen Goldschichten ermöglichen zwischen den Elektroden wiederum eine Lichttransmission und zeigen neben der Kontaktierung weitere Anwendungsmöglichkeiten der Elektra-Technik auf, z.B. zur Elektra-Nachrüstung bei Sensoren.

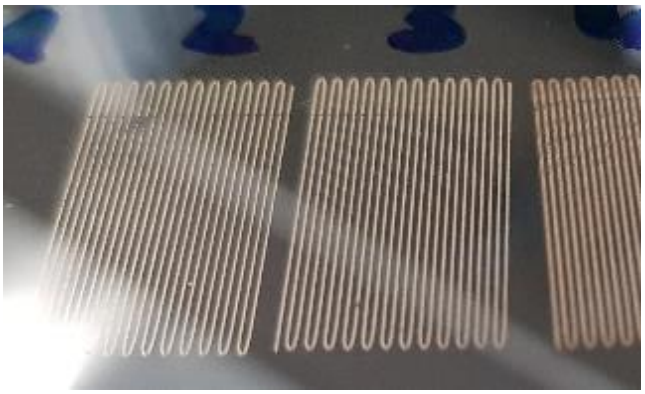

Abbildung 65: Gold Elektroden für zur Kontaktierung transparenter ITO-Elektroden oder für teiltransparente Anwendungen der Elektra-Technik selbst. Hergestellt mittels Laserübertrag (LIFT) mittels Folien des PA-Mitglieds ARA-Coatings und einen 100 W-Laser der FA cleanLaser.

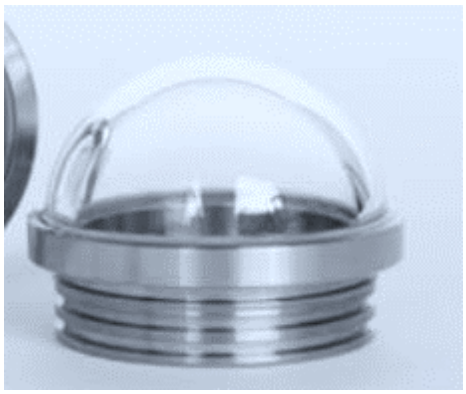

Abbildung 66: Glaskuppel des PA-Mitglied Nautilus

Eine kurze tabellarische Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeitspakete mit Zielsetzung und erreichten Zielen ist nachfolgend aufgeführt.

Tabellarische Gegenüberstellung der Forschungsziele und Ergebnisse

Arbeitspaket (AP)	Ziel	Ergebnis
AP1: Anforderungsanalyse und Simulationsgestützte Entwicklung der Elektrodenkonzepte	Definition von Zielgewässern und Entwicklung optimierter Elektrodengeometrien zur Unterdrückung von Biofouling	-Umweltanforderungen an die Elektroden spezifiziert, -Theoretisches Modell zur computergestützten Vorhersage und Optimierung des Fouling-Reinigungseffektes auf Basis der Elektrohydrothermie ETE und Dieelektrophorese DEP entwickelt und optimierten Elektrodenkonfigurationen abgeleitet
AP2: Laserprozessentwicklung für die Erzeugung von ITO-Elektroden und Easy-To-Clean Isolationsbeschichtung	Reproduzierbare Erzeugung geeigneter ITO-Elektrodengeometrien und Verkapselung der Elektroden	- Entwickelter Laserprozess zur Herstellung von transparenten Inidiumzinnoxid(ITO)-Elektroden variabler Geometrien zur Erfüllung der Antifouling-Anforderungen aus den Simulationen (AP1) mit Elektrodenbreiten kleiner 40 µm. -Prozessentwicklung für Titandioxid und Siliziumdioxid-Dünnschichtverkapselungen der ITO-Elektroden auf Glas
AP3: Laborprüfungen zum Reinigungseffekt der Elektrodenstrukturen	Experimentelle Überprüfung der simulierten Elektrodenparameter und Finden optimaler Betriebsparameter	- Erfolgreiche Laborprüfung der des Antifouling-Effektes, nach 25 Tagen Aquariumsauslagerung 80 % Transmission gegenüber 10 % Transmission ohne aktive ELKTRA-Beschichtung); - Stabilität der ITO-Elektroden nachgewiesen - experimentell optimierte Elektroden gefunden und Simulative Ergebnisse experimentell bestätigt
AP4: Untersuchung der Schicht- und Elektrodenstabilität im Einsatz und Nachweis der Umweltverträglichkeit	Stabilität der Elektroden und Einfluss der Feldparameter auf Auflösungsverhalten	Biologische Verträglichkeit und Haltbarkeit der ELEKTRA-Beschichtungen und Stabilität gegenüber Salzwasserumgebung und chemischen Reinigern nachgewiesen
AP5: Prüfung der ELEKTRA-Beschichtung unter realen Bedingungen (Feldtests)	Bestimmung der Langzeiteffektivität und -stabilität der ELEKTRA-Beschichtung	Nachweis des Labor-Reinigungseffekts und der Stabilität der elektrohydrodynamischen ELKTRA-Beschichtung unter

