



Schiffsbug mit Bewuchs im Unterwasserbereich

Foto: Zimbelmann

Mit blauen Lasern gegen Biofouling

REINIGUNGSKONZEPT Für die Schifffahrt ist die Bekämpfung von Biofouling eine multidimensionale Aufgabe: Neben der Vermeidung wirtschaftlicher Schäden und erhöhter CO₂-Emissionen gilt es heute, auch den Schutz regionaler Ökosysteme im Blick zu behalten. Das bringt gängige Antifouling-Maßnahmen an ihre Grenzen und fördert die Suche nach alternativen Strategien. Ein neues Reinigungskonzept unter Einsatz blauer Diodenlaser zeigt in Labortests vielversprechende Ergebnisse und soll jetzt weiterentwickelt werden für den nächsten Schritt: die Erprobung am Rumpf eines Nordseeschiffes.

Dr.-Ing. Markus Baumann, Dr.-Ing. Benjamin Emde, M.Sc. Stanislav Zimbelmann, Tim Heusinger von Waldegge, Dr. Thomas Brune

Biofouling gehört zu den größten Herausforderungen der Handels- und Personenschifffahrt. Der Bewuchs aus Mikroorganismen, Pflanzen, Algen, Muscheln und Seepocken, die sich binnen kürzester Zeiträume am Schiffsrumpf ansiedeln, erhöht den Strömungswiderstand und lässt dadurch Treibstoffverbrauch und CO₂-Emissionen in die Höhe schnellen. Die Wirtschaftlichkeit der Schiffe wird dadurch dramatisch verschlechtert: Schon ein Biofilm von lediglich einem halben Millimeter Dicke, der 50 Prozent der Rumpfoberfläche bedeckt, erhöht je nach Schiffseigenschaften, Fahrgeschwindigkeit und anderen Randbedingungen den Treibstoffverbrauch um 25 bis 30 Prozent [1]. Stärkere Bewuchsschichten, wie etwa Kalkbewuchs durch Seepocken oder Röhrenwürmer, können bei einem durchschnittlichen Containerschiff den Verbrauch um bis zu 60 Prozent steigern [1],

was auch entsprechend negative Folgen für die Klimabilanz mit sich bringt. Gegenmaßnahmen gestalten sich traditionell schwierig und erzeugen nicht selten neue Probleme. Die Entfernung der Meeresorganismen, die über Jahrtausende hinweg äußerst effektive Besiedlungsstrategien entwickelt haben, gelingt bisher nur mechanisch. Das führt zum Verschleiß und zum Teil auch zur Beschädigung von Bewuchsschutzbeschichtungen und kann letztlich sogar das Biofouling befördern, da sich Organismen wie Seepocken in Beschichtungsschäden bevorzugt ansiedeln. Gerade die weit verbreiteten selbstpolierenden Beschichtungen („Self-polishing coatings“, SPC) und die umweltfreundlicheren biozidfreen Fouling-Release-Beschichtungen sind aufgrund ihrer geringeren Festigkeit anfällig für Verschleiß und Oberflächenschäden infolge mechanischer Reinigungsverfahren. Bio-

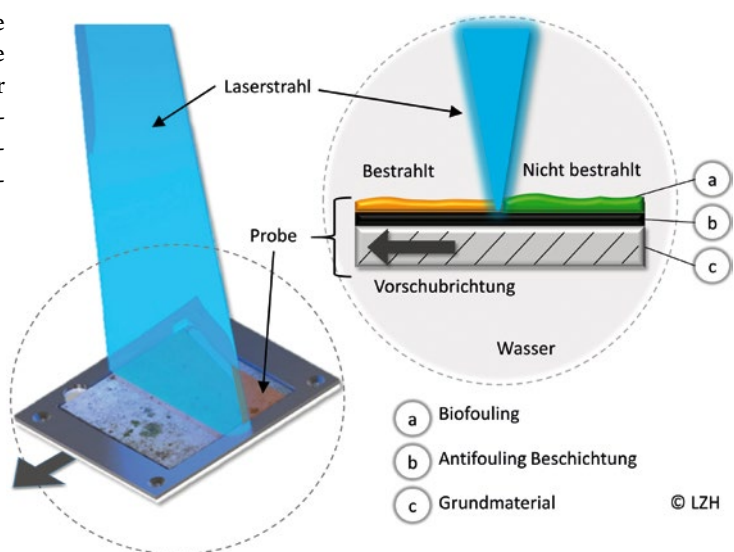
zidhaltige Antifouling-Beschichtungen wiederum gefährden die sensiblen marinen Ökosysteme, weshalb ihr Einsatz schon heute nur noch in engen Grenzen zulässig ist und in Zukunft immer weiter eingeschränkt werden wird [2] [3] [4]. Aus der Kostenfalle Biofouling war so bisher kein Ausweg zu finden. Der wirtschaftliche Schaden, den die Schifffahrt jährlich infolge des Foulinging erleidet, wird auf 200 Milliarden US-Dollar geschätzt [5].

