

TEXTE

25/2023

Einträge bedenklicher Stoffe in Gewässer reduzieren: Erarbeitung von Vergabekriterien für die Zertifizierung von Antifouling- Systemen mit dem Blauen Engel

Abschlussbericht

TEXTE 25/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3719 65 415 0

FB000852

Einträge bedenklicher Stoffe in Gewässer reduzieren: Erarbeitung von Vergabekriterien für die Zertifizierung von Antifouling-Systemen mit dem Blauen Engel

Abschlussbericht

von

Bernd Daehne, Jens Wallis

Dr. Brill + Partner Institut für Antifouling und Biokorrosion
(IAFB), Norderney

Dr. Stefan Gartiser, Dr. Christoph Hafner
Hydrotox GmbH, Freiburg


Dr. Burkard Watermann
LimnoMar, Hamburg


Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Dr. Brill + Partner GmbH, Institut für Antifouling und Biokorrosion (IAFB), Norderney
Am Hafen 10
26548 Norderney

Abschlussdatum:

Februar 2022

Redaktion:

Fachgebiet IV1.2 Biozide
Dr. Sascha Setzer
Torsten Schwanemann

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Februar 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Erarbeitung von Einträge bedenklicher Stoffe in Gewässer reduzieren: Erarbeitung von Vergabekriterien für die Zertifizierung von Antifouling-Systemen mit dem Blauen Engel

Schiffsrümpfe müssen mit Antifoulingssystemen vor Bewuchs mit Muscheln, Seepocken, Algen etc. geschützt werden, da diese sonst den Reibungswiderstand und damit den Treibstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß erhöhen. Trotz zahlreicher verschiedenartiger Alternativen wird der Markt der Antifoulingbeschichtungen sowohl in der professionellen Schifffahrt wie auch in der Sportbootschifffahrt noch immer von bioziden Produkten dominiert. Dabei haben zahlreiche Studien ergeben, dass im Süßwasser ein Einsatz von bioziden Beschichtungen vielfach nicht notwendig ist, um Bewuchs auf Schiffsrümpfen zu verhindern. Und selbst für die bewuchsreichen Meere gibt es inzwischen nicht-biozide Alternativen, die eine ausreichende Wirksamkeit erzielen.

Die Etablierung eines Umweltzeichens Blauer Engel für umweltfreundliche „Unterwasserbeschichtungen und andere Bewuchsschutzsysteme“ soll nun Hersteller motivieren, geeignete Produkte zu entwickeln und die Etablierung dieser Produkte auf dem Markt zu unterstützen. Im Rahmen des Projektes wurden Kriterien aufgestellt, mit denen die Umweltverträglichkeit und auch die Wirksamkeit der nicht-bioziden Bewuchsschutzsysteme nachgewiesen werden kann. Hierbei wurde eine bereits 2004 durchgeführte UBA-Studie wieder aufgegriffen (UBA-TEXTE 45/04). Inzwischen gibt es deutlich mehr Beschichtungen und Bewuchsschutzstrategien. In einer aktuellen Marktrecherche wurden 100 nicht-biozide Produkte identifiziert, die 14 unterschiedlichen Wirkungsmechanismen zugeordnet wurden. Die in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt erarbeiteten stofflichen und produktbezogenen Anforderungen wurden auf einem Fachgespräch und einer Expertenanhörung mit Behördenvertreter*innen, Herstellerfirmen, NGOs und anderen Expert*innen diskutiert. Die Jury Umweltzeichen stimmte den Vergabekriterien im Dezember 2021 zu. Der Abschlussbericht dokumentiert die Ergebnisse einer Literaturstudie, der Marktrecherche sowie der Ableitung der einzelnen Kriterien.

Abstract: Development of award criteria for certification of biocide-free antifouling systems with the Blue Angel

Ships` hulls need an effective marine growth protection system to avoid the settlement of mussels, barnacles, algae etc., which would increase the drag friction and thus fuel consumption and emission of greenhouse gases. Although there is a wide range of different alternatives the market for professional shipping as well as for leisure boats is dominated by biocidal coatings. At the same time a lot of studies have shown that the use of biocides is not necessary when vessels are trading in fresh waters. Even for marine waters with much more fouling some non-biocidal alternatives have a sufficient performance.

Now, the ecolabel “Blue Angel” for environmentally friendly “Underwater Coatings and other Fouling Protection Systems” has been established to encourage the research and development of such products and to bring more of them to the market. The specification of criteria on the antifouling-performance and the environmental compatibility have been the main topics of this project. This study based on a former report from 2004 (UBA-TEXTE 45/04). Meanwhile a lot more coatings and antifouling strategies are available. In a current market research 100 non-biocidal products out of 14 product groups with different modes of action have been identified. The requirements concerning materials and products, which have been developed in coordination with the German Environmental Agency, have been discussed with the relevant authorities, manufacturing companies, NGOs and other experts at two virtual expert discussions. The Jury for the ecolabel Blue Angel approved the award criteria in December 2021. This final report comprised the results of a literature study, a market research and the derivation of the criteria.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
Zusammenfassung	VII
Summary	XIII
1 Einleitung	1
2 Kenntnisstand und Zielsetzung	2
3 Methodisches Vorgehen	4
3.1 Literatur- und Marktrecherchen	4
3.1.1 Literaturrecherche	4
3.1.2 Marktrecherche	5
4 Ergebnisse Literatur- und Marktrecherchen	6
4.1 Überblick	6
4.1.1 Literaturstudie	6
4.1.2 Marktrecherche	7
4.2 Beschichtungen	8
4.2.1 Definition der Alternativen, in denen keine genehmigten Antifoulingbiozide enthalten sind	8
4.2.2 Antihafbeschichtungen	9
4.2.2.1 Wirkungsprinzip und Erfahrungen	9
4.2.2.2 Marktrecherche	12
4.2.3 Antihaftefolien	13
4.2.3.1 Wirkungsprinzip und Erfahrungen	13
4.2.3.2 Marktrecherche	14
4.2.4 Faserbeschichtungen	15
4.2.4.1 Wirkungsprinzipien und Erfahrungen	15
4.2.4.2 Marktrecherche	16
4.2.5 Hartbeschichtungen	16
4.2.5.1 Wirkungsprinzip und Erfahrungen	16
4.2.5.2 Marktrecherche	17
4.2.6 Beschichtungen mit Naturstoffen	18
4.2.6.1 Wirkungsprinzipien und Erfahrungen	18
4.2.6.2 Marktrecherche	20

4.2.7	Selbstpolierende und erodierende Beschichtungen	20
4.2.7.1	Wirkungsprinzipien und Erfahrungen.....	20
4.2.7.2	Marktrecherche	22
4.2.8	Weitere elektrische Verfahren	23
4.2.8.1	Wirkungsprinzipien und Erfahrungen.....	23
4.2.8.2	Marktrecherche	24
4.3	Antifoulingstrategien außer Beschichtungen und Antihafffolien.....	24
4.3.1	Reinigungsvorrichtungen am Liegeplatz.....	25
4.3.1.1	Wirkungsprinzip und Erfahrungen.....	25
4.3.1.2	Marktrecherche	26
4.3.2	Tauch- und Reinigungsfirmen	28
4.3.2.1	Wirkungsprinzipien und Erfahrungen.....	28
4.3.2.2	Marktrecherche	28
4.3.3	Stationäre Bootswaschanlagen.....	30
4.3.3.1	Wirkungsprinzip und Erfahrungen.....	30
4.3.3.2	Marktrecherche	31
4.3.4	Bootshebeanlagen	31
4.3.4.1	Wirkungsprinzip und Erfahrungen.....	31
4.3.4.2	Marktrecherche	32
4.3.5	Ultraschallanlagen	33
4.3.5.1	Wirkungsprinzip und Erfahrungen.....	33
4.3.5.2	Marktrecherche	35
4.3.6	Unterwasserplanen.....	38
4.3.6.1	Wirkungsprinzip und Erfahrungen.....	38
4.3.6.2	Marktrecherche	39
4.3.7	Sonstige Verfahren	39
4.3.7.1	Wirkungsprinzip und Erfahrungen.....	39
4.3.7.2	Marktrecherche	41
4.4	Ökotoxikologische Bewertung von Antifoulingbeschichtungen	41
4.4.1	Biozide Beschichtungen	41
4.4.2	Nicht-biozide Beschichtungen	43
5	Entwicklung von Vergabekriterien	45
5.1	Ziele.....	45
5.2	Vergleich mit bestehenden Umweltzeichen.....	45
5.3	Geltungsbereich	47

5.4	Anforderungsmatrix.....	48
5.5	Anforderungen an die Ausgangsstoffe	48
5.5.1	Allgemeine stoffliche Anforderungen.....	48
5.5.2	Anforderungen zum Einsatz von Bioziden	51
5.5.3	Flüchtige organische Verbindungen (VOC).....	51
5.6	Spezielle stoffliche Anforderungen.....	55
5.6.1	Oxime	55
5.6.2	PVC.....	56
5.6.3	Anforderungen an Polymere und Kunststoffe.....	58
5.6.4	Alkylphenoethoxylate	59
5.6.5	Zinnorganische Verbindungen.....	61
5.6.6	Titandioxid	61
5.6.7	Verwendung von Nanopartikeln.....	62
5.6.8	Silikonöle.....	63
5.6.9	Hydrogele.....	64
5.6.10	Zinkoxid.....	65
5.6.11	Kupfer als Katalysator	66
5.6.12	Freisetzung von Kunststoff	66
5.6.13	Freisetzung von bioabbaubaren Naturstoffen.....	68
5.7	Anforderungen an das Produkt.....	70
5.7.1	Gefahrstoffrechtliche Anforderungen an das Produkt.....	70
5.7.2	Ökotoxizität der Eluate	71
5.7.3	Freisetzung kritischer Stoffe aus dem Endprodukt.....	73
5.7.4	Berücksichtigung der Gebrauchsdauer.....	74
5.7.5	Wirksamkeitsnachweis und Gebrauchseigenschaften	74
5.7.5.1	Wirksamkeitsnachweis bei Beschichtungen und Klebefolien	78
5.7.5.2	Wirksamkeitsnachweis bei reinigungsfähigen Hartbeschichtungen	79
5.7.5.3	Wirksamkeitsnachweis bei Reinigungssystemen	80
5.7.5.4	Wirksamkeitsnachweise bei Ultraschallanlagen.....	80
5.7.5.5	Wirksamkeitsnachweise bei Unterwasserplanen.....	80
5.7.5.6	Wirksamkeitsnachweise bei Bootshebeanlagen	81
5.7.5.7	Wirksamkeitsnachweise bei Sonstigen Verfahren	81
5.8	Anforderungen bei Applikation, Einbau und Nutzung.....	81
5.8.1	Anforderungen bei der Applikation von Beschichtungen.....	81
5.8.2	Anforderungen bei Einbau und Nutzung von technischen Bewuchsschutzlösungen	82

5.8.2.1	Reinigungsvorrichtungen am Liegeplatz.....	82
5.8.2.2	Tauch- und Reinigungsfirmen.....	82
5.8.2.3	Stationäre Bootswaschanlagen	82
5.8.2.4	Bootshebeanlagen	82
5.8.2.5	Ultraschallanlagen	82
5.8.2.6	Unterwasserplanen.....	83
5.9	Anforderungen bei der Entsorgung	83
5.9.1	Entsorgung bei Reinigungsverfahren.....	83
5.9.2	Entsorgung nach Entschichtung am Ende der Standzeit	85
5.10	Anwendungsinformationen	85
5.11	Werbeaussagen.....	86
6	Ausblick für künftige Entwicklungen der Vergabekriterien	87
7	Quellenverzeichnis	88
A	Anhang	101
A.1	Steckbrief	101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Resonanz auf die Marktrecherche, aufgeschlüsselt nach Produktart	7
Tabelle 2:	Anbieter von Antihaftbeschichtung	12
Tabelle 3:	Anbieter von Antihaftfolien.....	14
Tabelle 4:	Anbieter von Faserbeschichtungen.....	16
Tabelle 5:	Anbieter von Hartbeschichtungen	17
Tabelle 6:	Anbieter von nicht-bioziden selbstpolierenden oder erodierenden Beschichtungen	22
Tabelle 7:	Weitere elektrische Verfahren	24
Tabelle 8:	Anbieter von Reinigungsvorrichtungen am Liegeplatz (nur für Freizeitschiffe)	27
Tabelle 9:	Tauch- und Reinigungsfirmen (nur für professionelle Schifffahrt).....	28
Tabelle 10:	Anbieter von stationären Bootwaschanlagen (nur für Freizeitschiffe)	31
Tabelle 11:	Anbieter von Bootshebeanlagen (nur für Freizeitschiffe).....	32
Tabelle 12:	Eignung von Ultraschall hinsichtlich verschiedener Oberflächen	36
Tabelle 13:	Anbieter von Ultraschallanlagen als Antifoulingssystem.....	37
Tabelle 14:	Anbieter von Unterwasserplanen	39
Tabelle 15:	Anbieter von sonstigen Verfahren	41
Tabelle 16:	Gefahrstoffrechtliche Einstufung von Lösemitteln nach CLP-Verordnung.....	53
Tabelle 17:	Prüfkriterien für Ökotoxizität für Produkte mit organischen Zusatzstoffen	72
Tabelle 18:	Unabhängige Institute für Antifouling-Wirksamkeitsprüfungen	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anforderungsmatrix für die unterschiedlichen Produktgruppen des Entwurfes der Vergabekriterien (x – relevant; n.a. - nicht anwendbar)	48
Abbildung 2:	Seite 1 des Steckbriefformulars für Beschichtungen	101
Abbildung 3:	Seite 2 des Steckbriefformulars für Beschichtungen	102
Abbildung 4:	Seite 3 des Steckbriefformulars für Beschichtungen	103
Abbildung 5:	Seite 1 des Steckbriefformulars für Antifouling-Strategien außer Beschichtungen.....	104
Abbildung 6:	Seite 2 des Steckbriefformulars für Antifouling-Strategien außer Beschichtungen.....	105
Abbildung 7:	Seite 1 der Tabelle 3: Materialliste.....	106
Abbildung 8:	Seite 2 der Tabelle 3: Materialliste.....	107

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
AUV	Autonomous Underwater Vehicle = Autonomes Unterwasserfahrzeug
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BPR	Biozidprodukteverordnung (EU) 528/2012 (biocidal products regulation)
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.
BVT	Beste Verfügbare Techniken
dB	Dezibel
CAS	Chemical Abstracts Service
CDP	Controlled Depletion Polymers
CLP	Classification, Labelling and Packaging
DBU	Deutschen Bundesstiftung Umwelt
DSL	Dynamic Surface Leaching Test
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
G-Stufe	Verdünnungsstufe bzw. Verdünnungsfaktor in Konzentrationsreihe der Wasserprobe, im Englischen als D (dilution level) bezeichnet.
LID	Lowest Ineffective Dilution (mit Index A für Algen, D für Daphnien, lb für Leuchtbakterien, Egg für Fischeier und EU für umu), im Deutschen als G-Wert (GA, GD, GL, GEi und GEU für Algen, Daphnien, Leuchtbakterien, Fischeier und den umu-Test bezeichnet.
PBT	Persistent, bioakkumulierend und toxisch
PDMS	Polydimethylsiloxan
PVC	Polyvinylchlorid
POP	Persistent organic pollutants
RAL	Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.
REACH	REACH - Verordnung (EG) 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu = National Institute for Public Health and the Environment of the Netherlands
RO(U)V	remotely operated (underwater) vehicle = Ferngesteuertes (Unterwasser)fahrzeug
SPC	self-polishing coatings
SVHC	Substance of Very High Concern
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
UBA	Umweltbundesamt
UZ	Umweltzeichen
VOC	Volatile Organic Compounds
vPvB	very persistent and very bioaccumulating

Zusammenfassung

Alle Oberflächen, die sich im Meer oder in Süßgewässern unter der Wasseroberfläche befinden, werden innerhalb kürzester Zeit von pflanzlichen und tierischen Organismen besiedelt. Dieses betrifft sowohl künstliche als auch natürliche Oberflächen. Das Phänomen als Ganzes wird als Aufwuchs beschrieben. Der Aufwuchs auf natürlichen Substraten wie Felsen, Treibholz oder den harten Schalen anderer Meeresbewohner wird Epibiose bezeichnet. Die unerwünschte Besiedlung auf künstlichen Substraten wie Schiffsrümpfen wird Bewuchs (Fouling) genannt.

Fouling auf technischen Oberflächen verursacht enorme Kosten in Form von Treibstoffmeherverbrauch, Dockungskosten, Reinigungsaufwand und Bewuchsschutzmaßnahmen. Schon so lange wie es die Schifffahrt gibt, wird deshalb nach Lösungen gesucht, diesen unerwünschten Bewuchs zu verhindern, denn er erhöht den Reibungswiderstand und damit den Treibstoffverbrauch und auch den CO₂-Ausstoß der Schiffe.

Ein weiterer Grund, um Bewuchs auf Schiffsrümpfen zu verhindern, ist der unerwünschte Transport von Meeresorganismen in ferne Meeresregionen. Gelangen solche „Blinden Passagiere“ mit einem Schiff innerhalb so kurzer Zeit von ihrem Ausgangsgebiet in ein anderes Gebiet mit ähnlichen klimatischen und gewässerchemischen Voraussetzungen, dann überleben die Organismen und können sich dort unter Umständen fortpflanzen und als invasive Art in ein Ökosystem einwandern und dieses verändern. Dies erfolgt meist weniger am glatten Rumpf, sondern eher in Nischenbereichen des Schiffsrumpfes. Dazu zählen Seekästen mit nachgeschalteten Kühlwasserrohren oder Ballastwassertanks, Stabilisatoren am Rumpf oder auch Bugstrahltunnel.

An den deutschen Küstengewässern kommt es zur Ausbildung mächtiger Bewuchsgemeinschaften, soweit der Salzgehalt oberhalb 18 ‰ liegt. Im Brackwasser der Flussmündungen mit ihren stromaufwärts (Richtung Süßwasser) sinkenden Salzgehalten und ihren hohen Schwebstoffgehalten (Trübungswolke) geht die Zahl der bewuchsbildenden Organismen und somit der Bewuchsdruk rasch zurück.

Eine umfassende Studie des Umweltbundesamtes UBA ([UFOPLAN 2011, FKZ 3711 67 432, UBA-TEXTE 68/2015](#)) von 2012 bis 2014 hat ergeben, dass von insgesamt 206.279 Sportbooten eine deutliche Mehrheit von 146.425 (71 %) Booten ihren Liegeplatz im Süßwasser hatte und nur 54.079 (26,2 %) auf Brackwasser- und sogar nur 5.775 Liegeplätze (2,8 %) auf Salzwasserreviere entfielen.