Arbeitspaket (AP)	Ziel	Ergebnis
		Realbedingungen auf Helgoland gelungen
AP6: Übertragbarkeit der Schichtsysteme auf weitere praxisrelevante Oberflächen Veröffentlichung	Effektivität und Schichthaftung auf anderen Oberflächen bestimmen/ Publikation	Elektrodenabscheidung mittels Lasertransfer untersucht, Nachweis eines Antifouling Effektes von Easy2clean-Verkapselungen, jedoch reduzierte Antifoulingwirkung durch Elektrotechnik mit Beschichtung Veröffentlichung der Elektrotechnik in renommierter open access Fachzeitschrift - Nature: Scientific Reports.

Begründung der Notwendigkeit der beantragten Mittel

Begründung der Notwendigkeit der beantragten Mittel (FE 1, IFAM)

Personalausgaben A1 – Personal mit abgeschlossener wissenschaftlicher Ausbildung

Der wissenschaftliche Mitarbeiter war während der Projektlaufzeit für die Koordination aller damit verbundenen Teilbereiche zuständig. Dies beinhaltete die Organisation und Interpretation von Experimenten und experimentellen Ergebnissen sowie der Bereitstellung der dafür benötigten Mittel, Materialien und Experimentiervorrichtungen. Des Weiteren oblag ihm die Planung des zeitlichen Ablaufs dieser Arbeitsgebiete in Bezug auf Material- und Personaleinsatz (A2). Außerdem zeichnete er für die Aufarbeitung der gewonnenen Prüfergebnisse und dem daraus abzuleitenden weiteren wissenschaftlichen Vorgehen verantwortlich. Im Rahmen des Ergebnistransfers in die Wirtschaft präsentierte er Forschungsergebnisse auf einer internationalen Tagung und knüpfte weitere Kontakte zu am Forschungsprojekt interessierten Industrievertretern. Der wissenschaftliche Mitarbeiter organisierte die Projekttreffen und führte diese durch und hielt laufenden Kontakt zu den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses im Rahmen des Wissenstransfers. Ferner fiel die Erstellung des Abschlussberichts in seinen Aufgabenbereich.

Die dazu notwendigen Personalausgaben waren angemessen.

Personalausgaben A2 – Personal mit staatlichem Abschluss

Während des Projekts zeichnete der technische Mitarbeiter verantwortlich für die Durchführung von Oberflächenvorbehandlungen. Dies umfasste zum einen die Probenpräparation und

Reinigung, die Laserbehandlung der Proben und die Charakterisierung der Probenoberfläche mittels verschiedenen Messverfahrens (z.B. Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie). Ferner mussten PVD und PE-CVD Verfahren zur Beschichtung angepasst werden, um die Elektroden mit unterschiedlichen Beschichtungen zu verkapseln.

Die dazu notwendigen Personalausgaben waren angemessen.