Artenverschleppung bedroht regionale marine Ökosysteme

Biofouling belastet die Schifffahrt mittlerweile nicht mehr nur im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Klimaschutz. Vielmehr hat sich im Zuge der Globalisierung noch ein weiteres Problem herauskristallisiert, das vor allem auf Langstreckenfahrten zurückgeht und Schiffsbetreiber vor zusätzliche Herausforderungen stellt, nämlich die wachsende Bedrohung sensibler mariner Ökosysteme durch foulinginduzierte Artenverschleppung. Allein in Nord- und Ostsee konnten sich mittlerweile 80 bis 100 invasive Arten ansiedeln [6], die als blinde Ballastwasser- und Biofouling-Passagiere in diese Meeresregionen gelangten. In pazifischen Gewässern ist das Problem noch drängender: Hier droht die Artenverschleppung inzwischen ganze Ökosysteme nachhaltig zu verändern. Um ihre ohnehin stark gefährdeten Meeresökosysteme zu schützen und die Einschleppung fremder Organismen weitestgehend zu verhindern, haben pazifische Küstenstaaten wie Australien und Neuseeland oder der US-Bundesstaat Kalifornien strenge Regularien zum Umgang mit Biofouling erlassen, deren Missachtung konsequent geahndet wird. Vorfälle wie der des Kreuzfahrtschiffs „Viking Orion“, dem Ende 2022 die Einfahrt in mehrere australische und neuseeländische Häfen verweigert wurde, verdeutlichen, wie entschlossen die Behörden vorgehen. Der Streit um die Liegeplatzgenehmigung des Luxusliners, der sich über mehrere Tage hinzog und nur durch eine Reinigung des Rumpfes auf hoher See beigelegt werden konnte, sollte den Schiffsbetreibern als Warnung dienen. Zudem spricht viel dafür, dass ähnliche Regularien künftig auch von anderen Meeresanrainern erlassen und durchgesetzt werden.

Bekämpfung von Biofouling wichtiger denn je

Vor diesem Hintergrund muss es in den kommenden Jahren verstärkt darum gehen, zeitgemäße Lösungen für eine wirksame Fouling-Bekämpfung zu erarbeiten. Das schließt die Notwendigkeit der Entwicklung neuer Verfahren ein, wobei sich der Schutz mariner Ökosysteme auch hier als entscheidender Treiber erweist. Denn die entsprechenden Vorschriften gehen zum Teil so weit, dass selbst die herkömmliche mechanische Rumpfreinigung im Hafen untersagt wird, da hierbei viele Organismen lebend freigesetzt werden und so dennoch in die jeweiligen Ökosysteme gelangen [7]. Auch Partikel von Bewuchsschutzbeschichtungen, die im Zuge mechanischer Reinigungen abgelöst werden, belasten die marine Umwelt; im Falle biozidhaltiger Antifouling-Beschichtungen gelangen dann sogar gefährliche Toxine in die Gewässer und reichern sich in den Hafengebieten an. Selbst die Hochseereinigung der „Viking Orion“, die klassisch-mechanisch unter Einsatz von Tauchtrupps erfolgte und in immerhin 12 Meilen (19,31 km) Abstand von der Küste durchgeführt wurde, ist deshalb von Experten als kritisch eingestuft worden – empfehlen die Richtlinien doch, dort zu reinigen, wo der Bewuchs sich gebildet hat. In dieser Hinsicht können nur Reinigungsverfahren als