Bislang werden aber zur Bewuchsverhinderung im Meer- wie im Süßwasser sowohl in der Berufsschifffahrt als auch im Sportbootbereich überwiegend giftige „biozide“ Anstriche verwendet. Diese bioziden „Wirkstoffe“ werden aus den Rumpfbeschichtungen freigesetzt und gelangen so in die umgebende aquatische Umwelt. Dort schädigen sie aber nicht nur die Zielorganismen, die auf dem Schiffsrumpf siedeln können, sondern auch alle Nicht-Zielorganismen, die in dem Gewässer leben. Durch den Gebrauch von hochtoxischen Verbindungen werden dadurch wirtschaftliche und ökologische Schäden an kommerziell genutzten und wildlebenden Meeresorganismen hervorgerufen. Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit bereits zahlreiche hoch wirksame, aber auch hochgiftige Biozide wie z. B. das Tributylzinn (TBT) verboten. Zuletzt wurden die zulässigen Biozide durch die EU-Biozidverordnung ([Verordnung \(EU\) Nr. 528/2012](#)) stark reduziert. Von zuvor ca. 50 „Altbioziden“ wurde nur für zehn eine Genehmigung aus der Farbenindustrie beantragt. Hinzu kamen Neuanträge für zwei weitere Biozide. Alle anderen sind seither verboten (z. B. Diuron) und auch der beantragte Wirkstoff Irgarol wurde nicht genehmigt¹. Die Genehmigungen wiederum sind jeweils nur auf 10 Jahre befristet, um nach dieser Zeit zu beurteilen, ob es inzwischen weniger

¹ <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/wie-viel-antifouling-vertragen-unsere-gewaesser>

umweltschädigende Alternativen gibt, die ein Biozid substituieren können. Der aktuelle Stand kann dem REACH-Helpdesk entnommen werden².

Diese legislative Entwicklung hat dazu beigetragen, dass zunehmend auch an nicht-bioziden Alternativen geforscht wurde und wird. Dabei handelt es sich nicht nur um Beschichtungen, sondern auch um Folien, Fasern oder elektrisch-technische Systeme.

Die Etablierung eines Umweltzeichens Blauer Engel für umweltfreundliche „Unterwasserbeschichtungen und andere Bewuchsschutzsysteme“ soll nun die Etablierung dieser Produkte auf dem Markt unterstützen und gleichzeitig die Hersteller motivieren, weitere geeignete Produkte zu entwickeln. Dafür wurde die vorliegende Studie vom UBA initiiert. Im Rahmen des Projektes wurden Kriterien aufgestellt, mit denen die Umweltverträglichkeit und auch die Wirksamkeit der nicht-bioziden Bewuchsschutzsysteme nachgewiesen werden muss, um das RAL-Umweltzeichen erlangen. Hierbei wurde auf eine bereits 2004 durchgeführte UBA-Studie aufgebaut (UBA-TEXTE 45/04). Inzwischen gibt es deutlich mehr Produkte und Bewuchsschutzstrategien als damals.

Die vorliegende Studie „Einträge bedenklicher Stoffe in Gewässer reduzieren: Erarbeitung von Vergabekriterien für eine Zertifizierung biozidfreier Antifouling-Systeme mit dem Blauen Engel“ war in vier Phasen aufgeteilt.

Im **Arbeitspaket (AP) 1** wurde zunächst eine „Literatur- und Marktrecherche“ zu verfügbaren Alternativen durchgeführt. Im Anschluss an eine Literatur- und Internetrecherche wurden Hersteller kontaktiert, die in Frage kommende Systeme in ihrem Portfolio hatten. Bei Interesse wurden Steckbriefe versandt mit der Bitte, die technischen Daten so ausführlich wie möglich einzutragen, damit die Produkte genauer beurteilt werden können. Zudem wurden öffentlich zugängliche Informationen zu den Produkten (Merkblätter, Sicherheitsdatenblätter) über Internetrecherchen zusammengetragen und ausgewertet.

Diese Daten wurden ausgewertet und die Produkte in verschiedene Produktgruppen aufgeteilt. Insgesamt wurden in der Marktrecherche 100 nicht-biozide Produkte identifiziert, die 14 unterschiedlichen Wirkungsmechanismen (= Produktgruppen) zugeordnet wurden: Antihafbeschichtungen, Antihafthüllen, selbstpolierende (SPCs) und erodierende Beschichtungen (wurden im späteren Projektverlauf ausgeschlossen), Hartbeschichtungen, Faserbeschichtungen und -folien. Hinzu kamen elektrische Verfahren wie Hebeanlagen, Ultraschallanlagen, UV-Anlagen und Laseranlagen sowie stationäre und mobile Reinigungsgeräte, Tauch- und Reinigungsfirmen oder auch Unterwasserplanen, die ebenfalls mechanisch reinigen können.

Im **AP 2 „Vergabekriterien“** wurden konkrete Prüf- und Bewertungskriterien zur Umweltzeichenvergabe erarbeitet. Hierbei wurde zwischen der Prüfung kritischer Inhaltsstoffe und den Wirksamkeitsnachweisen der Produkte und Produktgruppen unterschieden.

Für den **Geltungsbereich** lassen sich die in der Marktrecherche identifizierten alternativen Bewuchsschutzsysteme in drei Produktkategorien einordnen: a) alternative Unterwasserbeschichtungen wie Antihafbeschichtungen, Klebefolien, reinigungsfähige Hartbeschichtungen und b) andere Antifoulingstrategien wie Unterwasserplanen, Ultraschallanlagen oder auch Bootshebeanlagen sowie c) mobile Schiffsreinigungsgeräte und stationäre Schiffsreinigungsanlagen. Nischenbereiche wie Seekästen, Bugstrahlruder, Ruderanlage, Welle, Propellertunnel sind vom Geltungsbereich ausgeschlossen, da hierfür noch keine Wirksamkeitstests entwickelt wurden. Selbstpolierende und erodierende Beschichtungen sind, mit Ausnahme bioabbaubarer Naturstoffe, ebenfalls ausgeschlossen, da diese intendiert zu

² <https://www.reach-clp-biozid-helpdesk.de/DE/Biozide/Wirkstoffe/Genehmigte-Wirkstoffe/Genehmigte-Wirkstoffe-0.html#PT21>

hohen Stoffeinträgen in die Gewässer führen können. Solche intendierten Einträge sind im Sinne der Nachhaltigkeit auszuschließen.

Die Anforderungen wurden zunächst für Beschichtungssysteme definiert. Für die anderen Bewuchsschutzsysteme wurde anhand einer Anforderungsmatrix dargestellt, welche der Anforderungen relevant sind.

Unter den **allgemeinen stofflichen Anforderungen** wird zunächst die Einhaltung der gesetzlichen Regelungen vorausgesetzt. Darüber hinaus dürfen mit einem Umweltlabel ausgezeichnete Produkte üblicherweise keine Stoffe enthalten, die gemäß REACH Artikel 57 als besonders besorgniserregend identifiziert und in der REACH Kandidatenliste der SVHC-Stoffe aufgenommen wurden.

Ziel der Zertifizierung von Antifouling-Systemen ist die Förderung von Produkten und Verfahren, die auf den Einsatz biozider Antifoulingmittel, insbesondere der Produktarten 7, 9 und 21, verzichten. Daher sollte der Einsatz von Bioziden grundsätzlich ausgeschlossen werden. Als Ausnahme dürfen Topfkonservierungsmittel (PA 6) in den Vorprodukten enthalten sein, wenn diese nicht zu einer gefahrstoffrechtlichen Einstufung des Produktes führen.

In Anlehnung an die ChemVOCFarbV wurde der maximal zulässige Gehalt an VOC in Unterwasserbeschichtungen für wasserbasierte Produkte auf 100 g/L und für lösemittelbasierte Produkte auf 250 g/L begrenzt. Alternativ kann auch ein flächenbezogener Verbrauch für alle aufgetragenen Schichten von maximal insgesamt 150 g/m² eingehalten werden. Dies betrifft in erster Linie Dünnschichtsysteme.

Unter den speziellen stofflichen Anforderungen werden eine Reihe problematischer Inhaltsstoffe, die in Unterwasserbeschichtungen vorkommen könnten, reglementiert. Dazu gehören insbesondere Pigmente und Sikkative, die Bleiverbindungen enthalten, Alkylphenoethoxylate (APEO) und deren Derivate, Weichmacher aus der Gruppe der Phthalate oder Organophosphate, Antihautmittel auf Basis von Oximen, per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS) einschließlich Fluorcarbonharze sowie zinnorganische Verbindungen. Unter den Kunststoffen sind Polytetrafluorethylen (PTFE) und Polyvinylchlorid (PVC) sowie Kunstharze auf Basis von Bisphenol A oder ähnliche Bisphenol-Verbindungen nicht zulässig. Zinkoxid (z. B. Pigment, UV-Absorber, Katalysator) und Kupferoxid (als Katalysator in Silikonbeschichtungen) dürfen nur dann als Hilfsstoffe eingesetzt werden, wenn dies nicht zu einer Einstufung des Produktes in Umweltgefahren (H400-H413) führt und keine Ökotoxizität in den Eluaten bestimmt wird. Die Verwendung von Nanomaterialien ist nicht zulässig.

Die Verwendung von Titandioxid als Weißpigment in Farben und Lacken ist in flüssigen Gemischen zulässig, da sich die Einstufung als karzinogen der Kategorie 2 (Carc. 2 – H351 kann vermutlich Krebs erzeugen) nur auf einatembare Stäube bezieht.

Bezüglich der Inhaltsstoffe hat sich gezeigt, dass viele der nicht-bioziden Beschichtungen und Folien Inhaltsstoffe enthalten, die nicht mit einer Umweltzeichenvergabe vereinbar sind. Dazu gehören z. B. die vielfach enthaltenen Silikonöle, Zinkoxid, Bisphenole und Polyamidfasern, die bei den notwendigen Zwischenreinigungen in die Gewässer eingetragen würden. Auch die Verwendung von PVC als Folie oder Werkstoff ist bei der Umweltzeichenvergabe ausgeschlossen.

Die **intendierte Freisetzung** von Kunststoffen (unter Bildung von Mikroplastik) ist nicht zulässig. Damit werden explizit erodierende und selbstpolierende Beschichtungen ausgeschlossen. Die betrifft auch Silikonöle, die bestimmungsgemäß aus Beschichtungen ausschwitzen. Hiervon ausgenommen sind gebundene Silikonöle, die in Materialien für den Lebensmittelkontakt zugelassen oder aus trinkwasserhygienischer Sicht als unbedenklich eingestuft wurden. Lediglich die Freisetzung von Naturstoffen, die nicht chemisch modifiziert

sind, wie z. B. Wachse oder Fette mit dem Ziel einer Antihafwirkung ist dann zulässig, wenn hierbei die Polymermatrix, wie bei den selbstpolierenden bzw. erodierenden Beschichtungen, nicht mit freigesetzt wird. Die Entscheidung über die Zulässigkeit der intendierten Freisetzung von Naturstoffen erfolgt fallspezifisch durch das Umweltbundesamt.

Bei den **Anforderungen an das Produkt** ist eine gefahrstoffrechtliche Einstufung in Umweltgefahren (H400, H410, H411, H412 oder H413) nicht zulässig. Zudem sind Produkte mit ständigem Wasserkontakt in einer dynamischen Oberflächenauslaugprüfung nach CEN/TS 16637-2 zu eluieren und die Ökotoxizität im Eluat nach CEN/TR 17105 im Leuchtbakterien-, Algen-, Daphnien-, und Fischeitest sowie die Gentoxizität im umu-Test zu prüfen. Hierbei wird das Produkt in seinem vollständigen Aufbau getestet. Es wird die Mischung aus den zwei ersten Eluaten nach 6 Stunden und weiteren 18 Stunden sowie das Eluat nach 64 Tagen (Eluatfraktion 8 von Tag 36 bis 64, Gesamtdauer 28 d) untersucht. Die Kombination von Leaching und Ökotoxizitätstests wurde aus der Bewertung von Bauprodukten abgeleitet und in den Vergabekriterien des Blauen Engel DE-UZ-216 „Betonwaren mit rezyklierten Gesteinskörnungen für Bodenbeläge im Freien“ berücksichtigt.

Wirksamkeitsnachweise

Bezüglich der Wirksamkeitsnachweise der Produkte wurden die Bedingungen und Grenzwerte der Bewuchsbedeckung für alle Produktgruppen im Meer- und Brackwasser (≥ 18 ‰) in Anlehnung an die ECHA-„Guidance on the Biocidal Products Regulation Volume II Efficacy - Assessment and Evaluation (Parts B+C) Version 3.0 April 2018“ für Biozid-Antifoulings übernommen. Testergebnisse können alternativ mit einem simulierten statischen Plattentest oder mit einem simulierten dynamischen Plattentest an einem Prüfstand oder mit einem realen dynamischen Feldtest an einem Schiff erbracht werden. Es sind jeweils drei Plattenreplikatе bzw. Testschiffe erforderlich. Die Mindest-Testdauer beträgt in Anlehnung an die ECHA-Guidance sechs Monate während der Bewuchsperiode. Der Monat mit dem stärksten Bewuchsaufkommen muss in dieser Periode liegen. Zwischenreinigungen während des Testzeitraums sind nicht zulässig (Ausnahme explizite Reinigungsverfahren).

Im Meer- und Brackwasser müssen an dem Standort Seepocken und mindestens eine Muschelart vorkommen. Die Salinität am Teststandort muss in Anlehnung an Watermann et al. (2014) mindestens 18 ‰ betragen. Im Meer- und Brackwasser (≥ 18 ‰) muss die Negativkontrolle zum Testende nach frühestens sechs Monaten mindestens 75 % Makrobewuchs aufweisen, damit der Test anerkannt werden kann. Das entspricht nach der international anerkannten Auswertungsmethode ASTM 6990-20 einem Fouling Rating von ≤ 25 . Die Testflächen dürfen zum Testende auf jedem der drei Replikatе nicht mehr als 25 % Makrobewuchs (ASTM Fouling Rating ≥ 75) aufweisen. Damit ist sichergestellt, dass Produkte mit dem Blauen Engel die gleichen Wirksamkeitsgrenzen erreichen müssen wie Biozid-Produkte.

Da diese und andere Guidelines keine Werte für das Süßwasser vorschreiben, wurden anhand eigener Erfahrungen aus Bewuchstests Grenzwerte für die Produkte wie auch die Kontrollen im Süßwasser neu definiert. Am Teststandort müssen entweder die Zebra- oder die Quaggamuschel vorkommen. Im Süßwasser muss die Negativkontrolle zum Testende nach frühestens sechs Monaten mindestens 10 % Makrobewuchs (ASTM Fouling Rating ≤ 90) aufweisen, damit das Testergebnis anerkannt werden kann. Die Testflächen dürfen zum Testende auf jedem der drei Replikatе nicht mehr als 5 % Makrobewuchs (ASTM Fouling Rating ≥ 95) aufweisen.

Die große Heterogenität der Bewuchsschutz-Prinzipien erforderte aber, dass für jede Produktgruppe eigene Anforderungen formuliert werden mussten, wie der Nachweis zu erbringen ist. Nur die Beschichtungen und Klebefolien können den Regelungen der ECHA-Guideline folgen, für alle anderen bedarf es Modifikationen.

Bei Ultraschallanlagen und auch allen anderen elektrischen Verfahren kann die Wirksamkeit mittels entsprechend bestückter Testplatten im simulierten Feldtest wie auch mittels realer Schiffsversuche erbracht werden. Die Testflächen müssen sowohl beim simulierten statischen Plattentest als auch beim Schiffstest eine Mindestgröße von 50 * 50 cm aufweisen und dürfen nicht mit einer Unterwasserbeschichtung mit Bewuchsschutzeffekt versehen sein.

Reinigungsfähige Hartbeschichtungen müssen keine Wirksamkeit, sondern eine Abriebfestigkeit mittels eines modifizierten Taber-Abrasionstests nach ASTM D4060-19 nachweisen. Die Anforderungen gelten als erfüllt, wenn der Abrieb der getesteten Unterwasserbeschichtung $\leq 50 \mu\text{m}$ ist und zum Testende mindestens 10 % der ursprünglichen Schichtdicke verbleiben.

Für die mobilen Schiffsreinigungsgeräte sind sowohl simulierte statische Plattentests als auch Schiffstests möglich. Im Meer- und Brackwasser muss zwischen zwei Reinigungsschritten mindestens ein Abstand von zwei Wochen liegen. Im Süßwasser muss zwischen zwei Reinigungsschritten mindestens ein Abstand von zwei Monaten liegen. Die Testung muss auf einer Unterwasserbeschichtung erfolgen, die einen Taber-Abrasionstest bestanden hat.

Für stationäre Schiffsreinigungsanlagen können Wirksamkeitstests ausschließlich mittels Schiffstests durchgeführt werden. Ansonsten gelten die gleichen Rahmenbedingungen wie für die mobilen Reinigungsgeräte.

Unter dem Begriff „Unterwasserplanen“ sind zwei unterschiedliche Prinzipien zusammengefasst: Bei einem Prinzip werden Unterwasserplanen während der Liegezeiten wie eine Gardine enganliegend über den Schiffsrumpf gezogen, um eine Ansiedlung von Organismen auf dem Rumpf zu verhindern. Beim anderen Prinzip fahren Boote auf eine Folie am Liegeplatz und reiben sich dadurch den Bewuchs ab. Für beide Verfahren ist kein Wirksamkeitstest mittels Testplatten möglich. Die Grenzwerte müssen auf drei Schiffen erbracht werden. Als Referenzen sind hierfür Kontrollplatten am Liegeplatz vorgeschrieben

Für Bootshebeanlagen muss kein Wirksamkeitstest erbracht werden, da die Boote nicht bewachsen können, wenn sie aus dem Wasser gehoben sind.

Im AP 3 „Initiierung und Koordination des Umweltzeichens“ sind aufbauend auf der Marktrecherche potenzielle Zeichennehmer kontaktiert worden, um das Umweltzeichen erfolgreich zu etablieren. Hierbei wurde die Interessenlage der potenziellen Zeichennehmer*innen und bestehende technische Anforderungen z. B. hinsichtlich der notwendigen Verwendung bestimmter Stoffe eruiert.

In AP 4 wurden diese Anforderungen auf einem virtuellen „Stakeholder-Workshop“ am 15. Juni 2021 und in einer ebenfalls virtuellen Expert*innen-Anhörung am 8. September 2021 den möglichen Zeichennehmern sowie Expert*innen aus der Industrie sowie Behörden und Umweltverbänden vorgestellt und mit ihnen diskutiert.

Basierend auf den Eingaben der Teilnehmer*innen wurden die Vergabekriterien angepasst und am 7. Dezember virtuell der RAL-Jury vorgestellt und ohne Änderungen akzeptiert, so dass Anfang 2022 eine neue Blauer Engel Produktgruppe „Unterwasserbeschichtungen und andere Bewuchsschutzsysteme“ erscheinen wird.