Begründung der Notwendigkeit der beantragten Mittel (FE 2, UFT)

Personalausgaben A1 - Personal mit abgeschlossener wissenschaftlicher Ausbildung

Der als Projektleiter eingesetzte wissenschaftliche Mitarbeiter war während der Projektlaufzeit für die Koordination aller zugehörigen Teilbereiche verantwortlich. Dazu gehörte die Organisation von Simulationsexperimenten zur Auslegung der Elektroden und die Entwicklung von Verfahren zur Prüfung der Elektroden in Bezug auf Stromverbrauch und Antifouling-Wirkung. Der Projektleiter war für die Bereitstellung der erforderlichen Ressourcen, Materialien und Testgeräte verantwortlich. Er war auch für die zeitliche Planung dieser Arbeitsbereiche im Hinblick auf den Material- und Personaleinsatz (A1/Personal mit abgeschlossener wissenschaftlicher Ausbildung, A2/Personal mit staatlicher Qualifikation) zuständig. Die übrigen beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeiter führten die entsprechenden Messungen durch (z.T. auch A2/Mitarbeiter mit staatlicher Qualifikation), werteten die Versuchsergebnisse aus und stimmten das daraus abzuleitende weitere wissenschaftliche Vorgehen mit dem Projektleiter ab. Im Rahmen des Ergebnistransfers in die Industrie präsentierten sie die Forschungsergebnisse auf nationalen Konferenzen und Messen und knüpften weitere Kontakte zu an dem Forschungsprojekt interessierten Industrievertretern. Der als Projektleiter eingesetzte wissenschaftliche Mitarbeiter organisierte und leitete die Projekttreffen und stand im Rahmen des Wissenstransfers in ständigem Kontakt mit den Mitgliedern des Projektausschusses. Er war auch für die Erstellung des Abschlussberichtes in Zusammenarbeit mit den anderen wissenschaftlichen Mitarbeitern verantwortlich.

Die notwendigen Personalausgaben waren angemessen.

Personalaufwand A2 - Staatlich qualifiziertes Personal

Die staatlich geprüften Mitarbeiter waren für die Durchführung von Materialprüfungen zuständig. Dazu gehörten die zerstörende Prüfung der Klebeverbindungen mit einer Universalprüfmaschine sowie Analysen mit Methoden der Oberflächenanalyse. Ihm oblag die Durchführung der Prüfungen und die damit verbundene Installation und Programmierung von

Prüfprogrammen sowie die Bereitstellung der verschiedenen Prüfergebnisse für die wissenschaftlichen Mitarbeiter und deren Aufbereitung.

Personalkosten A3 - Studentische Hilfskräfte

Es wurden keine studentischen Hilfskräfte angefordert.

Begründung der Notwendigkeit der beantragten Mittel (FE 3, TUD)

Personalausgaben A1 - Personal mit abgeschlossener wissenschaftlicher Ausbildung

Die wissenschaftliche Hilfskraft war während des Projektes für die Koordination aller zugehörigen Teilbereiche zuständig. Dazu gehörte die Organisation der Versuchs- und Rezepturabläufe sowie die Bereitstellung der notwendigen Ressourcen, Materialien und Versuchsgeräte. Außerdem war er für die zeitliche Planung dieser Arbeitsbereiche im Hinblick auf den Material- und Personaleinsatz (A2 und studentische Hilfskräfte) zuständig. Die Auswertung der gewonnenen Versuchsergebnisse und das daraus abzuleitende weitere wissenschaftliche Vorgehen sowie die Entwicklung der Parameter für die Oberflächenbehandlung lagen ebenfalls in seiner Verantwortung. Im Rahmen des Ergebnistransfers in die Industrie präsentierte er die Forschungsergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen und knüpfte weitere Kontakte zu am Forschungsprojekt interessierten Industrievertretern. Der Forschungsassistent organisierte und leitete die Projekttreffen und hielt im Rahmen des Wissenstransfers ständigen Kontakt zu den Mitgliedern des Projektausschusses. Er war auch für die Erstellung der Zwischenberichte und des Abschlussberichts verantwortlich.