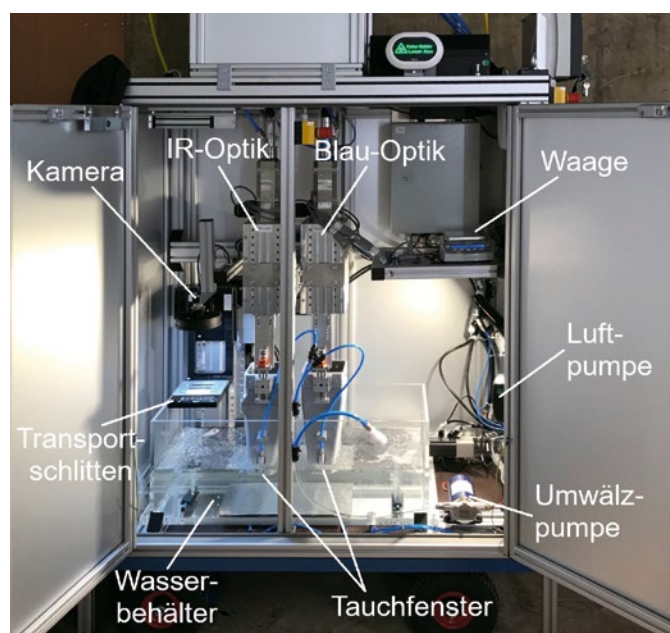
Schematische Darstellung der Probenbestrahlung

Foto: LZH

wirklich nachhaltig angesehen werden, die Beschichtungen nicht beschädigen, keine lebenden Organismen freisetzen und gleichzeitig dazu beitragen, einen übermäßigen Kraftstoffverbrauch und hohe CO₂-Emissionen zu vermeiden.

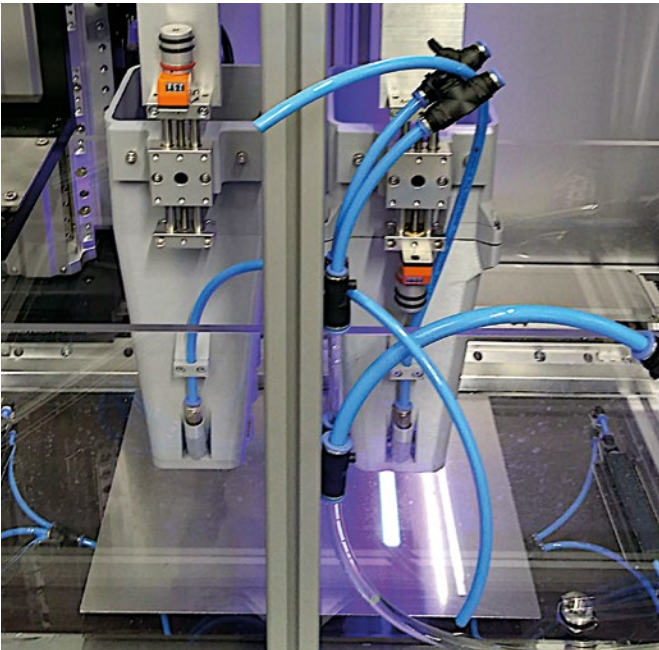
BMWK-gefördertes Forschungsprojekt „FoulLas“ setzt auf letale Laserbestrahlung

Doch wie realistisch ist es, dass solche Verfahren schon in absehbarer Zeit zur Verfügung stehen könnten? Ein Forschungsprojekt auf der Nordseeinsel Helgoland, das im Rahmen des maritimen Forschungsprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) durchgeführt und vom Projektträger Jülich aus Mitteln des BMWK gefördert wurde, ist dieser Frage in den vergangenen drei Jahren nachgegangen. Dem BMWK-Forschungsprogrammbereich „MARITIME.“