Ausblick

Das Thema und die (Weiter-)Entwicklung neuer Antifoulingssysteme ist ein sehr dynamischer Prozess, bei dem es fast wöchentlich zu neuen Publikationen kommt. Demzufolge konnten nicht alle Entwicklungen abgewartet werden. Einige Prozesse wurden identifiziert, die bei einer künftigen Überarbeitung der Vergabekriterien besonders berücksichtigt werden sollten, da es hier bis zur Überarbeitung wahrscheinlich neue Entwicklungen gegeben haben wird. Folgende Themen wurden hierfür identifiziert:

- ▶ Nanotechnologie nach zukünftigem Stand der Wissenschaft und Technik
- ▶ Nischenbereiche an Schiffsrümpfen, die bislang nicht zum Geltungsbereich gezählt werden konnten, da standardisierte Methoden zur Bewertung der Wirksamkeit von Produkten in Nischenbereichen noch fehlen
- ▶ Wirksamkeitsnachweis bei regelmäßiger Zwischenreinigung
- ▶ Gesetzliche Regelungen der Anforderungen an stationäre Schiffsreinigungsanlagen und mobile Schiffsreinigungsgeräte
- ▶ Anforderungen an die gefahrstoffrechtlichen Produkthanforderungen im Vergleich zu den Gefahrenmerkmalen der CLP-Verordnung (EG) Nr. 1272/2008
- ▶ Anforderungen an die Ultraschallemissionen von Ultraschallanlagen z. B. in Bezug auf Frequenzen, maximalen Schalldruck und Schalldauer (Exposition, um eine Lärmbelastigung der Gewässerfauna zu begrenzen bzw. auszuschließen.

Summary

All surfaces that are below the water surface in the sea or in freshwaters are colonised by plant and animal organisms within a very short time. This applies to both artificial and natural surfaces. The phenomenon as a whole is described as “periphyton”. The growth on natural substrates such as rocks, driftwood or the hard shells of other marine organisms is called “epibiosis”. The unwanted colonisation on artificial substrates such as ship hulls is called “fouling”.

Fouling on technical surfaces causes enormous costs in the form of additional fuel consumption, docking costs, cleaning effort and anti-fouling measures. For as long as shipping has existed, solutions have been sought to prevent this unwanted fouling, as it increases frictional resistance and thus fuel consumption and the ships' CO₂ emissions.

Another reason to prevent fouling on ship hulls is the undesired transport of marine organisms to distant marine regions. If such "stowaways" travel with a ship within a short time from their initial area to another area with similar climatic and water-chemical conditions, then the organisms survive and can possibly reproduce there and migrate into an ecosystem as an invasive species. This may result in changes in the ecosystem leading to a deterioration of indigenous species. The spread of species usually occurs less on smooth hulls, but rather in niche areas of the hulls. These include sea chests with downstream cooling water pipes or ballast water tanks, stabilisers on the hull or bow thruster tunnels.

In Germany's coastal waters, large fouling communities form when the salinity is above 18 ‰. In the brackish water of river mouths with their upstream (towards freshwater) decreasing salinity and high suspended matter content (cloud of turbidity), the number of fouling organisms and thus the fouling pressure decreases rapidly.

A comprehensive study by the German Environment Agency UBA ([UFOPLAN 2011, FKZ 3711 67 432, UBA- TEXTE 68/2015](#)) from 2012 to 2014 showed that of a total of 206,279 recreational boats, a clear majority of 146,425 (71 %) boats had their moorings in freshwater and only 54,079 (26.2 %) were in brackish water and even only 5,775 moorings (2.8 %) in saltwater areas.

Until now, toxic "biocidal" coatings have been used predominantly to prevent fouling in both marine and freshwater environments, both in commercial and recreational shipping. These biocidal "active substances" are released from the hull coatings and thus enter the surrounding aquatic environment. There, however, they harm not only the target organisms that can settle on the hull, but also all non-target organisms that live in the body of water. The use of highly toxic compounds thus causes economic and ecological damage to commercial and wild marine organisms. For this reason, numerous highly effective but also highly toxic biocides such as tributyltin (TBT) have already been banned in the past. Most recently, the EU Biocide Regulation ([Regulation \(EU\) No. 528/2012](#)) has greatly reduced the number of approved biocides. Of the previous roughly 50 "old biocides", only ten were applied for approval from the paint industry. In addition, new applications were submitted for two more biocides. All others have since been banned (e.g. Diuron) and the active ingredient Irgarol, which was applied for, was not approved either. The approvals, in turn, are only limited to 10 years in each case, in order to assess after this time whether there are now less environmentally harmful alternatives that can substitute a biocide. The current status can be found at the REACH helpdesk.

This legislative development has contributed to the fact that non-biocidal alternatives have been and still are increasingly being researched. These are not only coatings, but also films, fibres or electro-technical systems.

The establishment of a Blue Angel ecolabel for environmentally friendly "underwater coatings and other anti-fouling systems" is now intended to support the establishment of these products on the market and at the same time motivate manufacturers to develop further suitable products. The present study was initiated by UBA for this purpose. Within the framework of the project, criteria were established with which the environmental compatibility and also the efficacy of the non-biocidal anti-fouling systems must be proven in order to obtain the RAL environmental label. This was based on a UBA study carried out in 2004 (UBA-TEXTE 45/04). Meanwhile, there are considerably more products and anti-fouling strategies than at that time.

The present study "Reducing inputs of substances of concern into water bodies: Development of award criteria for certification of biocide-free antifouling systems with the Blue Angel" was divided into four phases.

In work package (WP) 1, a "literature and market research" on available alternatives was carried out first. Following a literature and internet search, manufacturers were contacted who had possible systems in their portfolio. In case of interest, fact sheets were sent out with the request to enter the technical data in as much detail as possible so that the products could be assessed more precisely. In addition, publicly available information on the products (leaflets, safety data sheets) were compiled and evaluated via internet research.

These data have been evaluated and the products were divided into different product groups. A total of 100 non-biocidal products were identified in the market research, which were assigned to 14 different mechanisms of action (= product groups): Non-stick coatings, non-stick films, self-polishing (SPCs) and eroding coatings (were excluded later during the project), hard coatings, fibre coatings and films. In addition, there were electrical processes such as lifting systems, ultrasonic systems, UV systems and laser systems as well as stationary and mobile cleaning equipment, diving and cleaning companies or underwater tarpaulins, which can also clean mechanically.

In WP 2 "Award criteria", specific testing and evaluation criteria for the award of the eco-label were developed. A distinction was made between the testing of critical ingredients and the proof of efficacy of the products and product groups.

For the field of application, the alternative anti-fouling systems identified in the market research can be classified into three product categories: a) alternative underwater coatings such as non-stick coatings, adhesive films, cleanable hard coatings and b) other anti-fouling strategies such as underwater tarpaulins, ultrasonic or other electrical methods or also boat lifting systems as well as c) mobile ship cleaning devices and stationary ship cleaning systems. Niche areas such as sea chests, bow thrusters, steering gear, shaft, propeller tunnels are excluded from the scope as no efficacy tests have yet been developed for these. Self-polishing and eroding coatings are also excluded, with the exception of biodegradable natural substances, as these can intentionally lead to high substance inputs into the water bodies. Such intentional inputs must be excluded in the interest of sustainability.

The requirements were first defined for coating systems. For the other anti-fouling systems, a requirement matrix was used to show which of the requirements are relevant.

Under the general substance requirements, compliance with the legal regulations is first assumed. In addition, eco-labelled products usually must not contain substances identified as SVHC according to REACH Article 57 and included in the REACH candidate list of SVHC substances.

The goal of the certification of antifouling systems is to promote products and processes that dispense with the use of biocidal antifouling agents, especially product types 7, 9 and 21. Therefore, the use of biocides should be excluded as a matter of principle. As an exception, pot

preservatives (PA 6) may be contained in the preliminary products if these do not lead to a hazardous substance classification of the product.

Following the ChemVOCFarbV, the maximum permissible content of VOCs in underwater coatings was limited to 100 g/L for water-based products and 250 g/L for solvent-based products. Alternatively, an area-related consumption for all applied layers of a maximum total of 150 g/m² can be observed. This applies primarily to thin-film systems.

Under the specific material requirements, a number of problematic ingredients that could occur in underwater coatings are regulated. These include in particular pigments and siccatives containing lead compounds, alkylphenol ethoxylates (APEO) and their derivatives, plasticisers from the group of phthalates or organophosphates, anti-skin agents based on oximes, per- and polyfluorinated chemicals (PFAS) including fluorocarbon resins, and organotin compounds. Among plastics, polytetrafluoroethylene (PTFE) and polyvinyl chloride (PVC) as well as synthetic resins based on bisphenol A or similar bisphenol compounds are not permitted. Zinc oxide (e.g. pigment, UV absorber, catalyst) and copper oxide (as catalyst in silicone coatings) may only be used as excipients if this does not lead to an environmental hazard classification (H400-H413) of the product and no ecotoxicity is determined in the eluates. The use of nanomaterials is not permitted.

The use of titanium dioxide as a white pigment in paints and varnishes is permitted in liquid mixtures, as the classification as a category 2 carcinogen (Carc. 2 - H351 may probably cause cancer) refers only to inhalable dusts.

With regard to ingredients, it has been shown that many of the non-biocidal coatings and films contain ingredients that are not compatible with eco-labelling. These include, for example, the silicone oils, zinc oxide, bisphenols and polyamide fibres that are often contained and would probably be discharged into the water bodies during the necessary intermediate cleaning, as preliminary tests have shown. The use of PVC as a film or material is also excluded from the eco-label.

The intended release of plastics (with the formation of microplastics) is not permitted. This explicitly excludes eroding and self-polishing coatings. This also applies to silicone oils that leach out of coatings as intended. This does not apply to bound silicone oils that have been approved in materials for food contact or have been classified as harmless from a drinking water hygiene point of view. Only the release of natural substances that are not chemically modified, such as waxes or greases with the aim of achieving an anti-adhesive effect, is permissible if the polymer matrix is not released in the process, as is the case with self-polishing or eroding coatings. The decision on the permissibility of the intended release of natural substances is made on a case-by-case basis by the German Environment Agency.

In the requirements for the product, environmental hazard classification (H400, H410, H411, H412 or H413) is not permitted. In addition, products with continuous water contact must be eluted in a dynamic surface leaching test according to CEN/TS 16637-2 and the ecotoxicity in the eluate must be tested according to CEN/TR 17105 in the luminescent bacteria, algae, daphnia and fish egg test as well as the genotoxicity in the umu-test. The product is tested in its complete structure. The mixture of the two first eluates after 6 hours and another 18 hours as well as the eluate after 64 days (eluate fraction 8 from day 36 to 64, total duration 28 d) are tested. The combination of leaching and ecotoxicity tests was derived from the evaluation of building products and taken into account in the award criteria of the Blue Angel DE-UZ-216 "Environmentally friendly concrete products containing recycled aggregates for outdoor flooring".

Proof of efficacy

With regard to the efficacy demonstrations of the products, the conditions and limit values of the fouling coverage for all product groups in marine and brackish water (≥ 18 ‰) were adopted following the [ECHA "Guidance on the Biocidal Products Regulation Volume II Efficacy - Assessment and Evaluation \(Parts B+C\) Version 3.0 April 2018"](#) for biocidal antifoulings. Test results can alternatively be provided with a simulated static panel test or with a simulated dynamic panel test on a test rig or with a real dynamic field test on a ship. Three panel replicates or test vessels are required in each case. The minimum test duration is six months during the fouling period in accordance with the ECHA guidance. The month with the highest fouling must be during this period. Intermediate cleaning during the test period is not permitted (exception: explicit cleaning procedures).

In marine and brackish water, barnacles and at least one species of mussel must be present at the test site. The salinity at the test site must be at least 18 ‰ following [Watermann et al. \(2014\)](#). In seawater and brackish water (≥ 18 ‰), the negative control must have at least 75 % macrofouling at the end of the test after six months at the earliest for the test to be accepted. This corresponds to a Fouling Rating ≤ 25 following the international accepted evaluation method [ASTM 6990-20](#). The test areas must not have more than 25 % macro fouling (= ASTM Fouling Rating ≥ 75) on each of the three replicates at the end of the test. This ensures that Blue Angel products must achieve the same efficacy limits as biocidal products.

Since these and other guidelines do not prescribe values for freshwater, threshold values for the products as well as the controls in freshwater were redefined on the basis of own experiences from fouling tests. Either the zebra or the quagga mussel must be present at the test site. In freshwater, the negative control must show at least 10 % macrofouling (= ASTM Fouling Rating ≤ 90) at the end of the test after six months at the earliest for the test result to be accepted. The test areas shall not have more than 5 % macrofouling (= ASTM Fouling Rating ≥ 95) on each of the three replicates at the end of the test.

However, the great heterogeneity of the antifouling principles required that separate requirements for proof of efficacy had to be formulated for each product group. Only the coatings and adhesive films can follow the regulations of the ECHA Guideline, modifications are required for all others.

In the case of ultrasonic systems and all other electrical methods, the efficacy can be demonstrated by means of appropriately equipped test plates in simulated field tests as well as by means of real ship tests. The test surfaces must have a minimum size of 50 * 50 cm for both the simulated static plate test and the ship test and must not be provided with an underwater coating with anti-fouling effect.

Cleanable hard coatings do not have to demonstrate efficacy but abrasion resistance by means of a modified Taber abrasion test according to [ASTM D4060-19](#). The requirements are considered met if the abrasion of the tested underwater coating is ≤ 50 μm and at least 10 % of the original coating thickness remains at the end of the test.

Simulated static panel tests as well as ship tests are possible for the mobile ship cleaning devices. In sea and brackish water, there must be an interval of at least two weeks between two cleaning steps. In freshwater, there must be an interval of at least two months between two cleaning steps. Testing must be carried out on an underwater coating that has passed a Taber abrasion test.

For stationary ship cleaning equipment, efficacy tests can only be carried out by means of ship tests. Otherwise, the same general conditions apply as for mobile cleaning equipment.

Two different principles are summarised under the term "underwater tarpaulins": In one principle, underwater tarpaulins are pulled tightly over the hull like a curtain during mooring times to prevent organisms from settling on the hull. In the other principle, boats drive onto a sheet at the berth and thereby rub off the fouling. For both methods, no efficacy test by means of test plates is possible. The limit values must be provided on three ships. Control plates at the berth are prescribed as references for this.

No efficacy test needs to be provided for boat lifts, as the boats cannot become overgrown once they are lifted out of the water.

In WP 3 "initiation and coordination of the eco-label", potential label holders were contacted based on the market research in order to successfully establish the eco-label. The interests of the potential label holders and existing technical requirements, e.g. with regard to the necessary use of certain substances, were determined.

In WP 4, these requirements were presented to and discussed with potential label holders and experts from industry, authorities and environmental associations at a virtual stakeholder workshop on 15 June 2021 and at a virtual expert hearing on 8 September 2021.

Based on the participants' input, the award criteria were adapted and virtually presented to the RAL jury on December 7th and accepted without changes, so that a new Blue Angel product group "Underwater coatings and other anti-fouling systems" will appear in early 2022.

Outlook

The topic and the (further) development of new antifouling systems is a very dynamic process, with new publications appearing almost weekly. Consequently, not all developments could be awaited. Some processes were identified that should be given special consideration in a future revision of the award criteria, as there will probably have been new developments here by the time of the revision. The following topics were identified for this purpose:

- ▶ Nanotechnology according to the future state of science and technology
- ▶ Niche areas on ship hulls that could not be included in the scope so far, as standardised methods for assessing the efficacy of products in niche areas are still lacking
- ▶ Proof of efficacy with regular intermediate cleaning
- ▶ Statutory regulations of the requirements for stationary ship cleaning facilities and mobile ship cleaning equipment
- ▶ Product requirements under hazardous substances legislation compared to the hazard characteristics of CLP Regulation (EC) No 1272/2008
- ▶ Requirements for ultrasonic emissions from ultrasonic systems, e.g. with regard to frequencies, maximum sound pressure and sound duration (exposure, in order to limit or exclude noise pollution of aquatic fauna.

1 Einleitung

Antifoulingbeschichtungen können zu einem erheblichen Eintrag von Schadstoffen in die aquatische Umwelt beitragen. Eine Abgabe von Bioziden in die Umwelt wird bislang jedoch in Kauf genommen, um durch die Giftwirkung frühe Ansiedlungsstadien von Bewuchsorganismen zu töten, da diese den Reibungswiderstand der Schiffe erhöhen, was die Fahrtgeschwindigkeit mindert und den Treibstoffverbrauch erhöht (Schultz 2004; 2007). Nach derzeitiger Kenntnis sind rd. 75 % aller Antifoulinganstriche (AF) im Sportbootbereich und rd. 95 % aller Beschichtungen in der Berufsschifffahrt kupferbasiert (Daehne et al. 2017; Watermann & Eklund, 2019). Als zweite ökotoxisch bedeutsame Gruppe sind die Zinkoxid-Anstriche zu erwähnen, wobei Zinkoxid nicht als biozider Wirkstoff klassifiziert ist, sondern bei den erodierenden und selbstpolierenden Anstrichen die Polierate steuert.

Die Biozide werden von den Beschichtungen „planmäßig“ freigesetzt, indem sich die Matrix der Beschichtung durch Hydrolyse mit dem Meerwasser auflöst. Ein großer Anteil der Biozide wird aber auch unplanmäßig bei den Arbeiten in den Häfen und Werften freigesetzt – ein kleiner Anteil bei der Applikation, ein größerer bei dem Waschen und Entschichten der Schiffe. Es kommt somit zu Einträgen der Schadstoffe in die Gewässer und in die Böden der Hafengebiete (Eklund & Eklund 2014; Eklund et al. 2014).

Redeker et al. (2020) haben in einer Studie für das Umweltbundesamt Möglichkeiten zur Minimierung von Umweltrisiken durch Antifouling-Schiffsanstriche analysiert. In dem Projekt wurde auch ein Leitfaden entwickelt, der unter anderem über nicht-biozide Alternativen informiert (Setzer et al. 2019).

Mit der vorliegenden Studie sollten geeignete Vergabekriterien für ein neues Blauer Engel Umweltzeichen „Unterwasserbeschichtungen und andere Bewuchsschutzsysteme“ entwickelt werden. Die vorgeschlagenen Kriterien wurden im Austausch mit potenziellen Zeichennehmern, dem UBA, dem RAL und anderen Experten und Expertinnen erarbeitet und bei einem Fachgespräch, einer Expertenanhörung und in der Jury-Sitzung der RAL abgestimmt.

Mit der Implementierung des Umweltzeichen Blauer Engel soll die Bekanntheit und Akzeptanz von umweltfreundlicheren Alternativen auf dem Antifoulingmarkt verbessert und deren Marktanteil erhöht werden. Die umweltfreundlichen Produkte sollen mit dem Umweltzeichen Blauer Engel einen höheren Kauf- und Nutzungsanreiz bei den in der Regel sehr natur- und umweltverbundenen Seglern und Motorbootfahrern schaffen. Aber auch für umweltbewusste Schifffahrtslinien soll ein Anreiz geschaffen werden.