Die notwendigen Personalausgaben waren angemessen.

Personalaufwand A2 - Personal mit staatlicher Qualifikation

Der technische Angestellte war während des Projekts für die Durchführung von Experimenten zum Antifouling und die Messung der Stabilität der Oberflächen in Feldversuchen zuständig. Dazu gehörten die Probenvorbereitung, die Beobachtung der Alterungsversuche und Messungen der Antifoulingwirkung (z.B. mittels Mikroskopie und Transmissionsspektroskopie).

Der notwendige Personalaufwand war angemessen.

Personalkosten A3 - Studentische Hilfskräfte

Die studentische Hilfskraft unterstützte die wissenschaftliche Hilfskraft sowie die technische Hilfskraft bei einzelnen Aufgaben und arbeitete neben ihnen. Konkret umfasste die Arbeit die Vorbereitung von Experimenten zum Einsatz von verfahrensrelevanten Geräten und Anlagen nach Anleitung. Außerdem war er für die mikroskopische Aufnahme von vorbehandelten Oberflächen zuständig. Außerdem unterstützte er den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Auswertung der Versuchsdaten.

Der notwendige Personalaufwand war angemessen.

Verwendung der Fördermittel durch die Forschungsstellen

Verwendung der Zuwendungen durch die Forschungsstelle 1 (IFAM)

Wissenschaftliches und technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

- A.1 Wissenschaftliches und technisches Personal (HPA Gr. A): 12,2 PM

Verwendung der Zuwendungen durch das Forschungszentrum 2 (UFT)

Wissenschaftliches und technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

- A.1 Wissenschaftliches und technisches Personal (HPA Gr. A): 14 PM

Verwendung der Zuschüsse durch das Forschungszentrum 3 (TUD)

Wissenschaftliches und technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

- A.1 Wissenschaftliches und technisches Personal (HPA Gr. A): 12,5 PM

Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten der erzielten Ergebnisse

Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der kmU

Die Reinigung optischer Systeme nach Fouling ist derzeit aufwändig und unwirtschaftlich, trotz des großen Bedarfs an Sensoranwendungen in maritimen Technologien, etwa der Überwachung kritischer Infrastruktur, von Schiffen sowie Meeresplattformen oder zur Einhaltung von Umweltauflagen. Es gibt verschiedene kommerzielle Ansätze zur Vermeidung von Fouling, wie Biozide, mechanische Systeme, UV-Bestrahlung, Ultraschall und Antihaftbeschichtungen, die jedoch jeweils spezifische Herausforderungen mit sich bringen. Das Forschungsprojekt ELEKTRA bietet mit der Entwicklung einer robusten, nanometerdicken und aktiven Selbstreinigungsbeschichtung einen neuartigen, biozidfreien Ansatz, welcher sich auf bestehende Optiken aufbringen lässt. Anfragen der PA-Mitglieder und Industrievertreter außerhalb des Projektes zur Umsetzbarkeit der Technik auf vorhandenen Maritimen aufbauten belegen die Attraktivität der ELKTRA-Antifoulingtechnik.