Aufbau der Probenbestrahlungsanlage

Foto: Laserline GmbH



Die beiden Bestrahlungsoptiken mit eingeschaltetem blauen Laser



Beschichtungsproben mit verschiedenem Bewuchsgrad

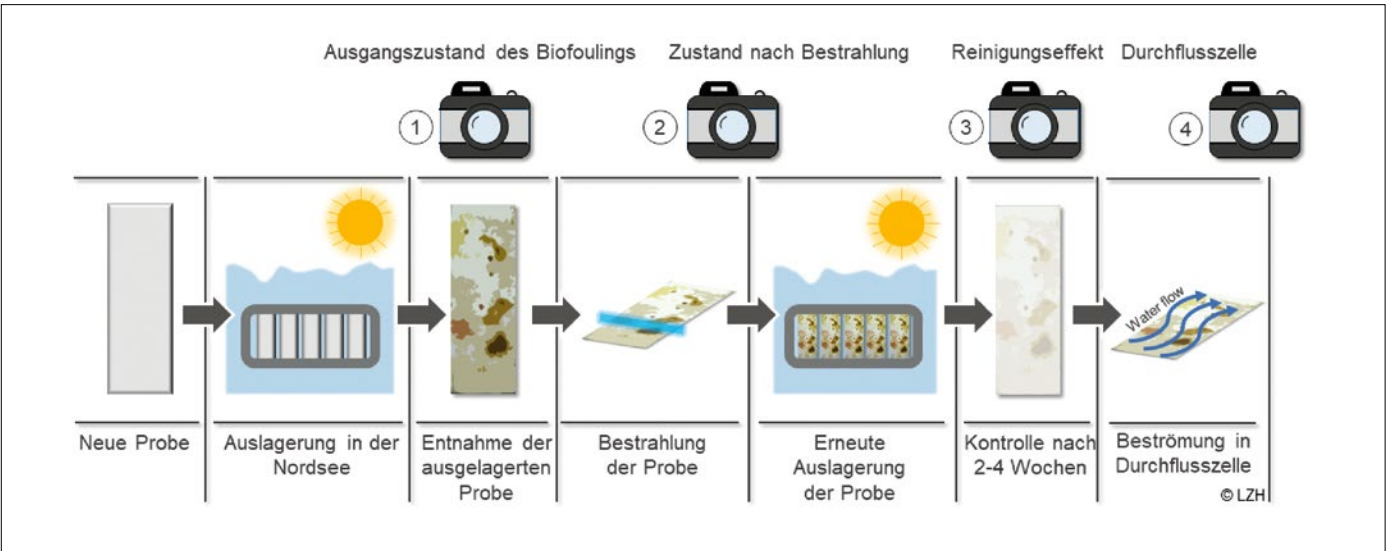
green – Umweltschonende maritime Technologien“ zugeordnet, untersuchte dieses Projekt mit dem Akronym „FoulLas“ die Möglichkeit der Bekämpfung von Biofouling mithilfe blauer und infraroter Laserstrahlung. Aktive Projektpartner waren das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung IFAM in Bremen, die Laserline GmbH aus Mülheim-Kärlich bei Koblenz sowie das Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH), dem auch die Projektkoordination oblag.

Ausgangspunkt des Forschungsprojektes war die Hypothese, dass sich der anhaftende Bewuchs durch eine Unterwasserbestrahlung mit Hochleistungsdiodenlasern letal schädigen lässt, ohne dabei bestehende Beschichtungen in Mitleidenschaft zu ziehen. Die Organismen degenerieren demnach infolge der Bestrahlung und werden bei Fahrt durch die Scherkräfte des Wassers abgetragen – mit dem Ergebnis, dass signifikante Reini-

gungswirkungen erzielt und Artenverschleppungen konsequent unterbunden werden.

Bestrahlung von Bewuchsproben mit infraroten und blauen Lasern

Um diese Hypothese überprüfen zu können, wurden zu Beginn des Projektes zunächst die – je nach Farbe sehr unterschiedlich gelagerten – Zerstörungsschwellen herkömmlicher Bewuchsschutzbeschichtungen ermittelt und die Bestrahlungsparameter anschließend so festgelegt, dass ein Überschreiten dieser Zerstörungsschwellen ausgeschlossen blieb. Auf der Grundlage dieser Grenzparametrisierung wurde dann mithilfe der Bestrahlung von Bewuchsproben genauer untersucht, mit welchen Laserleistungen, Leistungsdichten und Vorschubgeschwindigkeiten die angestrebte letale Schädigung am besten erreicht werden konnte. Für