In einer vom UBA in Auftrag gegeben Machbarkeitsstudie (UFOPLAN-Nr. 201 95311/03) wurde bereits im Jahr 2004 ein Potential für den Blauen Engel erkannt, es fanden sich aber keine Herstellerfirmen, die bereit gewesen wären, einen Antrag zu stellen. Mittlerweile hat sich die Situation insofern geändert, dass mehr nicht-biozide AF-Anstriche und andere Alternativen auf dem Markt vorhanden sind und das Interesse von z. B. Reedereien für ein Umweltzeichen für nicht-biozide Antifoulingprodukte gestiegen ist. Der Nachweis von interessierten Zeichennehmern wird als sehr wichtig erachtet, um die Akzeptanz für die Auszeichnung von alternativen Antifoulingprodukten bei der Jury Umweltzeichen zu erreichen.

2 Kenntnisstand und Zielsetzung

Das Problem durch Bewuchs auf Schiffen ist so alt wie die Schifffahrt selbst. Schiffsrümpfe werden wie alle festen Oberflächen („Hartböden“) in aquatischen Lebensräumen über kurz oder lang von festsitzenden, pflanzlichen und tierischen Organismen besiedelt. Dies betrifft sowohl natürliche Hartböden (Felsen, Molluskenschalen, Treibholz) als auch künstliche Substrate (z. B. Schiffsrümpfe und wasserbauliche Anlagen aus Holz, Metall und Kunststoffen). Organismengesellschaften auf lebenden Substraten (z. B. Schneckengehäuse, Krebspanzer) bezeichnet man als Aufwuchs (Epibiose), auf nicht lebenden Substraten (z. B. Schiffsrümpfen) als Bewuchs (engl. Fouling).

Gab es früher nur die Möglichkeit zur mechanischen Reinigung wurde im Laufe der Jahrzehnte vieles auf die Schiffsrümpfe aufgetragen, um den unerwünschten Bewuchs zu verhindern. Die Wikinger nagelten Kupferplatten auf die Holzschiffe, im vorigen Jahrhundert wurden u. a. Arsen, DDT und Tributylzinn (TBT) eingesetzt. Letzteres löste ab den siebziger Jahren Kupfer als Hauptwirkstoff in den meisten Antifoulingbeschichtungen ab. Nach dem Verbot von TBT u. a. durch die Internationale Schifffahrtsorganisation (IMO) und die Verordnung EG 782/2003 wurde Kupfer zumeist als Kupferoxid ab 2003 erneut zum hauptsächlichen Wirkstoff in den Beschichtungen. Es gab aber noch eine Vielzahl von ca. 50 weiteren bioziden Wirkstoffen auf dem Markt, von denen ein Teil auch heute noch als Co-Biozide eingesetzt wird.

Diese hohe Anzahl wurde erst mit der Biozidprodukterichtlinie 98/8/EG, die später durch die Biozid-Verordnung (EU) Nr. 528/2012 (BPR) abgelöst wurde, reduziert. Die BPR schreibt eine Genehmigung von Altbioziden, aber auch von neuen bioziden Wirkstoffen und eine Zulassung der Biozidprodukte vor. Aufgrund der damit verbundenen Kosten wurden lediglich für zehn der Altbiozide Genehmigungsanträge gestellt und darüber hinaus für drei Neubiozide. Mittlerweile (Stand November 2021) sind zwei der Neubiozide und acht der Altbiozide genehmigt. Mit Irgarol/Cybutryn wurde eines der Altbiozide aufgrund der im Rahmen der Risikobewertung ermittelten unannehmbaren Risiken für die Umwelt nicht genehmigt. Für die Wirkstoffe Zinkpyrithion und freie Radikale aus dem Wasser oder der Luft liegen noch keine Entscheidung vor (s. a. <https://www.reach-clp-biozid-helpdesk.de/DE/Biozide/Wirkstoffe/Genehmigte-Wirkstoffe/Genehmigte-Wirkstoffe-0.html#PT21>).

Mit der Genehmigung dieser bislang zehn bioziden Antifouling-Wirkstoffe blieb und bleibt aber immer noch ein potenzielles Risiko für die Umwelt durch Anwendung der zugelassenen Antifoulingprodukte bestehen. Denn auch wenn die Umweltrisikobewertung im Rahmen der Produktzulassung akzeptable Risiken anzeigt, werden dennoch Biozide direkt in die Umwelt und Gewässer eingetragen. Und dort schädigen diese Biozide nicht nur die Organismen, die sich aufgrund ihrer sessilen Lebensweise potenziell auf einem Schiffsrumpf ansiedeln können, sondern auch alle anderen, so genannten Nicht-Zielorganismen, die in der Meeresumwelt leben. Das Biozidrecht fordert eine Berücksichtigung physikalischer, biologischer, chemischer und sonstiger Maßnahmen als Alternative oder zur Minimierung des Einsatzes von Biozid-Produkten (BPR Artikel 17 bzw. ChemG §12e). Um diesen Eintrag von Bioziden in die Umwelt zu minimieren, soll mit der vorliegenden Untersuchung der Einsatz von wirksamen nicht-bioziden Antifouling-Systemen gefördert werden. Diese Alternativen unterliegen jedoch derzeit keiner behördlichen Regulierung und Prüfung. Durch die Vergabe eines Umweltzeichens für die Produktgruppe „Nicht-biozide Antifoulingssysteme“ soll das Vertrauen der Anwender*innen in Hinblick auf die unabhängige Prüfung von Umweltverträglichkeit und Wirksamkeit dieser Alternativen gefördert werden.

In dem Vorhaben sollen Kriterien für die Vergabe von ein oder zwei Umweltzeichen für umweltfreundliche Antifouling-Produkte entwickelt werden. Die Definition quantitativer und qualitativer Kriterien für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und die Bewertung des

Auswaschverhaltens von möglicherweise gefährlichen Stoffen sowie deren Ökotoxizität sind als zentrale Punkte zu nennen. Hierbei ist zwischen alternativen Rumpfbeschichtungen, wie z. B. Antihafbeschichtungen auf Silikonbasis, amphiphilen Beschichtungen, hydrophilen Weichanstrichen, robusten Hartanstrichen sowie selbstklebenden Antihaf folien und anderen Bewuchsschutzsystemen wie z. B. mobilen Unterwasserplanen, Bootshebwerken oder chemisch/ physikalischen Systemen mit Ultraschall etc. zu unterscheiden. Die Kriterien sollen so formuliert sein, dass der Eintrag gefährlicher Stoffe in die Umwelt verhindert oder auf ein Minimum reduziert wird. Die Kriterienentwicklung erfolgt in engem Austausch mit potenziellen Zeichennehmern.

Gleichzeitig muss aber auch sichergestellt werden, dass die Produkte eine ausreichende Wirksamkeit und Haltbarkeit erzielen. Dies ist notwendig, um den eigentlichen Zweck des Bewuchsschutzes zur Erhaltung der Fahrtgeschwindigkeit und Manövrierfähigkeit eines Schiffes zu gewährleisten. Ein Bewuchsschutz muss auch mit allen Produkten des Blauen Engels gewährleistet sein, um eine Erhöhung des Reibungswiderstands und damit des Treibstoffverbrauchs und auch eine Verbreitung invasiver Arten zu verhindern.

3 Methodisches Vorgehen

Die vorliegende Studie war in vier Phasen aufgeteilt.

Im Arbeitspaket (AP) 1 wurde zunächst eine „Literatur- und Marktrecherche“ zu verfügbaren Alternativen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4 dargestellt.

Im AP 2 „Vergabekriterien“ wurden konkrete Prüf- und Bewertungskriterien zur Umweltzeichenvergabe erarbeitet. Hierbei wurde zwischen der Prüfung kritischer Inhaltsstoffe und den Wirksamkeitsnachweisen der Produkte unterschieden (Kap. 5).

Im AP 3 „Initiierung und Koordination des Umweltzeichens“ sind aufbauend auf der Marktrecherche potenzielle Zeichennehmer kontaktiert worden, um das Umweltzeichen erfolgreich zu etablieren. Hierbei wurden die Interessenlage der potenziellen Zeichennehmer und bestehende technische Anforderungen z. B. hinsichtlich der notwendigen Verwendung bestimmter Stoffe eruiert.

In AP 4 wurden diese Anforderungen auf einem virtuellen „Stakeholder-Workshop“ am 15. Juni 2021 und in einer ebenfalls virtuellen Expertenanhörung am 8. September 2021 den möglichen Zeichennehmer*innen sowie Expert*innen aus der Industrie sowie Behörden und Umweltverbänden vorgestellt und mit ihnen diskutiert. Basierend auf den Eingaben der Teilnehmer*innen wurden die Vergabekriterien angepasst und am 7. Dezember 2021 virtuell der RAL-Jury vorgestellt. Sie wurden ohne Änderungen akzeptiert, so dass Anfang 2022 eine neue Blauer Engel Produktgruppe „Unterwasserbeschichtungen und andere Bewuchsschutzsysteme“ erscheinen wird.

3.1 Literatur- und Marktrecherchen

3.1.1 Literaturrecherche

Es wurden mehrere gezielte Recherchen in der Literaturdatenbank Scopus (<https://www.scopus.com/>) zur Anwendung von Antifoulinganstrichen und deren Alternativen durchgeführt (zuletzt am 03.08.2020). Die Scopus-Datenbank enthält u. a. die Elsevier- Wiley- und Springer-Fachzeitschriften und die Pubmed-Datenbank. Allgemein gilt Scopus für die Naturwissenschaften und die biomedizinische Forschung als umfangreicher als das Web-of-Science ([Mongeon et al. 2016](#)). In der Recherche wurden die Stichworte „antifouling“ and „paints“ (rd. 50-100 Treffer pro Jahr) sowie „antifouling“ and „alternative“ (insgesamt 496 Treffer) oder auch „antifouling“ and „efficacy“ (insgesamt 290 Treffer) und „antifouling“ and „ultrasonic“ (insgesamt 61 Treffer) im Zeitraum von 2015 bis 2020 durchgesehen. Die ältere Literatur wurde bereits im Rahmen abgeschlossener Biozidprojekte ausgewertet ([Gartiser et al. 2018](#)). Zum Teil ergaben sich aus der aktuellen Recherche auch Hinweise auf andere relevante Arbeiten, die besorgt wurden. Weitere Recherchen wurden dann gezielt zu einzelnen Alternativen, wie „ultrasonic“, „silicon“ oder „polymer brushes“ durchgeführt. Die Literaturstudie wurde durch weitere Recherchen in Researchgate sowie Internetrecherchen ([Google](#), [Google Scholar](#)) ergänzt. Sofern sich in den Originalarbeiten Hinweise auf konkrete marktfähige Verfahren und Produkte ergaben, wurden die Autoren angeschrieben und um weitere Informationen gebeten.

3.1.2 Marktrecherche

Neben der theoretischen Literaturrecherche wurde auch auf die praktischen Kenntnisse des Marktes der Forschungsnehmer*innen zurückgegriffen und die Firmen kontaktiert, die an der Entwicklung nicht-biozider Bewuchsschutzlösungen arbeiten, dies aber noch nicht publiziert haben. Es handelt sich hierbei überwiegend um die Test- und Projektpartner der Firmen Dr. Brill + Partner und LimnoMar. Eine gute Grundlage bot auch die Liste „Biozidfreie Beschichtungen und Verfahren für den Bewuchsschutz“ auf der Homepage von LimnoMar. Darüber hinaus wurden Firmen kontaktiert, die von nationalen und internationalen Teilnahmen an Kongressen und Workshops (International Congress on Marine Corrosion and Fouling - ICMCF, European Coatings Show Conference - ECSC, Maritimes Cluster etc.) bekannt sind und es wurde die Messe BOOT in Düsseldorf besucht, allerdings ohne nennenswerte Ergebnisse. Um eine möglichst systematische Datenerfassung der beschriebenen Alternativen zu gewährleisten, wurde ein Fragebogen entwickelt und mit dem Umweltbundesamt abgestimmt. Hier wird zwischen Beschichtungsverfahren, z. B. Antihafbeschichtungen, Antihafthüllen, Faserbeschichtungen und -hüllen, reinigungsfähigen Hartbeschichtungen oder -materialien u. a. sowie technischen Alternativen, z. B. Reinigungsvorrichtungen am Liegeplatz, Bootswaschanlagen, Bootshebeanlagen, Ultraschallanlagen u. a. unterschieden. Die Informationen zur Wirkungsweise der Alternativen, dem Einsatzbereich, dem Wirksamkeitsnachweis, den Anwendungshinweisen, den verwendeten Materialien und Stoffen, der Gebrauchstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit, den Entsorgungshinweisen etc. wurden in Form einer Matrix steckbriefartig abgefragt. Im Anhang des Fragebogens ist auch eine Material- und Stoffliste zum Ankreuzen beigefügt, die im Zuge der Marktrecherche erweitert werden soll. Zum Teil wurde dieser Fragebogen zielgruppenspezifisch (z. B. für Hersteller von Ultraschallanlagen) angepasst.

Es wurden auch Forschungsrichtungen berücksichtigt, die sich mit der Entwicklung neuartiger Bewuchsschutzsysteme befassen, auch wenn noch keine marktreifen Produkte vorhanden waren. Es ging hierbei vielmehr darum, auch mögliche zukünftige Alternativen frühzeitig zu berücksichtigen.

Sämtliche Firmen, bei denen die Gewissheit oder die Möglichkeit bestand, dass sie eine umweltfreundliche Bewuchsschutzlösung für den deutschen Markt anbieten, wurden schriftlich und/oder telefonisch kontaktiert. Für den Fall, dass ein in Frage kommendes Produkt für den deutschen Markt vorhanden oder in der fortgeschrittenen Entwicklung ist, wurde der entwickelte Steckbrief zur Abfrage der relevanten Daten zugeschickt mit der Bitte um eine möglichst vollständige Antwort. Zudem wurden öffentlich zugängliche Informationen zu den Produkten (Merkmale, Sicherheitsdatenblätter) über Internetrecherchen zusammengetragen und ausgewertet.

4 Ergebnisse Literatur- und Marktrecherchen

4.1 Überblick

4.1.1 Literaturstudie

Insgesamt wurden rd. 120 Publikationen ausgewertet. Nicht weiter berücksichtigt wurden Arbeiten, die sich mit dem Monitoring von bioziden Wirkstoffen in z. B. Meerwasser, Häfen, Sedimenten oder auf Werften beschäftigen, ohne speziell auf alternative Verfahren einzugehen.

Einige Übersichtsartikel fassen die verschiedenen Antifoulingstrategien gut zusammen ([Yebara et al. 2004](#); [Gittens et al. 2013](#); [Lewis 2016](#); [Martins et al. 2018](#); [Leonardi et al. 2019](#); [Li & Ning 2019](#)).

Die zahlreichen Publikationen, die sich mit bioziden Lösungen befassen, werden hier nicht näher behandelt.

Viele Publikationen beschäftigen sich auch mit Naturstoffen vorwiegend aus marinen Organismen, die Fouling auf Oberflächen verhindern können. Hier befindet sich noch vieles im Entwicklungsstadium und Wirksamkeitsnachweise konkreter Produkte im Praxistest fehlen weitgehend. Von dieser Gruppe werden nur die nicht-bioziden Lösungen berücksichtigt, während Lösungen, die auf biogenen Bioziden beruhen, für den Blauen Engel nach derzeitigem Stand nicht in Frage kommen.

Ein großer Anteil der Arbeiten befasst sich mit Arbeiten zu Oberflächen mit physikalisch-chemischen Antifouling Eigenschaften mit Schwerpunkt auf nicht-bioziden Beschichtungen. Mit der Diskussion um das TBT-Verbot Ende des 20. Jahrhunderts begann die Entwicklung von Antihafbeschichtungen (Foul-Release Coatings, FRCs). Während zu Beginn auch die Eignung von Teflon noch untersucht wurde, konzentrierte sich die Forschung in den Folgejahren mehr in Richtung der Polydimethylsiloxane (PDMS), oder trivial ausgedrückt „Silikonbeschichtungen“ ([Swain & Schultz 1996](#); [Swain et al. 2000](#); [2001](#)).

Neben den Beschichtungen sind weitere Methoden wie Bootshebeanlagen, Reinigungsverfahren oder Ultraschall zu nennen, zu denen allerdings weit weniger wissenschaftliche Publikationen vorliegen (u. a. [Yebara et al. 2004](#); [Morrisey & Woods 2015](#); [Atalah et al. 2016](#)).

Zwölf Autoren wurden zusätzlich angeschrieben, um weitere Informationen zu erhalten. In fünf Antworten wurden teilweise Hinweise auf weitere Arbeiten und Publikationen gegeben, die Entwicklung marktfähiger Coatings hingegen weitgehend verneint. Neue Ansätze zu Polydimethylsiloxan-Beschichtungen haben noch keine Marktreife erzielt ([Akuzov et al. 2017](#)). Der Autor wies darauf hin, dass der Markt der Polydimethylsiloxan-Beschichtungen von wenigen Unternehmen (global player) dominiert wird und es sehr schwer sei, Neuentwicklungen auf den Markt zu bringen. Ein Autor ([Piazza et al. 2018](#)), der Wirksamkeitstests mit silikonbasierten Antifoulingbeschichtungen durchgeführt hat, teilte die Hersteller der getesteten Produkte mit (International Paint, Sinco Mec Kolor, Hempel und European Coatings). Eine Autorin, die sich mit dem Verhalten kovalent gebundener und damit theoretisch auswaschresistenter Biozide (Irgarol und Econeal) in einer Polyurethanmatrix beschäftigt, stellte weitergehende Informationen zur Verfügung ([Silva et al. 2019](#); [Ferreira et al. 2020](#)). In einer weiteren Antwort wurde auf die Vertraulichkeit der durchgeführten Forschungen verwiesen.

[Heine et al. \(2019\)](#) stellten ein systematisches Vorgehen bei der Bewertung von Alternativen vor, wie es in den USA angewendet wird. Ziel war die Prüfung geeigneter Alternativen zu den üblicherweise verwendeten Antifouling-Beschichtungen auf Kupferbasis. Hierbei wurden drei Hauptgruppen nicht-biozider Verfahren unterschieden: Beschichtungen (Epoxyde,

Wachspolymer, photoaktive Beschichtungen, keramische Beschichtungen, Silikone, Fluorpolymere), schallbasierte Systeme (Ultraschall > 20 Hz, Infraschall < 16 Hz) und mechanische Systeme (Bootstrailer, Reinigungsverfahren, Abdeckplanen). Der Vergleich erfolgte im Wesentlichen über die gefahrstoffrechtliche Einstufung der Inhaltsstoffe, neben separaten Abschätzungen der Exposition, der Wirksamkeit sowie der Verfügbarkeit und Kosten. Hierzu ist allerdings eine vollständige Angabe aller Inhaltsstoffe erforderlich. Die Ergebnisse wurden in einem ausführlichen Bericht dokumentiert (Anonym 2017), lassen sich jedoch nur bedingt auf die Europäischen Verhältnisse übertragen.