Aussagen zur industriellen Umsetzung der FuE-Ergebnisse

Einschätzung der Finanzierbarkeit einer industriellen Umsetzung

Abhängig von der Komplexität der zu beschichtenden Optiken, liegen die Material, Anlagen, Personal und Energiekosten zur Beschichtung für ITO bei unter 10 €/m² [12], sodass sich mit einfachen Markierungslasern (Laseranlagen ab ca. 1000 €) transparente Elektroden für die Elektratechnologie erzeugen lassen. KMUs wie die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses: Ara-Coatings GmbH, Plasmatreat GmbH oder Induflex-Coatings GmbH) können damit Beschichtungskosten inkl. Personal, Anlagen und Materialeinsatz von unter 100 €/m² ermöglichen. Die Kosten für einen Funktionsgenerator und eine Spannungsquelle bzw. Stromversorgung über ein vorhandenes Bordnetz liegen bei ebenfalls ca. 10 € [13]. Die Kosten von Sensoren und Kameras für die maritime Anwendung liegen hingegen bei ca. 1000 € bis weit über 10.000 € [14]. Damit ergeben sich Kostensteigerungen von deutlich unter 10 %. Da Sensoren zum Teil wöchentlich gereinigt werden müssen [15], liegt der Kostenaufwand z.B. bei Schiffen oder Yachten durch Taucher (10.000 € Monatsbruttogehalt [16]), Wartungspläne und Bootseinsatz über den Gerätekosten selbst. Demgegenüber bedient die Elektra-Technologie mit Materialkosten von weit unter 20 €/Sensor (inkl. ITO, Siloxane, Elektronik) die Nachfrage nach einer kostengünstigen, autonomen Antifoulingbeschichtung mit hohem Marktpotential, um eine langfristige, kontinuierliche Überwachung in großen Maßstäben zu ermöglichen, ohne in die Bauform der Geräte einzugreifen und auch Plattformunabhängig verwendet werden zu können.
Es gibt bereits Anfragen der Industrieteilnehmer zu der Beschichtung auf den

Beitrag zu wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen

Im Bereich der Antifouling-Technik konnten folgende Erkenntnisse während des Projekts gewonnen werden:

- Entwicklung eines theoretischen Modells zur Beschreibung und Optimierung des Antifoulings mittels Wechselstrom-Elektrokinetik
- Erarbeitung einer Technik zur flexiblen Elektrodenerzeugung auf Oberflächen mittels Lasertechnik
- Nachweis der Antifoulingwirkung und der Umweltstabilität der neuartigen Elektra-Technik in Laborversuchen und Feldversuchen auf Helgoland

Angaben zu den am Projekt beteiligten Forschungsstellen und Unternehmen

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1

Fraunhofer-Gesellschaft e.V., Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)

Wiener Straße 12
DE-28359 Bremen

Telefon:	0421 2246-272
Fax:	0421 2246-300
Homepage:	www.ifam.fraunhofer.de
Leiter der FST:	Prof. Dr. Bernd Mayer
Projektleiter:	Dr. Uwe Specht

Forschungseinrichtung 2

Universität Bremen
Zentrum für Umweltforschung und nachhaltige Technologien (UFT)
Leobener Straße 6, 28359 Bremen

Telefon:	
Fax:	
Homepage:	
Leiterin der FST:	Prof. Dr.-Ing. Jorg Thöming
Projektleiter:	Dr. Georg Pesch, seit 11.2022 Dr. Michael Baune

Forschungseinrichtung 3

Technische Universität Dresden
Institut für Wasserchemie, (TUD)
Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden

Telefon:	
Fax:	
Homepage:	
Leiter der FST:	Prof. Dr. Stefan Stolte
Projektleiter:	Dr. Fei Du

Unternehmen (Projektbegleitender Ausschuss)

Unternehmen	Branche	kmU
Lürssen Werft GmbH & Co. KG	Schiffswerft	nein
Baltic Taucherei- und Bergungsbetrieb Rostock GmbH	maritimer Dienstleister	Ja
cleanLaser GmbH	Lasertechnik	Ja
IAB Ingenieurbüro	Technische Beratung	Ja
Mariscope Meerestechnik e.K	Marinetechnik	Ja
marine glazing Brombach + Gess GmbH & Co. KG	Glas und Kleben im Schiffbau	Ja
Plasmatreat GmbH	Plasmatechnik	Ja
Ara-Coatings GmbH & Co. KG	PVD- Beschichtungen	Ja
Deutsches Zentrum für Künstliche Intelligenz GmbH	Softwaretechnologien	Ja
Muehlhan AG	Industrielle Dienstleistungen	Nein
Nautilus Marine Service GmbH	Produkte & Dienstleistungen für Maritime Anwendungen	Ja
ATLAS ELEKTRONIK GmbH	Systeme für Über- und Unterwasser-Seestreitkräfte	Nein
ICS Induflex Coating Systems GmbH	Sondermaschinenbau - Plasmaanlagen	Ja
SLV Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Mecklenburg-Vorpommern GmbH	staatlich anerkannte Institution der Weiterbildung	Ja
thyssenkrupp Marine Systems GmbH	Werft	Nein
Maritimes Cluster Norddeutschland e.V.	Maritimes Netzwerk mit 350 Mitgliedern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.	Nein
hanseWasser Bremen GmbH	Abwasserunternehmen	Nein

Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Projektbegleitender Ausschuss

Diskussion der Forschungsergebnisse und Besprechung des weiteren Vorgehens

1. Projekttreffen (Kick-Off), 11.05.2022, Fraunhofer IFAM, Bremen
2. Projekttreffen, 09.05.2023, Fraunhofer IFAM, Bremen
3. Projekttreffen, 16.01.2024, Fraunhofer IFAM, Bremen

Transfer in die Industrie und Wissenschaft durch Tagungs-, Messeteilnahme und Publikationen

- Messe: Weltleitmesse der maritimen Wirtschaft - SMM Hamburg 3.-6. Sep 2024
- Vortrag: U. Specht: Workshop auf der 6. Sustainable Shipping Conference, „Elektrodynamische Anti-Foulingbeschichtung“, Bürgerschaft- Bremen -22./23. April 2024
- Homepagebeitrag: https://www.fsm-net.org/igf-vorhaben-22337-bg-elektrodynamische-antifouling-beschichtung-optischer-oberflaechen-von-schiffen-und-meerestechnik/
- Artikel: "A universal AC electrokinetics-based strategy toward surface antifouling of underwater optics" in „ Nature-Scientific Reports“ 16. Mai 2024 [17]
- Artikel: „Mit Elektrokinetik gegen Fouling auf optischen Oberflächen“ in „Schiffe und Hafen“ – Jul. 2024

Einbindung in die Lehre

- Vorlesung: U. Specht „Oberflächentechnik“ an der Hochschule Bremerhaven ab SS 2023
- Bachelorarbeit: A. Kumkar “ Bionischer Ansatz für transparente Oberflächenstrukturierungen mit Antifouling-Eigenschaften“, 18.07. 2023
- Master Projektarbeit: V. Wutz, “A new sustainable technology to reduce biological fouling on subwater optical surfaces using electrokinetics”, 18.09.2023
- Bachelor Projektarbeit: S. Pernpeintner; “Comparison of Biofouling on surfaces with different hydrophobidities”, 03.2024

Publikationen und geplante Transfermaßnahmen

- Messe: 14. Nationale Maritime Konferenz (NMK) 2025 (Emden)
- Messer: Windforce Conference 2025 (Bremerhaven)
- Artikel: Evaluation eines elektrokinetischen Verfahrens zur Foulingunterdrückung in einem maritimen Umfeld

References

[1] R. H. Tyler, T. P. Boyer, T. Minami, M. M. Zweng, and J. R. Reagan, "Electrical conductivity of the global ocean," *Earth Planets Space*, vol. 69, no. 1, p. 156, 2017, doi: 10.1186/s40623-017-0739-7.

[2] Z. Zheng, Y. Fu, K. Liu, R. Xiao, X. Wang, and H. Shi, "Three-stage vertical distribution of seawater conductivity," *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, p. 9916, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-27931-y.

[3] R. Lang, Y. Zhou, C. Utku, and D. Le Vine, "Accurate measurements of the dielectric constant of seawater at L band," *Radio Science*, vol. 51, no. 1, pp. 2–24, 2016, doi: 10.1002/2015RS005776.

[4] H. Jiang *et al.,* "A universal AC electrokinetics-based strategy toward surface antifouling of underwater optics," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 16125, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-66251-2.

[5] S. J. Williams, "Enhanced electrothermal pumping with thin film resistive heaters," *Electrophoresis*, vol. 34, 9-10, pp. 1400–1408, 2013, doi: 10.1002/elps.201200377.