Der zeitliche Ablauf der Parameterstudie

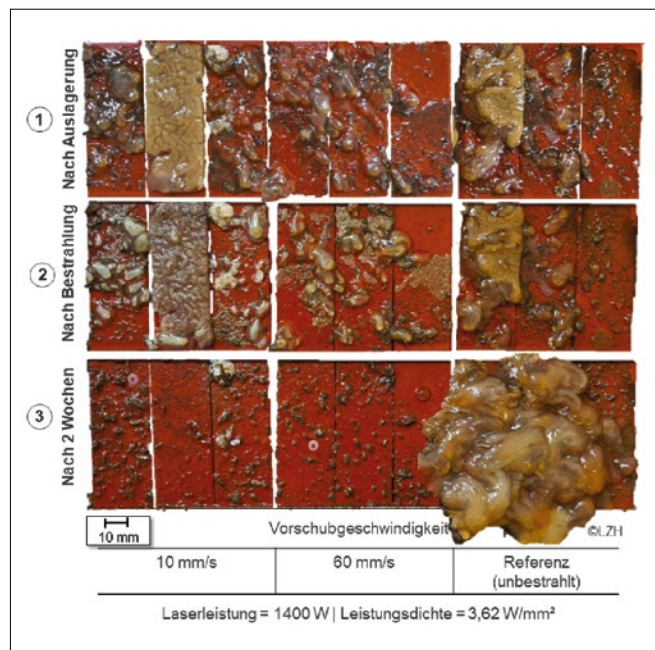
Quelle: LZH

diese Bestrahlungstests wurden zwei Laserline-Diodenlaser mit unterschiedlichen Wellenlängen eingesetzt, ein Laser im nahen Infrarotbereich bei 1016 nm und ein Laser im blauen Spektralbereich bei 450 nm. Dadurch konnte auch die Wirkung unterschiedlicher Wellenlängen auf die Organismen untersucht werden.

Die Bewuchsproben wurden unter natürlichen marinen Umweltbedingungen im Helgoländer Südhafen ausgelagert und nach einer Wachstumszeit von mehreren Wochen in einer mit frischem Seewasser befüllten Testanlage mit dem Laser unter Wasser bestrahlt. Anschließend wurden sie wieder im Hafenbecken ausgelagert und im Abstand von zwei Wochen erneut entnommen, um die Schädigung des Foulings zu beurteilen. Parallel dazu wurden einige Proben in einer eigens für das Projekt konzipierten Durchflusszelle einer definierten Strömung von bis zu 5,3 m/s ausgesetzt, um zu simulieren, wie sich Scherkräfte an einem fahrenden Schiff auf die Ablösung des Foulings auswirken. Der Standort Helgoland war für diese Experimente bewusst gewählt worden, da der Bewuchsdruck dort aufgrund des einzigartigen Helgoländer Felssockels wesentlich höher ist als in den von Sandböden dominierten Bereichen der Nordsee oder auch in der Ostsee mit ihrem deutlich geringeren Salzgehalt. Auf diese Weise konnten das Biofouling und dessen Bestrahlungsreaktion unter realitätsnahen Umgebungsbedingungen studiert werden, wenngleich der Bewuchsdruck auf Helgoland noch immer deutlich geringer ausfällt als beispielsweise im tropischen Südpazifik, wo ganzjährig stabile Temperaturen vorherrschen.