Die detaillierten Ergebnisse zur Literaturrecherche werden in den entsprechenden Unterkapiteln des Kapitels 4 zusammengefasst.

4.1.2 Marktrecherche

Bevor in Kapitel 4.2. die Ergebnisse der Recherchen für die einzelnen Beschichtungen und Verfahren vorgestellt werden, wird eine Übersicht der identifizierten und kontaktierten Firmen vorangestellt.

Insgesamt 100 Systeme wurden identifiziert, denen ein Potential für den Blauen Engel zugesprochen wurde. Den größten Anteil hatte erwartungsgemäß die Gruppe der Antihafbeschichtungen, gefolgt von Bootshebeanlagen und Reinigungsvorrichtungen am Liegeplatz (Tabelle 1).

Einige Hersteller wurden nicht kontaktiert, da weitere Recherchen ergaben, dass die Forschungen eingestellt worden waren. Von den 94 kontaktierten Firmen haben 51 eine Rückmeldung gegeben. Für 24 Produkte wurden ausgefüllte Steckbriefe eingereicht.

Tabelle 1: Resonanz auf die Marktrecherche, aufgeschlüsselt nach Produktart

Bewuchsschutzsystem	Anzahl ³	Kontaktiert	Rückmeldung	Steckbrief ausgefüllt
Antihafbeschichtungen	24	23	11	4
Antihafthfolien	5	5	4	1
Faserbeschichtungen	4	4	2	1
Hartbeschichtungen	11	10	8	1
Beschichtungen mit Naturstoffen	0	-	-	-
SPCs und erodierende Beschicht.	10	9	2	2
Weitere elektrische Verfahren	1	1	-	-
Reinigungsvorr. am Liegeplatz	11	11	9	4
Tauch- und Reinigungsfirmen	7	7	4	2
Stationäre Bootswaschanlagen	4	3	3	2
Bootshebeanlagen	12	12	-	-
Ultraschallanlagen	7	7	6	6
Unterwasserplanen	3	3	2	1

³ Einige neue Produkte wurden hier nach der Marktrecherche ergänzt, konnten aber aus zeitlichen Gründen nicht mehr in die Auswertung einbezogen werden.

Bewuchsschutzsystem	Anzahl ³	Kontak- tiert	Rückmeldung	Steckbrief ausgefüllt
Sonstige Verfahren	2	0	-	-
SUMMEN	101	95	51	24

4.2 Beschichtungen

4.2.1 Definition der Alternativen, in denen keine genehmigten Antifoulingbiozide enthalten sind

Das Ziel des Umweltzeichens ist es, über die Zertifizierung geeigneter Alternativen den Einsatz von bioziden Antifoulingprodukten der Produktart 21 zu reduzieren. Mit dem Begriff „Antifouling“ werden sowohl biozide wie auch nicht-biozide Beschichtungen mit einer Antifoulingwirkung bezeichnet. Die Verwendung der Bezeichnung „Biozidfreie Antifoulingbeschichtung“ wäre missverständlich, da viele Unterwasseranstriche – insbesondere solche auf Wasserbasis - Topfkonserverungsmittel (Produktart 6) zur Verbesserung der Haltbarkeit enthalten, also streng genommen nicht vollständig biozidfrei sind. Von daher sollte von bioziden oder nicht-bioziden Antifouling-Systemen oder Unterwasseranstrichen gesprochen werden. Um ein Produkt oder Verfahren als Alternative zu zertifizieren, sollte der Einsatz von Bioziden mit Ausnahme bestimmter Topfkonserverungsmittel grundsätzlich ausgeschlossen werden (vgl. 5.5.2). Dies betrifft neben der Produktart 21 auch Beschichtungsschutzmittel der Produktart 7, die z. B. in Farben und Lacken im Außenbereich eingesetzt werden oder auch Schutzmittel der Produktart 9 zur Haltbarmachung von Kunststoffprodukten, wie z. B. Unterwasserplanen.

Es sei darauf hingewiesen, dass in der Literaturrecherche einige Arbeiten gefunden wurden, die sich eher mit der Verminderung der Auswaschung von Bioziden durch Einkapselung befassten. [Wallström et al. \(2011\)](#) konnten durch Einbettung in eine Silikonmatrix den Biozidgehalt in Antifoulingbeschichtungen (hier Zinkpyrithion) bei gleicher Wirksamkeit um 70 % reduzieren. Dies wird auf das Quellen des Gels bei Wasserkontakt und die verzögerte Auswaschung zurückgeführt. [Silva et al. \(2019\)](#) beschreiben die Wirksamkeit und das Auswaschverhalten der Biozide Irgarol und Ecomea (Tralopyril), die kovalent an Schiffsanstrichen auf Polyurethan- und Silikonbasis gebunden wurden. Die Antifoulingwirkung der Anstriche wurde unter Praxisbedingungen bestätigt. Die Autoren gehen davon aus, dass die Biozide nicht ausgewaschen werden und belegen dies mit Ökotoxizitätstests. In der Arbeit von [Ferreira et al. \(2020\)](#) wurde das Leachingverhalten des Ecomea-Biozids aus PDMS-Beschichtungen in kovalent gebundener Form im Vergleich zur losen Einbindung in die Matrix untersucht und dabei eine 90-prozentige Reduktion der Auswaschung durch die kovalente Bindung, aber eben keine Nullemission bestimmt. Ähnliches gilt für Silikonverbindungen mit eingekapselten Bioziden wie Kupfer-Pyrithion. Es ist davon auszugehen, dass diese Biozide in den Produkten nicht enthalten wären, wenn nicht durch ihre biozide Wirkung eine Wirkungssteigerung erreicht werden soll. Daher ist ihre Eignung innerhalb der Geltungsbedingungen eines Blauen Engels vermutlich nicht gegeben. Aus Sicht einer Verminderung von Einträgen in die Umwelt ist dieses Konzept hingegen wert, näher betrachtet zu werden.

4.2.2 Antihafbeschichtungen

4.2.2.1 Wirkungsprinzip und Erfahrungen

Antihafbeschichtungen bestehen aus Oberflächen, die einfach ausgedrückt so glatt sind, dass anhaftende Organismen ab Fahrgeschwindigkeiten von 5-10 m/sec (10-20 Knoten) durch die Scherkräfte abgelöst werden. Zumeist basieren die Beschichtungen auf Polydimethylsiloxanen (PDMS), seltener auf silikon-fluorierten Polymeren. Zahlreiche Arbeiten beschäftigen sich mit der Entwicklung von Antifoulingbeschichtungen auf Basis von Siloxan-Derivaten ([Akuzov et al. 2017](#); [Barletta et al. 2018](#)). Zum Teil wird auch mit Nanopartikeln (Silizium, Magnetit) beschichteten Coatings experimentiert ([Boguslavsky et al. 2018](#); [Selim et al. 2018](#)).

[Watermann und Herlyn \(2020\)](#) unterscheiden bei den nicht erodierenden Foul-Release-Coatings (FRCs) solche auf Basis von PDMS-Polymeren (Polydimethylsiloxane) sowie PTFE-Polymer (Polytetrafluorethylen) und Derivaten (z. B. Markenname Teflon). Diese werden mit Polyurethanen oder Polystyrol-Blockpolymeren verbunden, um eine festere Konsistenz zu erreichen. Alle PDMS basierten Antihafbeschichtungen enthalten ausschwitzende Silikonöle, Paraffine oder Wollwaxse. Foul-Release-Coatings können chemisch gebundene oder ausschwitzende Polyethylenglykole als sogenannte Hydrogele mit einem sehr hohen Wasseranteil enthalten. Bei ausschwitzenden Polyethylenglykol-Formulierungen muss nach 1 bis 2 Jahren neu aufgetragen werden.

Einen guten Überblick über aktuelle Entwicklungstendenzen bei Silikonbeschichtungen geben [Hu et al. \(2020\)](#). Die häufigsten Silikonelastomere bestehen aus PDMS. Silikone weisen eine geringe Oberflächenenergie auf, die das Anhaften von Foulingorganismen erschwert. Auf der anderen Seite bewirkt die niedrige Oberflächenenergie aber auch, dass das Silikon schlecht auf dem Bootsumpf anhaftet. Daher muss zuvor eine Verbindungsschicht aus z. B. Polyurethanen oder Epoxidharzen aufgetragen werden, was den Aufwand erhöht. Es wurden auch vernetzte PU-Silikon oder Epoxid-Silikon-Coatings entwickelt, die besser an Oberflächen haften. Um die geringe mechanische Stabilität von Silikonbeschichtungen zu verbessern, wurde vorgeschlagen, Nanofüllstoffe (Nanofiller) wie Kohlenstoffnanoröhren, Graphenoxid oder Titandioxid zuzusetzen. Während Silikonbeschichtungen ein schlechtes Substrat für Hart-Antifouling-Organismen wie Muscheln und Schnecken darstellen, werden sie im Ruhezustand gut von Kieselalgen bewachsen. Daher werden teils Zwitterionen, amphiphile Verbindungen, quaternäre Verbindungen oder Biozide zugesetzt, um die Antifoulingwirkung zu verbessern. Um die geringe mechanische Stabilität von Silikonbeschichtungen auszugleichen, wurden auch „sich selbst reparierende Beschichtungen aus PDMS-Polyurea (ein autokatalytisches Polymer) entwickelt. Die Autoren verweisen auf Xerogel-Silikonbeschichtungen mit einstellbaren Oberflächeneigenschaften als umweltfreundliche und kostengünstige Beschichtung. (Xerogele sind durch Trocknungsprozesse hergestellte poröse Füllstoffe.) Diese werden z. B. durch Polykondensation verschiedener Alkylsiloxane wie n-Octyltriethoxysilane (C8) und Tetraethoxysilane (TEOS) hergestellt. Weiterhin befinden sich Silikonbeschichtungen in der Entwicklung, denen abbaubare Verbindungen wie Polycaprolaktam oder Polylaktid zugegeben werden, um hierdurch die Oberfläche zu „erneuern“. [Azemar et al. \(2020\)](#) beschreiben ein Copolymer, bestehend aus Polylaktid und PDMS als Grundmatrix. Die Ansiedlung der Organismen wird durch Erosion, die Freisetzung eingebundener Biozide sowie durch hydrophobe Oberflächen verringert. Dem Copolymer werden bioabbaubare Eigenschaften (bestimmt über Gel-Permeation-Chromatography) und eine signifikant verringerte Biozidfreisetzung zugeschrieben. Inwiefern die neu entwickelten Coatings bessere Umwelteigenschaften aufweisen, wird meist nicht geprüft. Einzelne Arbeiten weisen darauf hin, dass dies oftmals nicht der Fall ist ([Karlsson et al. 2004](#), [Löschau & Krätke 2005](#), [Piazza et al. 2018](#)).

Grundsätzlich ist bei allen Silikonverbindungen zunächst davon auszugehen, dass sie schlecht bis nicht biologisch abbaubar sind. [Grabitz et al. \(2020\)](#) untersuchten die abiotische und biologische Abbaubarkeit fünf aromatischer Organosilikonverbindungen, die aufgrund ihrer leicht abbaubaren Kernstruktur als umweltverträglich (benign by design) ausgelobt wurden. Die meisten Substanzen hydrolysierten innerhalb von 24 h zu 50 %, so dass dies als Hauptweg ihrer primären Elimination eingeschätzt wurde. Keine der Substanzen war im Closed Bottle Test OECD 301 D bzw. dem Respirometertest OECD 301 F abbaubar (0-8 % in 28 d) und es wurden 15 verschiedene Transformationsprodukte bestimmt.

[Yang et al. \(2014\)](#) geben einen sehr umfangreichen Überblick über Polymerbürsten und Beschichtungen mit Antifouling-Eigenschaften. Der Antifoulingeffekt wird hier ausschließlich durch die Materialeigenschaften der Oberflächen und nicht durch die Freisetzung von bioziden Wirkstoffen erreicht. Die Autoren beschreiben drei Strategien zur Verhinderung des marinen Biofouling: Verhinderung der Anhaftung von Foulingorganismen an den Oberflächen (Fouling-Resistenz), Verringern der Haftfestigkeit von Biofoulants (Fouling-Freisetzung) und Abbau/Abtöten der Foulingorganismen. Es werden vier verschiedene Funktionsweisen unterschieden:

- ▶ Haftvermittler und Anker für Polymerbürstenbeschichtungen: Hierunter fallen z. B. Epoxid-Primer und anorganische Koppler, die z. B. als dreischichtige Lagen aufgebracht werden sowie biomimetische Verfahren, bei denen Polymerbürsten z. B. mit einem Muschelzement auf der Oberfläche verankert werden.
- ▶ Schmutzabweisende Sol-gel coatings bestehen überwiegend aus hydrophilen Polymeren wie z. B. Polyethylenglycol (PEG), Hydrogelen, zwitterionischen Polymeren und Polysacchariden mit unterschiedlicher Kettenlänge, die einer Anlagerung von Foulingorganismen durch Hydratation entgegenwirken. Durch die Mischung von Organosilikon und anorganischen Silikon bildet sich ein poröses Gel, aus dem Alkohole und Wasser langsam abgegeben werden. Antifouling Coatings auf Basis von Poly(ethylenglycol) gelten als mechanisch nicht sehr gut belastbar, so dass keine Langzeitstabilität gegeben ist. Werden Schmiermittel in der Oberfläche des Coatings in poröse Substanzen eingebettet, spricht man von Slippery Lubricant-Infused Porous Surfaces (SLIPS). In diesen porösen Substanzen liegen die Schmiermittel geschützt vor und werden über die Zeit freigesetzt. Zudem sind sie einem oxidativen und mikrobiellen Abbau unterworfen. Aufgrund der mobilen Oberfläche werden sie nur schwer besiedelt ([Leonardi & Ober 2019](#)). Durch die Zugabe von Additiven in Polymere auf PDMS-Basis können die Eigenschaften sogenannter „modifizierter Elastomer-Netzwerke“ verändert werden. Die Zugabe von Silikonöl erhöht z. B. die Schlüpfrigkeit der Oberfläche und vermindert die Adhäsionskraft und verbessert damit die Möglichkeit des Fouling Release. Auf der anderen Seite erhöht sich dadurch die Hydrophobie und es verbessern sich die Bedingungen für das Aufwachsen eines Biofilms ([Leonardi & Ober 2019](#)).
- ▶ Fouling-Release Polymere auf Basis von Fluorpolymeren und Polydimethylsiloxan-Elastomeren weisen eine sehr glatte Oberfläche auf und minimieren die Haftung zwischen den Organismen und den Materialoberflächen, so dass sich der Bewuchs z. B. durch die während der Fahrt auftretenden Reibungskräfte ablöst.

Bedingt durch die auch im Vergleich zu Silikonverbindungen sehr niedrige Oberflächenenergie und die oberflächenhydrophoben Eigenschaften verstärken organische

Fluorpolymere den „fouling release“ Effekt. Die Fluoridkomponenten können durch Blockpolymerisation, radikalische Copolymerisation oder Vernetzung in die Polymerstruktur eingebracht werden (Han et al. 2021).

Weder die Fluoropolymere noch die Polydimethylsiloxane sollen im Gebrauch freigesetzt werden. Durch die mechanischen Beanspruchungen in der Schifffahrt kann aber Abrieb der Beschichtungen bei Anlegemanövern, Schlepperkontakt, Grundberührung oder Eisgang stattfinden und diese persistenten Stoffe können in die Meeresumwelt gelangen. Eine Auswahl marktgängiger Antihafbeschichtungen findet sich unter <https://www.coating.de/fouling-release/>.

- Antimikrobielle Polymere: Fouling-abbauende bzw. abtötende Beschichtungen bestehen aus polykationischen Polymeren, die marines Biofouling aufgrund ihrer bakteriziden Eigenschaften begrenzen. Aufgrund der bakteriziden Eigenschaften würde es sich bei solchen Verbindungen aber auch um Biozide der Produktart 21 handeln.

Die Marktrelevanz weiterer von Gittens et al. (2013) beschriebenen Coatings ist bislang unklar: Dazu gehören sogenannte zwitterionische Oberflächen aus Polymeren (z. B. Polysulfobetain-Methacrylate), die kationische und anionische Gruppen enthalten, dadurch ungeladen sind und somit die Adsorption von Polymeren erschweren. Eine weitere Gruppe sind sogenannte amphiphile Oberflächen, die im Nanobereich hydrophobe und hydrophile Gruppen enthalten und damit zu verringertem Fouling führen. Eine andere Strategie besteht aus anorganischen / organischen Hybridpolymeren, die durch Hydrolyse und Kondensation von Metallalkoxiden und Organoalkoxysilanen hergestellt werden (Gittens et al. 2013). Zecher et al. (2018) untersuchten die Effizienz von drei neuentwickelten amphiphilen, nicht-toxischen Antifoulingcoatings in Mikrokosmen sowie im Feldversuch im Vergleich zu kommerziellen Produkten. Hierbei wurde insgesamt eine bessere Performance der amphiphilen Coatings festgestellt. Die Produkte wurden von der Evonik Resource Efficiency GmbH entwickelt. Um auszuschließen, dass die Antifouling-Wirkung durch auswaschbare Substanzen hervorgerufen wird, wurden zudem Ökotoxizitätstests mit biolumineszierenden Bakterien (*Alteromonas macleodi*) und Diatomeen (*Phaeodactylum tricornutum*) durchgeführt. Bei den amphiphilen Coatings wurden keine cytotoxischen oder wachstumshemmenden Effekte in den Eluaten bestimmt.

Polymerbürsten sind langkettige (Co)polymere, die mit einem Ende an der Oberfläche haften und in einer so hohen Dichte vorliegen, dass sich die einzelnen Polymerketten von der Oberfläche weg strecken müssen (Milner et al. 1991; <https://de.wikipedia.org/wiki/Polymerbürste>, Zugriffsdatum 7.3.2020).

So verhindern an der Oberfläche angebrachte langkettige Polymere auf Basis von Meta-Acrylaten das Anhaften von Organismen. Teilweise wird Chitosan als natürliches antibakterielles Polymer zugegeben (Gittens et al. 2013). Bislang ist Chitosan nicht im Reviewverfahren der BPR, dem Prüfprogramm zur Bewertung von Biozidwirkstoffen, berücksichtigt.