[6] Ossila, *ITO Glass Substrates (Unpatterned).* [Online]. Available: https://www.ossila.com/products/ito-glass-substrates-unpatterned?variant=31274504978528 (accessed: Oct. 10 2024).

[7] N. Mokhtarifar, F. Goldschmidtboeing, and P. Woias, "Indium tin oxide coated PET for differential pH-sensing using field-effect transistor based sensor," *Micro & Nano Letters*, vol. 13, no. 11, pp. 1525–1530, 2018, doi: 10.1049/mnl.2018.5240.

[8] J. D. Müller, "Ocean acidification in the Baltic Sea," 2018.

[9] US EPA, *Understanding the Science of Ocean and Coastal Acidification | US EPA.* [Online]. Available: https://www.epa.gov/ocean-acidification/understanding-science-ocean-and-coastal-acidification (accessed: Oct. 10 2024).

[10] *Ocean acidification.* [Online]. Available: https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification (accessed: Oct. 10 2024).

[11] M. Senthilkumar, J. Mathiyarasu, J. Joseph, K. Phani, and V. Yegnaraman, "Electrochemical instability of indium tin oxide (ITO) glass in acidic pH range during cathodic polarization," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 108, 2-3, pp. 403–407, 2008, doi: 10.1016/j.matchemphys.2007.10.030.

[12] P. Lippens and U. Muehlfeld, "Indium Tin Oxide (ITO): Sputter Deposition Processes," in *Springer reference, Handbook of visual display technology*, J. Chen, W. Cranton, and M. Fihn, Eds., Berlin, Cham: Springer, 2012, pp. 1215–1234. [Online]. Available: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-14346-0_54

[13] *ARCELI XR2206 Hochpräzise Funktionssignalgenerator DIY Kit Sinus/Dreieck/Quadrat Ausgang 1Hz-1MHz Einstellbare Frequenzamplitude: Amazon.de: Gewerbe, Industrie & Wissenschaft.* [Online]. Available: https://www.amazon.de/ARCELI-Hochpr%C3%A4zise-Funktionssignalgenerator-Einstellbare-Frequenzamplitude/dp/B07V674HZY/ref=sr_1_11?dib=eyJ2IjoiMSJ9.QA5rSXVJSV-DF1xTfkb5pIv9sa8nqW8r2I5REAtu0pWJPVG2JuCQB-RQnfyM9Sh-q0VukXrCzh6APZp-a96NIcFza4YwwGVFvNW8F_GyWvM3j80ne7VQIAcJUl-RB_fHTnVfNmrGAcXv3pMTED1Y1bnK3N60sZz9s1QQo3rQFBoVj6Ti_DXTncV3Y_HdQwnIa5d0TbwO93nWu7K0ZBt0v_8nSfIsclkBChZJgLtP5BDQdjqD0W3x5YZ9zZJwQNINpDt4K

t4xuivg2h6IYd_DbyfWOkLmAJVig0hHrg46l5Y.QXBX3IPHI2oAgYxebDox4Bxdhe3F9qD67iG73yUNJj4&dib_tag=se&keywords=Funktionsgenerator&qid=1717360858&sr=8-11 (accessed: Jun. 2 2024).

[14] DE MOVESEA, *Submersible camera DTPod Deep TrekkerStarter / 100m / 1080p* (accessed: Jun. 2 2024).

[15] L. Delauney, C. Compère, and M. Lehaitre, "Biofouling protection for marine environmental sensors," *Ocean Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 503–511, 2010, doi: 10.5194/os-6-503-2010.

[16] D. Spiegel, "Berufstaucher: "Das komplette Gegenteil eines Bürojobs"," *DER SPIEGEL*, 16 Sep., 2012. https://www.spiegel.de/karriere/berufstaucher-ehrliches-handwerk-unter-wasser-a-855958.html (accessed: Jun. 10 2021).

[17] H. Jiang *et al.,* "A universal AC electrokinetics-based strategy toward surface antifouling of underwater optics," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 16125, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-66251-2.