Mehrjährige Tests bestätigen letale Wirkung und Reinigungseffekt der Bestrahlung

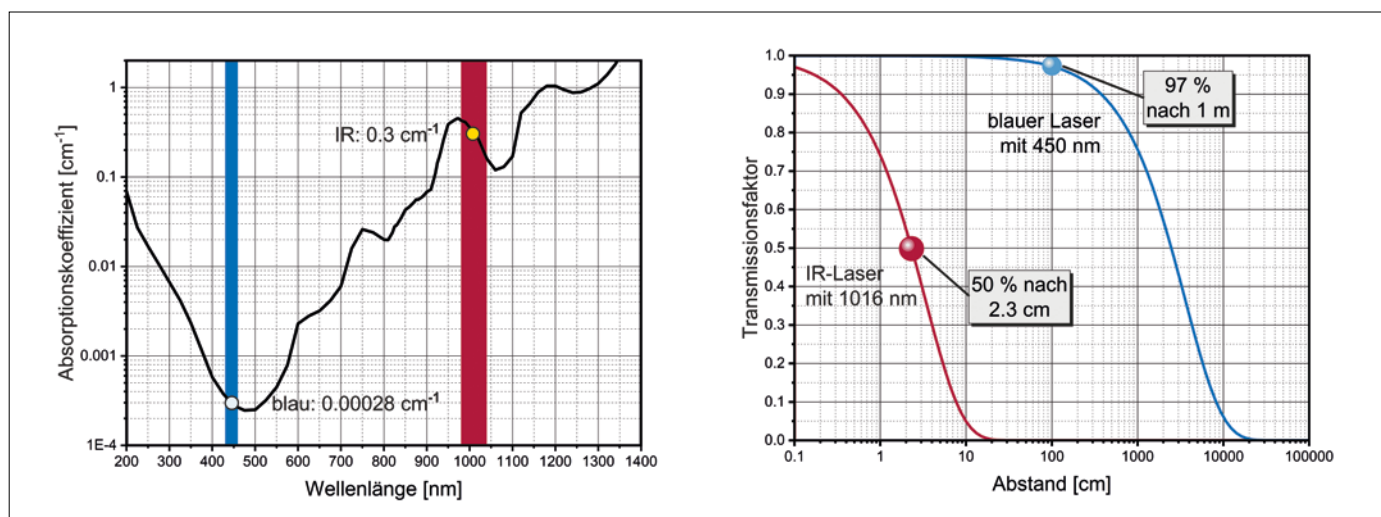
Nach insgesamt drei Auslagerungsperioden von Frühjahr bis Herbst und Hunderten bestrahlter Proben hatte sich die Ausgangshypothese des Projekts schließlich klar bestätigt. Die Laserbestrahlung ermöglicht auch innerhalb des Leistungsbereichs, der durch die Zerstörungsschwellen typischer Bewuchsschutzbeschichtungen vorgegeben wird, eine vollständige letale Schädigung des marinen Bewuchses. Das Verfahren ist dadurch bei aktuell gängigen Beschichtungen wie Fouling-Release-, Self-Polishing- oder Hard-Coatings wirksam anwendbar. Zugleich konnte nachgewiesen werden, dass sich der letal geschädigte Bewuchs nach



Testreihen mit Fouling-Release-Coating (FRC) bei maximaler Leistungsdichte mit verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten für die blaue Laserstrahlquelle

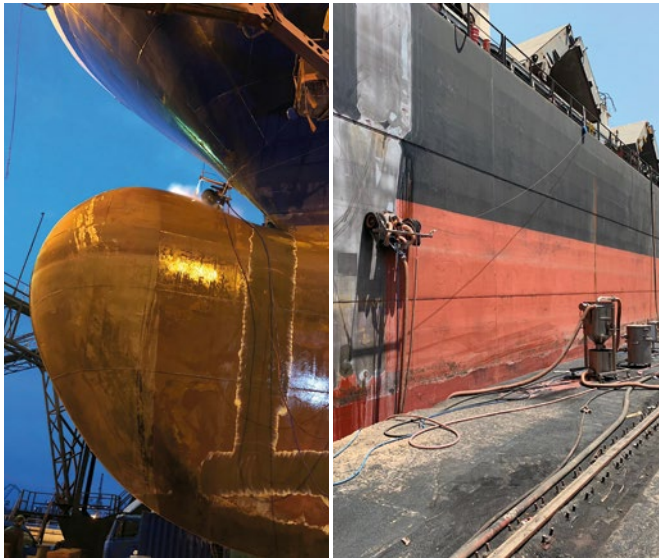
Quelle: LZH

kurzer Zeit von der Oberfläche löst, sodass eine deutliche Reinigungswirkung erzielt wird. Durch die Laserbestrahlung wird dabei nicht nur Softfouling aus Algen und Mikroorganismen letal geschädigt, sondern auch Hardfouling aus Seepocken, das nach dem Absterben ebenfalls größtenteils von der Oberfläche abfällt. Als vorteilhaftestes Bestrahlungskonzept stellte sich im Laufe der Tests die Bestrahlung des Foulings mit Laserlicht im blauen Spektralbereich um 450 nm heraus. Neben der letalen Wirkung dieser Wellenlänge auf die Zellstrukturen spielt dabei auch die hohe Transparenz des Wassers für Licht dieses Spektralbereichs eine Rolle. Während die Hälfte des Infrarotlichts unter Wasser bereits nach einer Entfernung von weniger als einer Daumenbreite absorbiert wird, verliert ein blauer Diodenlaser mit 450 nm auch nach einer Unterwasserdistanz von mehr als einem Meter