Yang et al. (2014) geben einen Überblick über die Anwendung von Polymerbürsten im Antifoulingbereich mit und ohne Zusatz von Bioziden, von denen sich die meisten aber noch im Entwicklungsstadium befinden. Die Autoren weisen auch auf die großen Herausforderungen bei der Entwicklung marktreifer kommerzieller Antifouling-Polymerbeschichtungen in Hinblick auf deren Langzeitstabilität und Haltbarkeit unter marinen Bedingungen sowie auf die unterschiedlichen Haftmechanismen der Foulingorganismen hin.

4.2.2.2 Marktrecherche

Vierundzwanzig Produkte von 19 Herstellern erschienen als potentiell geeignet für den Blauen Engel. Alle Hersteller wurden kontaktiert, vier haben einen Steckbrief gesendet, zwei weitere waren interessiert. Von den großen Herstellern hat einzig PPG einen Steckbrief eingereicht. Keine Rückmeldungen gab es von den großen Herstellern Chugoku, International Farbenwerke, Hempel und Jotun. Steckbriefe wurden auch gesendet von it coating GmbH und SeaCoat Technology. Microdomes hat einen Steckbrief eingereicht, obwohl das Produkt noch nicht marktreif ist. Darüber hinaus haben sich PropGlide Europe, deren Propellerantifouling allerdings PTFE enthält, und Nanocyl, die allerdings Carbon-Nano-Tubes verwenden, interessiert gezeigt, aber keinen Steckbrief abgegeben (Tabelle 2).

Tabelle 2: Anbieter von Antihaftbeschichtung

Hersteller	Produkt	Anwendung	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
Aquamarine UK	Aquacote	Prof. & Freizeit	-	nein (Firma inaktiv)
BYK-Chemie GmbH	Additive	Prof. & Freizeit	http://www.byk.com	nein
Chugoku Paints P.V.	Bioclean	Prof.	http://www.cmp.co.jp	nein
Ekmarine Paint AB	Neptune Formula	Freizeit	http://www.ekomarine.se	nein
Evonik Ressource Efficiency GmbH	Bindemittel	Prof. & Freizeit	https://corporate.evonik.de	nein
Hempel GmbH	SilicOne	Freizeit	http://www.hempel.de	nein
Hempel GmbH	Eco Power Racing	Prof.	http://www.hempel.de	nein
Hempel GmbH	Hempasil X3	Prof.	http://www.hempel.de	nein
Hempel GmbH	Hempasil X5	Prof.	http://www.hempel.de	nein
Hempel GmbH	Hempaspeed ⁴	Prof. & Freizeit	http://www.hempel.de	nein
International (AkzoNobel) Farbenwerke GmbH	Intersleek	Prof.	http://www.akzonobel.com	nein
International (AkzoNobel) Farbenwerke GmbH	VC 17 m biozidfrei	Freizeit	http://www.akzonobel.com	nein, nicht auf dem dt. Markt erhältlich
it Coating GmbH	it BoatProtect	Freizeit	http://www.itcoating.de	ja
Janssen PMP	ECONEA	Prof. & Freizeit	http://www.janssenpmp.com	nein (biozid)
Vires S.r.l.	OceanSpeed	Prof. & Freizeit	http://www.vires.it	nein
MAReCOAT	MAReCOAT	Freizeit	https://marecoat.jimdosite.com	nein

⁴ Neues Produkt wurde nach dem Ende der Marktrecherche ergänzt. Der Hersteller konnten aber aus zeitlichen Gründen nicht mehr kontaktiert werden.

Hersteller	Produkt	Anwendung	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
Microdomes (Universität Paderborn)	NN	Prof. & Freizeit	http://www.uni-paderborn.de	Ja, marktreifes Produkt ab 2024
Nanocyl	NC7000 (Carbon Nanotube Powder)	Prof. & Freizeit	http://www.nanocyl.com	nein
NanoPhos A.E.	SeaKing Fouling Release	Prof.	http://nanophos.com	nein
NIPPON PAINT MARINE (EUROPE) GMBH	Ecolosilk	Prof.	http://www.nipponpaint-marine.com	nein, nicht auf dem dt. Markt erhältlich
Oceanmax	Propspeed	Prof. & Freizeit	https://oceanmax.com	nein
PPG Coatings	SigmaGlide	Prof.	http://www.sigmacoatings.de	ja
PropGlide Europe	Propeller-Antifouling	Prof. & Freizeit	http://www.propglide.com	nein
SeaCoat Technology, LLC	Sea Speed V 10X	Prof. & Freizeit	http://www.seacoat.com	ja

4.2.3 Antihafthfolien

4.2.3.1 Wirkungsprinzip und Erfahrungen

Antihafthfolien haben ein sehr ähnliches Wirkprinzip wie die im vorherigen Kapitel beschriebenen Antihafthbeschichtungen auf Silikonbasis, aber wie der Name schon verdeutlicht, ein anderes Applikationsverfahren. Sie werden als selbstklebende Folien in Bahnen auf den Schiffsrumpf geklebt.

Auslöser für diese Überlegung war die Umgehung des komplizierten Applikationsverfahrens von Silikonbeschichtungen, die einen Antihafteffekt an der Außenseite erzeugen, aber auf der innenliegenden Seite am Rumpf haften müssen. Diese Quadratur eines Kreises haben die Hersteller von Antihafthbeschichtungen mittlerweile durch die Verwendung einer haftungsvermittelnden Zwischenschicht, dem so genannten TieCoat gelöst. Es ist allerdings bei den meisten Produkten nicht nur ein zusätzlicher Anstrich nötig, sondern es müssen bei drei Schichten (Primer, TieCoat, TopCoat) auch noch genau die Überstreichintervalle in Abhängigkeit von der Temperatur beachtet werden. Dies macht die Anwendung schwierig besonders unter den gegebenen Umständen sowohl bei Sportbooten als auch in der professionellen Schifffahrt. Sportboote werden in der Regel im Frühjahr gestrichen, wenn die Temperaturen im Tagesverlauf besonders an der Küste zumeist noch unter 10° Celsius liegen. Ähnlich verhält es sich in der Küstenschifffahrt, die zumeist ebenfalls im Frühjahr zur jährlichen Überholung ins Trockendock kommt. In der Großschifffahrt wird wenig Rücksicht auf die Jahreszeit genommen, so dass es dort auch zu Applikationen im Winter kommen kann oder die Applikation regelmäßig in Asien erfolgt. Bei der professionellen Schifffahrt spielt zusätzlich auch der Kostenfaktor von mindestens einem zusätzlichen Tag im Trockendock eine gewichtige Rolle.

Bei Antihafffolien ist als Untergrund lediglich ein intakter Primer als Wassersperrschicht von Nöten, auf den dann die Folie geklebt wird. Das spart mindestens drei Anstriche (1 x TieCoat, 2 x TopCoat). Aber die Beklebung eines Schiffsrumpfes ist nicht trivial, da die Untergründe besonders bei älteren Schiffen sehr uneben und die Rumpfformen sehr unterschiedlich sein können. Motorboote mit Kimmstringern am Rumpf sind sehr verwinkelt, Segelboote haben unterschiedliche Kielvarianten, größere Schiffe haben am Rumpf Seekästen, Stabilisatoren, Schlingerkiele, Anoden etc.

Unabhängig vom Schiffsrumpf tritt bei Folien das Problem der Nahtstellen auf. Dieses lösen die Hersteller, indem Sie die Nähte mit speziellem Flüssigsilikon versiegeln.

Aufgrund dieser speziellen Anforderungen an die Applikation werden Antihafffolien derzeit noch nicht für den Do-it-yourself Bereich angeboten, was den potenziellen Kundenkreis deutlich verkleinert.

Die applizierte Folie besteht je nach Hersteller aus stabilem PE oder PVC und hat einen Silikonbelag als Auflage. Das beinhaltet einen Vorteil gegenüber Anstrichen mit Silikon, die sehr weich sind und daher anfällig gegenüber mechanischen Einflüssen, die in der Schifffahrt durch Anlegemanöver, Ankerketten, Grundberührungen, Eisgang, Schlepper- oder Fenderkontakt an der Tagesordnung sind. All diese Einflüsse können zu Kratzern in den konventionellen Silikonbeschichtungen führen, die dann bewachsen werden, weil die physikalischen Oberflächeneigenschaften zum Schutz nicht mehr gegeben sind. Bei den Folien ist der Silikonbelag nicht fest verbunden und kann bei Kratzern wieder „zusammenfließen“. Dies lässt bis zu einem gewissen Maß eine Selbstheilung zu.

4.2.3.2 Marktrecherche

Von den fünf kontaktierten Herstellern der Antihafffolien hat nur die Firma mactac einen Steckbrief eingereicht (Tabelle 3). Die Firma mactac verwendet Folien aus Polypropylen. Zur Wirksamkeit liegen keine eigenen Erfahrungen vor. Cetelon befindet sich noch in der Entwicklungsphase, war aber durchaus interessiert.

Die japanische Firma Nitto Denko hat die Entwicklung eingestellt.

Die deutsche Firma Renolit prüft, ob sie die Entwicklung der Folie DOLPHIN S weiterführen kann. Dies ist bedauerlich, da sich das Produkt in Versuchen bei Dr. Brill und Partner seit 2015 als sehr wirksam erwiesen hat. Bei DOLPHIN S handelte es sich allerdings um eine PVC-Folie mit einer Fluoropolymer-Auflage. Nach Auskunft des Herstellers soll diese Auflage aber durch eine andere Auflage ersetzt werden. Ein weiteres Problem ist das Folienmaterial aus PVC, das für den Blauen Engel nicht akzeptabel ist und substituiert werden müsste (s. Kap. 5.6.2).

Tabelle 3: Anbieter von Antihafffolien

Hersteller	Produkt	Anwendung	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
Cetelon Nanotechnik GmbH	Noch kein marktreifes Produkt	Prof. & Freizeit	https://www.cetelon-nanotechnik.de	nein, noch kein marktr. Produkt
mactac Deutschland GmbH	MacGlide	Prof. & Freizeit	http://www.mactacgraphics.eu	Ja
Nitto Denko	Marine Glide	Prof. & Freizeit	https://www.nitto.com	nein, Entw. eingestellt

Hersteller	Produkt	Anwendung	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
Renolit SE	DOLPHIN S	Prof. & Freizeit	http://www.renolit.com	nein
Uniflow Marine SAS	FLOW Silikon	Freizeit	http://www.uniflow-marine.com	nein

4.2.4 Faserbeschichtungen

4.2.4.1 Wirkungsprinzipien und Erfahrungen

Faserbeschichtungen wurden erstmals um die Jahrtausendwende von der griechischen Firma SealCoat entwickelt und getestet. Zu Beginn wurden die Fasern in den Werften appliziert, indem die Fasern elektrostatisch geladen auf einen frisch aufgetragenen Epoxid-Anstrich gesprüht wurden und sich dabei durch die Ladung senkrecht aufstellten. Da diese Methode bei Freiluftanwendung in mitteleuropäischen Werften stark abhängig von der Witterung bei Wind und/oder Niederschlag zu großen Problemen führte, wurde dem Hersteller vorgeschlagen, die Fasern unter kontrollierten Hallenbedingungen auf Folien aufzutragen, die dann auf den Rumpf geklebt werden ([Watermann et al. 2003](#)). Der Hersteller experimentierte in den Folgejahren mit unterschiedlichen Kunstfasermaterialien, -längen und -stärken, wobei mit Fasern aus Polyamid und einer Länge von 1,3- 1,8 mm die beste Wirksamkeit erreicht wurde. Für den Einsatz auf Schiffsrümpfen stellte sich aber schnell die Frage nach einer Verstärkung des Reibungswiderstands allein schon durch die Fasern. Der Hersteller ließ Messungen durchführen, hat die Zahlen aber nie veröffentlicht. Es wurden aber Versuche durchgeführt, die Fasern nicht senkrecht abstehen zu lassen, sondern um 45° geneigt in Anströmungsrichtung, um den Widerstand zu verringern. Mikroskopische Untersuchungen von LimnoMar haben gezeigt, dass dies nicht gelungen ist.

Nach einigen Jahren Unterbrechung war es dann Rik Breur, der zunächst unter dem Namen Micanti, heute unter dem Namen Finsulate, ein System mit zumeist längeren Kunstfasern vertreibt. In eigenen Tests mit rotierenden Platten im Strömungskanal und im Schlepptank kommt [Breur \(2017\)](#) zu der Schlussfolgerung, dass beflockte Oberflächen den Kraftstoffverbrauch reduzieren können.

Ein neuer Ansatz mit Fasern aus dem Naturstoff Basalt wurde im BMWi-Projekt *BasaltFaserFlock* untersucht. Basalt war zu Beginn des Jahrtausends bereits als Gewebe auf die Antifoulingseigenschaften untersucht worden und wurde nun so präpariert, dass etwa 1 mm lange Fasern auf einen frischen Epoxid-Untergrund geflockt werden konnten. Technisch gelang die Applikation sowohl auf Platten als auch auf Fahrwassertonnen ([Zschätzsch 2018](#)).

Die Wirkung der Naturfasern ist vergleichbar mit denen der Kunstfasern. Alle können eine Besiedlung mit Seepocken fast vollständig verhindern, sofern die Faserdichte ausreichend ist. Aber alle, inklusive Micanti/Finsulate, wurden in Versuchen vor Norderney von anderen Organismengruppen wie Seescheiden, Muscheln und Algen stark besiedelt. Hinzu kommt, dass im Basalt-Projekt Messungen des Reibungswiderstands der unbewachsenen Faserfläche an der unabhängigen Schiffbau-Versuchsanstalt in Potsdam durchgeführt wurden. Das Ergebnis war eine deutliche Erhöhung des Reibungswiderstands. [Daehne et al. \(2020\)](#) kommen somit zu dem Ergebnis, dass Basaltfaserflock wie auch Kunstfasern für statische Objekte geeignet sein können, sofern Seepocken das Hauptproblem darstellen, für Schiffe halten die Autoren jedoch die Naturfasern genauso ungeeignet wie Kunstfasern.

4.2.4.2 Marktrecherche

Nachdem die Firma Sealcoat nicht mehr am Markt ist und die französische Firma Uniflow Marine SAS keine Unterlagen eingereicht hat, ist Finsulate der bislang einzige interessierte Hersteller von Faserbeschichtungen, der einen Steckbrief eingereicht hat.

Tabelle 4: Anbieter von Faserbeschichtungen

Hersteller	Produkt	Anwendung	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
EBF Dresden	NN	Prof. & Freiz.	http://www.ebf-dresden.com	nein, noch kein marktr. Produkt
Finsulate	Seagrade	Prof. & Freiz.	http://www.finsulate.com	ja
Uniflow Marine SAS	FLOW Fouling	Freizeit	http://www.uniflow-marine.com	nein
Uniflow Marine SAS	FLOW Fouling Fix	Stat. Objekte	http://www.uniflow-marine.com	nein

Die Faserfolie von Finsulate besteht nach Herstellerangaben aus Polyamide 6.6 (CAS 32131-17-2) mit einem Acrylatkleber und einem Polyesterfilm. Das Fasermaterial ist Nylon (Polyamid). Es existieren diverse Produktvarianten für alle Bootstypen sowie andere Objekte, die potenziell marinem Bewuchs ausgesetzt sind (z. B. Hausboote, schwimmende Plattformen oder Fundamente von Offshore-Turbinen).

4.2.5 Hartbeschichtungen

4.2.5.1 Wirkungsprinzip und Erfahrungen

Um die Jahrtausendwende geriet mit den Diskussionen um ein TBT-Verbot auch die Idee robuster Hartbeschichtungen in Verbindung mit Reinigungstechnologien zunächst vereinzelt in den Fokus der Beschichtungsentwicklungen. In Forschungsprojekten der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) wurden dann ab 2012 systematischer geeignete Beschichtungen und Reinigungstechnologien für Sportboote untersucht ([Daehne et al. 2014](#); [Watermann et al. 2016](#)). Jüngst untersuchten [Watermann et al. \(2019\)](#), insbesondere auch vor dem Hintergrund der Debatte um den Eintrag von Mikroplastik, die Auswirkungen von reinigungsfähigen, abriebfesten Hartbeschichtungen auf die Umwelt. Diese bestehen aus mechanisch beständigen und damit auch leicht zu reinigenden glasfaserverstärkten Epoxidharzen bzw. Epoxid/Silikon Hybriden. Die Siloxane sind chemisch in die Epoxidschicht eingebunden, auswaschbare Silikonöle werden nicht verwendet. Durch eine nicht-biozide Hartbeschichtung wird der Eintrag von Bioziden vollständig unterbunden und auch der Eintrag von Polymeren und damit von Mikroplastik liegt mit 5 % des aufgetragenen Coatings deutlich unter dem anderer Beschichtungstypen. Zum Vergleich: Von selbstpolierenden Beschichtungen werden etwa 70-80 % der ursprünglich aufgetragenen Menge freigesetzt. Bislang liegen wenige Daten zur Haltbarkeit von Hartbeschichtungen vor, aber es ist davon auszugehen, dass diese im Vergleich zu anderen Beschichtungstypen gut ist, so dass auch der Aufwand für Wartung und Neuanstrich reduziert ist.

Ein Hersteller prüft derzeit die Eignung von reinigungsfähigen Folien. Hier wäre das Folienmaterial im Hinblick auf möglichen Abrieb zu prüfen.

4.2.5.2 Marktrecherche

Es wurden 11 Hersteller kontaktiert, die ihre Produkte zum Teil schon auf dem Markt anbieten, sich zum Teil aber noch in der Entwicklungsphase befinden. Nur die belgische Firma Subsea Industries hat für das Produkt Ecospeed einen Steckbrief eingereicht. Subsea Industries ist eigentlich eine Tauchfirma, die die Hartbeschichtung Ecospeed entwickelt hat, um Unterwasserreinigungen von Schiffsrümpfen durchführen zu dürfen.

Tabelle 5: Anbieter von Hartbeschichtungen

Hersteller	Produkt	Anwendung	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
Brunel Marine Coating Ltd.	EnviroMarine	Prof.	https://brunelmc.com	nein
Ceramic Polymer GmbH	CeRam-Kote	Prof.	https://www.ceramic-polymer.de/	nein, nicht kontaktiert, enthält BPA
Hullspeed Performance Marine Coatings	Smart Armor	Freizeit	http://www.hullspeed.us	nein
ICT GmbH	Produkt in Entw., noch nicht marktr.	Freizeit	https://ict-rhine.com	nein
Jotun GmbH	Seaquest	Prof.	http://www.jotun.com	nein
Jotun GmbH	SeaQuantum Skate	Prof.	http://www.jotun.com	nein
PerlaTech GmbH & Co.KG	Produkt in Entw., noch nicht marktr.	Prof. & Freizeit	https://perlatech.com	nein
Renolit	Produkt in Entw., noch nicht marktr.	Prof. & Freizeit	http://www.renolit.com	nein
Röchling Engineering Plastics SE & Co.KG	Produkt in Entw., noch nicht marktr.	Freizeit	http://www.roechling.com	nein
Subsea Industries MV	Ecospeed	Prof.	https://hydrex.be	Ja
Bajo Coatings	Overdrive	Freizeit	http://www.wohlert-lackfabrik.de	nein

Zum Aufbau der Beschichtungen liegen wenige konkrete Informationen vor:

Ecospeed besteht nach Herstellerangaben aus einem durch Glasplättchen verstärkten Vinylesterharz. Im Sicherheitsdatenblatt wird als eine der kennzeichnungspflichtigen Hauptkomponenten Styrol (CAS 100-42-5) angegeben, das in Konzentrationen < 40 % als Lösungsmittel eingesetzt wird. Allgemein werden Vinylester durch Veresterung von Epoxidharzen mit Acrylsäure oder Methacrylsäure hergestellt. Als Epoxide wird meist Bisphenol-A-diglycidylether verwendet. Typisch ist die Umsetzung von Bisphenol A mit Epichlorhydrin zum Epoxid und die anschließende Veresterung mit Acrylsäure.⁵

⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Vinylesterharze> (Zugriff am 03.09.2020)

OVERDRIVE ist nach Herstellerangaben eine zweikomponentige Polysiloxan-haltige amphiphile Antifoulingbeschichtung. Das Produkt wird damit beworben, dass 97 % der festen Inhaltsstoffe chemisch gebunden sind, so dass keine Erosionen, kein Ausschwitzen oder nennenswerte Abgabe von Mikro- oder Nanopartikeln in die Umwelt erfolgt.

Für den professionellen Markt ist ein vergleichbares Zweikomponenten-Produkt namens CeRam-Kote auf Basis von Bisphenol A-Epichlorohydrinharzen erhältlich. Die Härte wird durch Aluminiumoxid (30-60 %) eingestellt. Der Härter besteht aus Diethylentriamin (CAS 111-40-0, Konzentrationsbereich 30-60 %) und Bisphenol A (CAS 80-05-7, Konzentrationsbereich 13-30 %).⁶ Bisphenol A ist als reproduktionstoxischer Stoff (Repr. 1B, H360F) eingestuft und hat zudem eine endokrine Wirkung, so dass es in die SVHC Kandidatenliste aufgenommen wurde.⁷ Allgemein gehören Epoxidharze zu den Kunstharzen, die Epoxidgruppen tragen. Es handelt sich um Reaktionsharze, die mit einem Härter und gegebenenfalls weiteren Zusatzstoffen zu einem duroplastischen Kunststoff umgesetzt werden. Etwa 75 % aller weltweit verwendeten Epoxidharze basieren auf Bisphenol A., das mit Epichlorhydrin zu Bisphenol-A-Diglycidylether umgesetzt wird.⁸

4.2.6 Beschichtungen mit Naturstoffen

4.2.6.1 Wirkungsprinzipien und Erfahrungen

Aufwuchsorganismen haben im Laufe der Evolution zwei wichtige Strategien entwickelt, die ihnen ihre sessile Lebensform ermöglichen: Die Anhaftung an einen festen Untergrund mittels unterschiedlicher Techniken und die Reduzierung oder Verlangsamung der Besiedlung des eigenen Körpers durch andere Organismen. Letztere würde den Zugang zum freien Wasser und damit das lebensnotwendige Filtrieren erschweren. Es ist eine naheliegende Überlegung, diese natürlichen Strategien der Aufwuchsvermeidung technisch zu kopieren.

Kirschner & Brennan (2012) haben diesen Forschungszweig in ihrem Review in zwei Bereiche unterteilt: Bio-inspirierte Techniken, die eine chemische Strategie verfolgen und solche, die auf physikalischen Überlegungen basieren.

Die chemisch basierten Mechanismen zur Bewuchsvermeidung beruhen auf der Identifikation und chemischen Kopie von biogenen Bioziden, die von den Organismen nur bei Bedarf produziert werden und zumeist schnell abbaubar sind. Ein besonderes Augenmerk richtete sich auf Schwämme und Korallen, die mit einer Vielzahl von Mikroorganismen vergesellschaftet sind, die Metaboliten mit Antifouling-Wirkung freisetzen. Weitere untersuchte Organismengruppen mit Antifoulingaktivität sind Seescheiden (Ascidiae), Seetang (benthische Makroalgen, mehrere Gruppen), Seegräser (Zostera) und Moostierchen (Bryozoen). In einem Review-Artikel von Satheesh et al. (2016) werden verschiedene Mikroorganismen beschrieben, die von Oberflächen dieser Organismen isoliert wurden und die eine antimikrobielle bzw. bewuchsmindernde Wirkung zeigten. Es zeigt sich, dass eine bessere Kenntnis der Anheftungsstrategien von Bewuchs bildenden Organismen und die den Aufwuchs mindernden Gegenmaßnahmen anderer Organismen für eine Optimierung von Antifoulingkonzepten genutzt werden kann (Almeida et al. 2015).

So werden beispielsweise immobilisierte (kovalent gebundene) Enzyme (z. B. Lysozym) als Additive in die Polymermatrix von Antifouling-Anstrichen eingebracht. Dieses Verfahren kann auch mit Polymerbürsten gekoppelt werden. Schwämme verhindern Biofouling an ihren Oberflächen durch bakterielle Biofilme, aus denen sich bioaktive Substanzen gewinnen lassen,

⁶ <https://ceram-kote.com/about/> (Zugriff am 03.09.2020)

⁷ <https://echa.europa.eu/de/substance-information/-/substanceinfo/100.001.133> (Zugriff am 03.09.2020)

⁸ <https://de.wikipedia.org/wiki/Epoxidharz> (Zugriff am 03.09.2020)

die eine Antifoulingwirkung haben. Eine ähnliche Wirkung wird auch für bestimmte Algen beschrieben, die z. B. antimikrobielle Substanzen freisetzen. Biofilme lassen sich durch bestimmte Exopolysaccharide, die von Bakterien wie z. B. *Alteromonas* gebildet werden, verhindern. Da keine biozide Wirkung vorliegt, wird vermutet, dass diese Biopolymere durch sterische Hinderung die Anhaftung von Mikroorganismen verhindern (Guezennec et al. 2012). Ähnlich wie bei der mikrobiell induzierten Korrosion gibt es auch Mikroorganismen wie *E. coli* und verschiedene Stämme von *Bacillus sp.* und *Pseudomonas fragi*, die die Korrosion von Materialien reduzieren, indem sie andere Bakterien, wie z. B. Sulfat reduzierende Bakterien, verdrängen.

Das Naturprodukt Capsaicin, Inhaltsstoff in Chilischoten, gilt als ein vielversprechendes Additiv mit Antifoulingwirkung (Wang et al. 2014). Auch andere Naturstoffe wie Tannin (Peres et al. 2015) oder Extrakte von marinen Schwämmen (Acevedo et al. 2013) haben Antifouling-eigenschaften.

Feng et al. (2019) untersuchten die Antifouling-eigenschaften von Indolen, die als Sekundärmetaboliten mariner Organismen gute Antifouling-Eigenschaften aufweisen. Es wurden sieben Indolderivate synthetisiert, in die Beschichtungen (die allerdings auch 25 % Kupferoxid enthielten) eingebracht, auf PVC-Platten verstrichen und dann einem Praxistest im Hafen Qingdao (China) unterzogen. Hierbei wurde eine bessere Antifoulingwirkung als bei dem Vergleichsprodukt mit Kupferpyrithion festgestellt.

Neves et al. (2020) untersuchten die Antifoulingwirkung verschiedener synthetisch hergestellter Derivate von Gallensäuren. Hierbei erwies sich das Methylesterderivat der Cholsäure als besonders effektiv gegen die Ansiedlung von *Mytilus galloprovincialis*-Larven. Die Autoren sehen darin einen vielversprechenden Ansatz, Gallensäurederivate in polymeren Beschichtungen einzubringen, die dann eine Antifoulingwirkung erzeugen.

In zahlreichen Studien wurde die Antifoulingwirkung von Extrakten mariner Makroalgen untersucht. Diese scheint bei Braunalgen (Phaeophyta) und Rotalgen (Rhodophyta) ausgeprägter zu sein als bei Grünalgen (Chlorophyta). Allerdings wurden die Extrakte meist gegenüber isolierten Modellorganismen getestet. Praxistests mit konkreten Antifoulingbeschichtungen stehen meist noch aus (Dahms & Dobretsov 2017).

Unabhängig davon, ob die Abbaubarkeit der Wirkstoffe bei einer chemischen Nachbildung erhalten bliebe oder nicht (um diese für einen Einsatz auf Schiffen haltbar zu machen) ist es so, dass diese Systeme unter die BPR fallen würden und demzufolge für ein Umweltzeichen wie den Blauen Engel voraussichtlich nicht in Frage kommen. Würde ein solcher Wirkstoff allerdings das Genehmigungsverfahren nach Biozid-Verordnung bestehen und wären die Umweltrisiken eines solchen Stoffes deutlich niedriger als die vergleichbarer Biozide, so könnte über eine Akzeptanz dieses Wirkstoffes in blauen Engel Produkten nachgedacht werden. Dadurch, dass die Erforschung dieser Stoffe aber noch am Anfang steht, ist hier mittelfristig mit keinen neuen Produkten zu rechnen.

Auch mit dem Zweig der Übertragung von physikalischen Abwehrmechanismen aus der Biologie in die Technik beschäftigen sich zahlreiche Publikationen. Dieses Prinzip wird auch unter dem Begriff „Bionik“ beschrieben. Hintergrund ist die Beobachtung, dass lebende Strukturen in bestimmten Fällen vergleichsweise wenig Aufwuchs aufweisen. Viele Ansätze beruhen darauf, die Oberflächenstruktur der Haut von Fischen und Walen oder die Schalen von Mollusken und anderen Meeresbewohnern zu kopieren.

Yebra et al. (2004) untersuchten z. B. die Haut von Schweins- oder Killerwalen und fanden heraus, dass diese von Glykoprotein-Strukturen mit niedriger Oberflächenenergie (Low-Surface-

Energy) bedeckt war. Baum hatte zuvor die Selbstreinigungskraft des Pilotwals untersucht (Baum 2002; Baum et al. 2002).

Callow et al. untersuchten 2002 den Einfluss der Mikrotopografie auf die Ansiedlung von Grünalgensporen der Gattung *Ulva* (ex *Enteromorpha*).

Zahlreiche Publikationen und auch das BMWi-Projekt HAI-TECH haben sich mit der Reibungs- und Bewuchsminderung durch eine dem Haifisch nachempfundene Struktur gewidmet. Daehne & Watermann (2012) fanden heraus, dass die meisten dieser Strukturen nur sehr wenig mit einer tatsächlichen Haihaut gemein haben. Dennoch konnte im HAI-TECH-Projekt durch Messungen bei der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) eine über fünfprozentige Reduzierung des Reibungswiderstands durch eine Ribletbeschichtung gemessen werden. Eine Bewuchsreduzierung konnte allerdings nicht erreicht werden. Die Riblets wurden innerhalb kurzer Zeit stark bewachsen und der positive Strömungseffekt kehrte sich ins Gegenteil.

Wahl et al. (1998), Bers & Wahl (2004), sowie Bers et al. (2006; 2010) und Scardino et al. (2003; 2009) untersuchten intensiv die bewuchsmindernden Eigenschaften der Mikrotopografie von Miesmuscheln. Sie fanden heraus, dass die Topografie und eine Proteinschicht der jungen Miesmuscheln Antifoulingeffekte aufweisen, die mit zunehmendem Alter der Muschel aber nicht ausreichen, um eine Besiedlung zu verhindern. Bers et al. (2010) wiesen nach, dass die Mikrotopografie alleine ohne die übrigen chemischen Parameter keine ausreichende Wirkung erzielt.

Bei diesen und zahlreichen weiteren Forschungsaktivitäten auf der Suche nach natürlichen Antifoulingmechanismen handelt es sich um Laborversuche oder auch erste Praxistests, die aber noch keine große Relevanz für die Praxis erreichen konnten, da die Wirksamkeit eingeschränkt ist und nicht den hohen Ansprüchen der Schifffahrt genügt.

Gleiches gilt für die Forschungen der Arbeitsgruppe von Professor Schimmel am Institut für Angewandte Physik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Im so genannten Salvinia-Effekt wird ein großes Potential gesehen, die Bewuchsbildung und den Reibungswiderstand von Schiffsrümpfen durch eine Luftschicht zu reduzieren (z. B. Barthlott et al. 2017). Gleichwohl befindet sich die praktische Umsetzung noch in den ersten sehr kleinmaßstäbigen Laborversuchen. Bis zu einem großtechnischen Einsatz ist es noch ein langer Weg.

4.2.6.2 Marktrecherche

Die Marktrecherche ergab, dass zwar versucht wird, die genannten Erkenntnisse zu den physikalischen Oberflächeneigenschaften für Antifoulingbeschichtungen zu nutzen, dass dies aber bislang nur ein Nebeneffekt ist und noch keine Produkte existieren, die schwerpunktmäßig auf diesen Wirkmechanismus setzen.

Faserbeschichtungen aus dem Naturstoff Basalt wurden hier unter Faserbeschichtungen gelistet und beschrieben. Auch diese sind allerdings ebenfalls noch nicht marktreif.

4.2.7 Selbstpolierende und erodierende Beschichtungen

4.2.7.1 Wirkungsprinzipien und Erfahrungen

Etwa 70-90 % der Tiefseeschiffe sind mit erodierenden (controlled depletion polymers, CDPs) oder selbstpolierenden Beschichtungen (self-polishing coatings, SPC's) ausgerüstet (Watermann et al. 2019). Nach Li & Ning (2019) bestehen selbstpolierende Antifoulingbeschichtungen aus Copolymeren, die Silyl-, Kupfer-, Zink-Ester Seitengruppen enthalten. Diese hydrolysieren und erzeugen dabei eine hydrophile Oberfläche, die dann durch die Reibung während der Fahrt durchs Wasser zusammen mit den Bewuchsorganismen abgewaschen wird. In der Regel werden hierbei biozide Antifouling-Wirkstoffe freigesetzt. Allerdings ist die Wirksamkeit ohne stetigen

Wasserstrom z. B. am Liegeplatz gering. Eine Weiterentwicklung der Beschichtungen besteht in dem "Dynamic Surface Antifouling (DSA)"-System, in dem sich die Oberfläche im marinen Bereich ständig erneuert und damit die Ansiedlung von Fouling auch im statischen Zustand unterbunden wird.

In der Literaturrecherche ergaben sich auch Hinweise auf kommerziell erhältliche nicht-biozide selbstpolierende Beschichtungen. Diese wiesen allerdings eine Ökotoxizität auf, die teilweise auf den Gehalt an Zinkoxid zurückgeführt werden konnte (Löschau und Krätke 2005). Mit Aquaterras von Nippon Paint / Wilckens und Ecopower von Hempel erzielen lediglich zwei neuere Beschichtungen ihre Wirkung laut der Sicherheitsdatenblätter (Hempel) bzw. Herstellerangaben im Steckbrief (Nippon Paint) ohne Zinkoxid.

Zur Nomenklatur von selbstpolierenden bzw. erodierenden Beschichtungen gibt es einige Unstimmigkeiten. Nach Cavas (2013) sollten selbstpolierende Anstriche auf solche bezogen werden, deren Bindemittel in Meerwasser hydrolysierbar ist und die während der Lebensdauer eine saubere Farboberfläche bilden. Im Gegensatz dazu stehen die ablativen (kreidenden) Anstriche. Watermann et al. (2005) fassen unter dem Oberbegriff erodierende Beschichtungen sowohl selbstpolierende als auch ablativ Beschichtungen zusammen.

In einer neueren Publikation unterscheiden Watermann & Herlyn (2020) erodierende (CDPs, Controlled Depletion Polymers) von selbstpolierenden (SPCs, self-polishing coatings) Beschichtungen. Erodierende Beschichtungen mit auflösender Matrix bestehen überwiegend aus Varianten von Polyacrylverbindungen und Kolophonium. In selbstpolierenden Beschichtungen werden insbesondere PMMA-Polymere (Polymethylmethacrylate) eingesetzt. Diese werden mit funktionellen Gruppen wie Fluorpolymeren, Zwitterionenpolymeren oder Polysacchariden als hydrophile Komponenten verbunden. Zudem kommen Silylacrylate, Chlorparaffine, Kolophonium und Zinkcarboxylate zum Einsatz. Methacrylate werden auch mit Polyethylenglykol zu sogenannten PEGMA-Kopolymeren verbunden oder als hydrophile 2-Hydroxy-ethylmethacrylate (HEMA) formuliert (ebd.). In den ECHA Leitlinien für die Wirksamkeitsprüfung wird für Antifoulinganstriche lediglich der Begriff „self-polishing“ für biozide Anstriche verwendet, bei denen die Freisetzung des Wirkstoffs durch eine allmähliche Auflösung des Bindemittels/Ablation des Anstrichs während der gesamten Lebensdauer erfolgt. Speziell auf erodierende Anstriche wird nicht eingegangen (ECHA 2018).

Bei erodierenden Beschichtungen werden die oberflächlichen Schichten durch einen kontrollierten hydrolytischen Mechanismus abgetragen. Die Beschichtungen basieren auf Metacrylat-Copolymeren, löslichem Epoxid oder natürlichen Baumharzen wie Kolophonium (Watermann et al. 2005). Das Auswaschverhalten dieser Beschichtungen wurde untersucht, indem diese auf Objektträger aufgebracht und in künstlichem Meerwasser eluiert wurden. Die Eluate wurden anschließend im Leuchtbakterientest untersucht. Zum Vergleich wurden 18 andere Beschichtungen verschiedener Typen (erodierend, nicht-erodierend) getestet. Mit diesen wurde der Besiedlungstest mit Seepockenlarven (*Balanus amphitrite*) in Meerwasser durchgeführt. Die Ergebnisse der Leuchtbakterientests zeigten starke Streuungen. Es gab aber deutliche Unterschiede in der Toxizität im Besiedlungstest wie auch im Leuchtbakterientest mit den Eluaten zwischen den verschiedenen Beschichtungen, wobei auch nicht-biozide Beschichtungen toxische Effekte zeigten (bei den selbstpolierenden Beschichtungen wurde keine bzw. moderate Toxizitäten bestimmt (Watermann et al. 2005)).

Kolophonium, ein aus Baumharz gewonnener Destillationsrückstand (im englischen als „rosin“ bezeichnet) enthält Carboxylgruppen und hydrolysiert langsam, wobei sich eine poröse Oberflächenstruktur bildet. Dieser Effekt kann sowohl für erodierende Beschichtungen als auch für die gezielte Freisetzung eingebetteter Biozide genutzt werden (Han et al. 2021).