Absorptionsspektrum von klarem Wasser (von links) mit einem ausgeprägten Absorptionsminimum bei 470 nm und die sich ergebende Transmission für IR-Strahlung und Strahlung bei 450 nm

Quelle: links, Hale und Query 1973 – rechts, Laserline GmbH



Magnetcrawler der OFTEC Oberflächen GmbH beim wasserhochdruckbasierten Entschichten eines Schiffs im Trockendock. Ein ähnlicher Crawler soll für die Unterwasserbestrahlung des Biofoulings mit Diodenlasern entwickelt werden. Foto: OFTEC Oberflächentechnik GmbH

nicht mehr als drei Prozent seiner Strahlungsleistung. Dadurch lassen sich – hinreichend klares Wasser vorausgesetzt – bei einer laserbasierten und kontaktlosen Unterwasserreinigung auch Stellen erreichen, die bisher ausschließlich per Hand gereinigt werden konnten. Der blaue Diodenlaser erleichtert damit über den Schiffsrumpf hinaus auch die Reinigung von Ruderanlagen, Schiffsschrauben, Kortdüsen und Propellergondeln.

Folgeprojekt soll Weg zur Serienreife bahnen

Im Zuge des dreijährigen Helgoländer Forschungsprojekts konnte also tatsächlich ein neues Reinigungsverfahren entwickelt werden, das weder Beschichtungen schädigt noch lebende Organismen freisetzt und das infolge einer deutlichen Reinigungswirkung auch

sehr effektiv zur Vermeidung überhöhter Treibstoffverbräuche und CO₂-Emissionen beitragen kann. Den gestiegenen Anforderungen an den Schutz des Klimas und der marinen Ökosysteme lässt sich damit ebenso Rechnung tragen wie den wirtschaftlichen Interessen der Schifffahrt. Für die serielle Umsetzung dieses Verfahrens sind – auch dies ein Ergebnis des Projekts – gleichwohl noch einige technische Erweiterungen nötig, da sich die für Schiffsreinigungen erforderlichen Flächenleistungen von mehreren 100 m²/h nur mit Laserausgangsleistungen im zweistelligen Multikilowattbereich erreichen lassen. Mit herkömmlichen, fasergekoppelten blauen Industrielasern ist das aktuell nicht abzubilden, sodass Laserline hier auf eine völlig neue Laserlösung setzt. Geplant ist die Entwicklung von Unterwasser-Diodenlasern, die von einem teilautonomen, magnetisch haftenden Unterwasserfahrzeug (Crawler) über die Rumpfoberfläche bewegt werden und das Fouling durch ein Fenster direkt bestrahlen. Die Strahlung wird dabei zu einer Linie geformt. Zudem sollen sich mehrere solcher Diodenlaser modular zu größeren Linienlängen skalieren lassen. Für die Umsetzung dieses neuen Laserkonzepts haben die Projektpartner die Firma OFTEC Oberflächentechnik GmbH aus Dorsten ins Boot geholt, die auf die Entwicklung und Fertigung sowie den Verleih von Robotik-Systemen zur Oberflächenbearbeitung spezialisiert ist. Sie wird als Koordinatorin des unlängst bewilligten und erneut auf drei Jahre angelegten Folgeprojekts „FoulLas“ die Modulplattform für die blauen Unterwasser-Diodenlaser entwickeln. Sollten sich die Resultate des ersten „FoulLas“-Projekts vom Labormaßstab auf die Praxis am Schiffsrumpf übertragen lassen, könnte das neue Verfahren noch vor Ablauf des Jahrzehnts zur Verfügung stehen und in der Bekämpfung von Biofouling neue Maßstäbe setzen.

Literatur

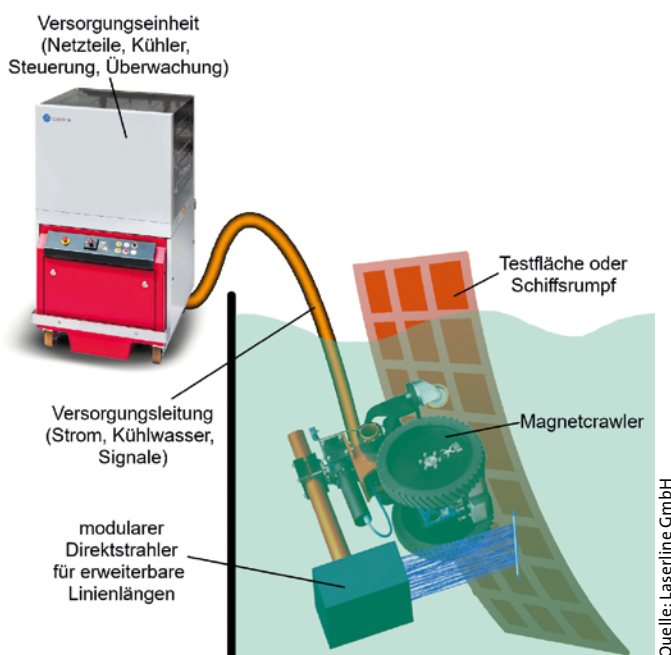
- [1] „Analysing the Impact of Marine Biofouling on the Energy Efficiency of Ships and the GHG Abatement Potential of Biofouling Management Measures“, Published by GloFouling Partnerships and GIA for Marina Biosafety. London, 2022. https://www.glofouling.imo.org/_files/ugd/34a7be_afd9d183df9a4526bd088007436c1079.pdf?index=true
- [2] Umweltbundesamt <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/schifffahrt#fakten-zur-seeschifffahrt-und-zu-ihren-auswirkungen-auf-die-umwelt>
- [3] „Science for Environment Policy“: European Commission DG Environment News Alert Service, edited by the Science Communication Unit, The University of the West of England, Bristol. https://environment.ec.europa.eu/news/baltic-sea-shipping-should-avoid-copper-antifouling-paints-and-open-loop-scrubbers-mitigate-2023-05-24_en
- [4] Dafforn KA, Lewis JA, Johnston EL. Antifouling strategies: history and regulation, ecological impacts and mitigation. Mar Pollut Bull. 2011 Mar;62(3):453-65. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.01.012. Epub 2011 Feb 15. PMID: 21324495.
- [5] Neue Zürcher Zeitung. <https://www.nzz.ch/wissenschaft/biofouling-anstriche-gegen-bewuchs-auf-schiffsrumpf-sind-giftig-ld.1739424>
- [6] World Ocean Review, „Mit den Meeren leben - ein Bericht über den Zustand der Weltmeere“, 2010. <https://worldoceanreview.com/de/wor-1/oekosystem/arteneinschleppung/>
- [7] Department of the Environment and New Zealand Ministry for Primary Industries (2015), Anti-fouling and in-water cleaning guidelines, Department of Agriculture, Canberra. CC BY 3.0. ISBN 978-1-76003-009-4 (online) This publication is available at agriculture.gov.au/biosecurity/avm/vessels/biofouling/anti-fouling-and-inwater-cleaning-guidelines.

Förderhinweis

Das Forschungsvorhaben „Fouling-Entfernung von maritimen Oberflächen mittels Laserstrahlung unter Wasser“ wurde über den Projektträger Jülich vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert (Förderkennzeichen 03SX489).

Die Autoren

Dr.-Ing. Markus Baumann, „Laser- und Optikentwicklung“, Laserline GmbH; Dr.-Ing. Benjamin Emde, Gruppenleiter „Unterwassertechnik“ und M.Sc. Stanislav Zimbelmann, „Unterwassertechnik“, Laser Zentrum Hannover e.V.; Tim Heusinger von Waldegge, Projektleiter „Antimikrobielle Beschichtungen und Bewuchsschutz“, Fraunhofer IFAM; Dr. Thomas Brune, OFTEC Oberflächentechnik GmbH



Konzeptidee für eine Anwendung des Verfahrens an einem Schiff