Fay et al. (2019) beschreiben erodierbare Antifouling-Beschichtungen auf Basis von biologisch abbaubarem Polymer und nach EU-BPR genehmigten Bioziden. Hierbei wurden drei Additive zur Oberflächenmodifikatoren eingesetzt: Tween 80, Span 85 und PEG-Silan. Durch Zugabe von 3 % der Additive wurde die Oberflächenbenetzbarkeit so verbessert (bzw. die Hydrophobizität so verringert), dass die Entwicklung von Mikrofouling signifikant reduziert wurde, ohne dass sich die Kupferfreisetzung erhöhte.

Grundsätzlich führen erodierende oder polierende Antifouling-Anstriche zu Einträgen in die Umwelt – unabhängig davon, ob sie nun Biozide enthalten oder nicht. Das bisherige Augenmerk lag jedoch eher auf Seiten der dabei freigesetzten Biozide. Erst in jüngerer Zeit werden auch Einträge von Polymeren und Additiven z. B. im Zuge der Diskussion um Mikroplastik diskutiert (Watermann & Herlyn 2020; Dibke et al 2021).

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde im Laufe des Projektes beschlossen, diese Produktgruppe mit intendierter Freisetzung von Polymeren für einen Blauen Engel auszuschließen.

4.2.7.2 Marktrecherche

Im direkten Kontakt gab es weder von dem niederländischen Hersteller Epifanes noch vom schwedischen Hersteller Lotréc eine Rückmeldung.

Evonik Operations hat einen Steckbrief für das neue Additiv „VP 4200“ eingereicht, Durch die Zugabe des Additivs kann die notwendige Kupfermenge einer Biozidbeschichtung zwar deutlich reduziert werden, aber eine Vergabe des Blauen Engels ist dennoch ausgeschlossen.

Mit Nippon Paint / Wilckens hat auch der Hersteller einer Beschichtung ohne Zinkoxid erfreulicherweise seine Teilnahme am Projekt durch Einreichung eines ausgefüllten Steckbriefes für das Produkt „Aquaterras“ bestätigt.

Tabelle 6: Anbieter von nicht-bioziden selbstpolierenden oder erodierenden Beschichtungen

Hersteller	Produkt	Anwendung	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
Epifanes/W. Heeren & Zoon BV	Foul-away	Freizeit	http://www.epifanes.nl	nein
Epifanes/W. Heeren & Zoon BV	Werdol kupferfrei	Freizeit	http://www.epifanes.nl	nein
Evonik Operations GmbH	VP 4200 (Additiv)	Prof. & Freizeit	http://www.evonik.de	Ja
Hempel GmbH	Ecopower ⁹	Prof. & Freizeit	http://www.hempel.de	nein
International (AkzoNobel) Farbenwerke GmbH	Cruiser Zero	Prof.	http://www.akzonobel.com	nein
Lotréc AB	LeFant TF	Freizeit	http://www.lotrec.se	nein
Lotréc AB	LeFant T-Coat	Freizeit	http://www.lotrec.se	nein
Lotréc AB	LeFant Mark 5	Freizeit	http://www.lotrec.se	nein
Lotréc AB	LeFant X3 Racing	Freizeit	http://www.lotrec.se	nein
NIPPON PAINT MARINE (EUROPE) GMBH	Aquaterras	Prof. & Freizeit	https://www.nipponpaint-marine.com/	Ja

⁹ Neues Produkt wurde nach dem Ende der Marktrecherche ergänzt. Der Hersteller konnten aber aus zeitlichen Gründen nicht mehr kontaktiert werden.

4.2.8 Weitere elektrische Verfahren

4.2.8.1 Wirkungsprinzipien und Erfahrungen

Einige Hersteller boten in der Vergangenheit Systeme mit Spezial-Elektroden in Verbindung mit galvanischem Schutz-Strom an. Dabei wurde ein Stromfeld um den Schiffsrumpf im Unterwasserbereich aufgebaut. Nach Angaben der Hersteller sollte das System Bewuchsschutz für Sportboote in Süß- und Salzwasser bieten. Keines dieser Systeme konnte sich etablieren.

Ein anderes Verfahren setzt eine leitfähige Beschichtung ein. Ein elektrischer Strom wird durch den Rumpf geleitet, an der Oberfläche der Beschichtung werden durch Elektrolyse Chlorid-Ionen in Hypochlorid umgewandelt. Hypochlorid wirkt hochgiftig auf die Bewuchsorganismen. Der Vorteil dieses System gegenüber den anderen Antifouling-Verfahren ist, dass man es nur aktivieren muss, wenn es notwendig ist, z. B. im Hafen oder bei geringer Geschwindigkeit. Der gesamte Energiebedarf soll sehr gering sein und annähernd bei 0.2 W/m^2 liegen. Der Nachteil dieses System besteht darin, dass trotz einer schnellen Zersetzung des Hypochlorids im Wasser halogenierte Nebenprodukte durch die Elektrolyse erzeugt werden. Die Entstehung dieser Nebenprodukte ist sowohl bei der Chlorung von Trinkwasser als auch bei gechlorten Kühlsystemen im marinen Bereich dokumentiert worden. Auch diese Systeme haben sich nicht etabliert und kämen für ein Umweltsiegel voraussichtlich auch nicht in Frage, da es sich strenggenommen um die in-situ Erzeugung eines bioziden Wirkstoffes handelt, die in den Geltungsbereich der Biozidprodukteverordnung fallen, also genehmigungspflichtig sind.

Eine weitere Entwicklung in der Nutzung elektrischer Felder basiert auf dem Prinzip einer diskontinuierlichen Veränderung des pH-Werts. Angeregt durch eine diskontinuierliche elektrische Spannung induziert die leitende äußere Farbschicht pH-Wert Erniedrigungen an der Oberfläche und verhindert dadurch die Ansiedlung der Bewuchsorganismen. Es wurden erfolgreiche Laborexperimente und Feldstudien durchgeführt. Die Rechte an dem System hat das Fraunhofer IMWS von der Firma Bioplan übernommen, zurzeit finden aber keine Aktivitäten damit statt (mdl. Mitt.).

Kamjunke et al. (2020) untersuchten ebenfalls den Antifouling-Effekt von pH-Schwankungen auf leitfähigen Lackoberflächen, die durch Polumkehrung von Gleichstrom induziert wurden und beobachteten eine deutliche Abnahme der Besiedlungsdichte von Kieselalgen. Die durch Elektrolyse von Meerwasser aus Chlorid freigesetzten Chlor und Hypochlorit-Konzentrationen waren zwar nachweisbar, konnten aber den Effekt allein nicht erklären. Stattdessen scheint der Effekt auf die elektrolytische Spaltung von Wasser zum Hydroxylanion (OH^-) und Wasserstoff (H_2), der entweicht, zurückzuführen zu sein. Die Polumkehr führt zu pH-Schwankungen, die einen starken Stress auf Mikroorganismen und die Larven höherer Organismen ausüben. Das Verfahren wurde in deutschen und europäischen Patenten beschrieben. Die Pausen zwischen den elektrochemischen Behandlungen sollten jedoch eine Stunde nicht überschreiten.

In einem Übersichtsartikel von Li & Ning (2019) gehen die Autoren u. a. auf den Einfluss elektrischer Felder auf den Aufwuchs von Biofouling ein, die schon bei niedriger Spannung wirken. Der Wirkmechanismus ist noch nicht geklärt, könnte aber mit Elektroporation¹⁰, Elektrophorese und Iontophorese¹¹ zusammenhängen. Andere Untersuchungen zeigen, dass der Aufwuchs durch elektrische Felder kaum beeinflusst wird, aber den Massentransport von Bioziden an den Biofilm verbessern kann. Zudem bestehen Überlegungen elektroaktive Materialien wie z. B. piezoelektrische Materialien gegen Fouling einzusetzen. Auch leitfähige

¹⁰ Elektroporation: Physikalische Methode zur vorübergehenden Erhöhung der Permeabilität der Plasma-Membranen bzw. der Bakterienzellwand durch kurze Elektropulse. <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/elektroporation/20805> (Zugriff 6.3.2020)

¹¹ Iontophorese: Verfahren zur Resorption von Arzneistoffen durch die Haut unter Anwendung eines schwachen Gleichstroms. <https://de.wikipedia.org/wiki/Iontophorese> (Zugriff 6.3.2020)

Polymere könnten als Antifouling-Coatings eingesetzt werden. Durch pH-Einstellung könnte zwischen Coating und Meerwasser ein elektrisches Feld induziert werden. Alternativ könnte zwischen dem leitfähigen Coating als Anode und einem nicht beschichteten Metall im Meerwasser als Kathode eine leichte Spannung angelegt werden, die dazu führt, dass durch Elektrolyse Natriumhypochlorid (Biozid) freigesetzt wird. Polymere mit sehr hoher Leitfähigkeit können diesen Effekt sogar ohne das Anlegen einer Spannung auslösen. Auch konnte gezeigt werden, dass das Polymer Polypyrrol durch das Anlegen einer Spannung amphiphile Eigenschaften bekommt und wechselnd hydrophile und hydrophobe Oberflächeneigenschaften aufweist. Solche wechselnden Bedingungen wirken abschreckend auf Bewuchsorganismen, die vielmehr konstante Oberflächen bevorzugen.

Andere Verfahren durch Bestrahlung mit UV-C oder Laserlicht befinden sich noch in der Entwicklung und haben keine marktreifen Produkte.

4.2.8.2 Marktrecherche

Es wurde ein Hersteller identifiziert, dessen Produkt in diese Gruppe fallen würde, sofern es die Marktreife erlangt. Aufgrund dieses einen Produktes wurde diese Produktgruppe in den Vergabekriterien für den Blauen Engel als „Elektrische Verfahren mit speziellem Beschichtungsaufbau“ bezeichnet.

Tabelle 7: Weitere elektrische Verfahren

Hersteller	Produkt	Anwendung	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
Bioplan / Fraunhofer IMWS	ecopHas	Prof.	http://bioplan-online.de/	Bioplan / Fraunhofer IMWS

4.3 Antifoulingstrategien außer Beschichtungen und Antihafthüllen

Neben den bislang gebräuchlichsten Bewuchsschutz-Prinzipien durch Beschichtungen oder Folien wurden auch andere eher technische Lösungen als umweltfreundliche Alternativen berücksichtigt: Reinigungsverfahren, Hebeanlagen, Ultraschallanlagen, Unterwasserplanen und weitere elektrische Systeme wie Laser- oder UV-Systeme, die zurzeit noch keine Marktreife haben.

Für die Gruppe der Reinigungsverfahren (Kap. 4.3.1– 4.3.3) ist die gewässerrechtliche Erlaubnispflichtigkeit zu beachten. Neben dem bundesweit gültigen Wasserhaushaltsgesetz ist dieses Thema in den Ländern und Landkreisen unterschiedlich geregelt. Die neueste Regelung ist der „Leitfaden zur Erteilung einer Erlaubnis von Unterwasserreinigungen in den Bremischen Häfen“ (Anonym 2021), der Folgendes besagt:

Leitfaden zur Erteilung einer Erlaubnis von Unterwasserreinigungen in den Bremischen Häfen

„Grundsätzlich sind die national geltenden rechtlichen und technischen Anforderungen an den Gewässerschutz einzuhalten. Die Unterwasserreinigung wird als Gewässerbenutzung gemäß § 9 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) bewertet und bedarf einer wasserrechtlichen Erlaubnis. (...)“

Eine Reinigung von Schiffsrümpfen mit biozidhaltigen Antifouling-Beschichtungen ist nicht genehmigungsfähig. Es darf nur auf abriebfesten, biozidfreien Unterwasserbeschichtungen gereinigt werden.

Ebenso ist keine Grundreinigung gestattet. Mit dem Verbot der Grundreinigung ist gemeint, dass ein Schiff, welches mit Makrobewuchs bedeckt ist, nicht im Wasser gereinigt werden darf. Erlaubnisfähig sind je nach regionaler Umsetzung nur regelmäßige Pflegereinigungen des Mikrobewuchses. Wird dieser Zeitpunkt verpasst, muss eine Grundreinigung im Dock oder auf einem Waschplatz an Land durchgeführt werden.

Die behördlichen Regelungen in diesem Bereich und klare Vorgaben können für Farbfirmen, Reeder und Tauchfirmen einen Anreiz für die Weiterentwicklung neuer Systeme und deren vermehrten Einsatz liefern.

Sofern alle Voraussetzungen vorliegen, wird eine wasserrechtliche Erlaubnis erteilt, mit der die Benutzung des Systems für Unterwasserreinigungen im Grundsatz durch die Wasserbehörde erlaubt wird.

Die Erlaubnis soll für einen konkreten Reinigungsvorgang eine aufschiebende Bedingung enthalten. Damit sind vorab die jeweiligen Kenndaten der zu reinigenden Schiffseinheit einzureichen. Die Freigabe durch die Behörde soll innerhalb einer Woche erfolgen. Während der Ausübung der Reinigung ist die Eigenüberwachung durch den Erlaubnisinhaber vorgesehen. (...)“.

4.3.1 Reinigungsvorrichtungen am Liegeplatz

4.3.1.1 Wirkungsprinzip und Erfahrungen

Nicht-stationäre Reinigungsvorrichtungen sollten nur in Kombination mit reinigungsfähigen Hart- oder Antihafbeschichtungen genutzt werden. Durch eine mechanische (in einem Fall auch chemische) Einwirkung auf den Bewuchs wird dieser vom Schiffsrumpf entfernt. Solche Geräte zur Fremdreinigung werden eingesetzt, wenn die Anströmung während der Fahrt für eine Selbstreinigung nicht ausreicht ([Daehne et al. 2012](#)). Die Reinigung kann entweder durch den Menschen oder durch Roboter erfolgen ([Watermann & Eklund 2019](#); [Watermann & Garrick 2019](#); [Worms 2013](#)). Im Sportbootsektor werden hauptsächlich Bürsten zum Reinigen der Oberflächen verwendet, die von Deck aus bedient werden können. Reinigungsroboter, die mit drehenden Bürsten ferngesteuert oder selbständig das Unterwasserschiff reinigen, sind ebenfalls erhältlich (ROUV's = remotely operated (underwater) vehicle = Ferngesteuertes (Unterwasser)fahrzeug, AUV's = Autonomous Underwater Vehicle = Autonomes Unterwasserfahrzeug).

In Forschungsprojekten der DBU wurden von 2012 bis 2015 systematisch mobile Reinigungsgeräte für Sportboote untersucht ([Daehne et al. 2014](#); [Watermann et al. 2016](#)). Hierbei wurde aufgrund des deutlichen Unterschiedes in der Bewuchsintensität von Salz- und Süßwasser festgestellt, dass in Salzwasserrevieren Reinigungen in sehr kurzen Intervallen erforderlich wären. In Süßwasserrevieren betrachten die Autoren die Reinigung von Sportbootrümpfen als eine sinnvolle Alternative zum Einsatz von bioziden Antifoulingbeschichtungen.

In einem vorangegangenen Projekt des Bundeswirtschaftsministeriums mit dem Namen HAI-TECH von 2009 bis 2011 untersuchte [Daehne \(2012\)](#) das erforderliche Reinigungsintervall von Testbeschichtungen mit Ribletstruktur und fand heraus, dass selbst ein 14-tägiges Intervall mit Bürstenreinigung im Meerwasser der Nordsee nicht ausreichte. Es war vielmehr so, dass die gereinigten Bereiche am Ende der Bewuchsphase die dichteste Bedeckung mit Seepocken aufwiesen, weil alle anderen Organismen regelmäßig abgereinigt wurden und somit Platz für die Seepocken geschaffen wurde. Bis zur nächsten Reinigung hatten sich diese Seepocken so fest angehaftet, dass sie nicht mehr vollständig entfernt werden konnten.

Oliveira et al. (2020) untersuchten im Meerwasser des Kattegats den Reinigungseffekt auf die Entwicklung von Schiffsbewuchs. Grundsätzlich sollten Reinigungsverfahren rechtzeitig gegen frühe Bewuchsstadien eingesetzt werden. In einer einjährigen Studie wurden die notwendigen minimalen Reinigungskräfte anhand eines Tauchwasserstrahl bestimmt. Durch zweimonatliche Reinigung mit einer maximaler Wandschubspannung von 1,3 kPa ließ sich ein gutes Reinigungsergebnis erzielen ohne die Antifoulingbeschichtung zu verletzen.

Eine Sonderrolle nehmen hier zwei Foliensysteme ein. Bei einem Prinzip fährt das Boot am Liegeplatz auf eine schwimmende Matte mit rauer Oberfläche. Durch die mechanische Einwirkung wird der Bewuchs abgerieben.

Bei dem anderen Ansatz wird das Unterwasserschiff am Liegeplatz mit einer Folie eingehüllt. Somit kommen die Ansiedlungsstadien der Bewuchsorganismen im Wasser nicht mehr in Kontakt mit dem Schiffsrumpf. Beide Systeme haben den Vorteil, dass sich kein neuer Bewuchs bilden kann, solange das Boot in der Hülle bzw. Matte liegt. Die ergänzende Methode, in den Zwischenraum zwischen Boot und Folie eine biologische Säure (z. B. Essigsäure) zu füllen, um dadurch etwaigen Bewuchs abzutöten und Kalkskelette aufzulösen, kann für den Blauen Engel nicht akzeptiert werden, da es sich hierbei um eine biozide Anwendung handeln würde. Die Essigsäure wurde in die Liste der Stoffe des Anhang 1 der BPR mit geringem Risiko aufgenommen, die für das vereinfachte Zulassungsverfahren vorgesehen sind (Delegierte Verordnung (EU) 2019/1819).

In der Berufsschiffahrt werden die Rümpfe entweder von Robotern (ROUV's, AUV's) oder von Tauchern gereinigt. Die Technik reicht hier von angetriebenen Bürsten über Hochdruckreiniger hin zu Geräten, die mit Kavitation den Bewuchs entfernen (Morrissey & Woods 2015).

Die Risiken der mobilen Unterwassereinigung bestehen darin, dass die abgereinigten Partikel meist nicht aufgefangen werden. So können auch Farbpartikel, die sich durch die mechanische Beanspruchung gelöst haben, ungehindert in die Umwelt gelangen (Scianni & Georgiades 2019). Auch die abgereinigte Biomasse kann ein Problem darstellen, wenn viel Bewuchs an einem Ort entfernt wird. Die Biomasse sinkt auf den Grund und kann dort eine anaerobe Faulschlamm-schicht bilden (Watermann et al. 1996; Hornemann et al. 1999).

Eine vielfach durchgeführte Reinigung auf unzureichend wirksamen erodierenden Biozid-beschichtungen ist nicht ratsam und auch nicht zulässig, da nicht nur der Bewuchs, sondern auch große Teile der Restbeschichtung in die aquatische Umwelt eingetragen werden. Das ist nicht nur eine Belastung für die Umwelt, sondern führt auch dazu, dass der Rumpf sehr schnell wieder bewächst, da er danach quasi keine Schutzbeschichtung mehr hat.

4.3.1.2 Marktrecherche

Von den elf mehrfach angeschriebenen Herstellern haben vier einen Steckbrief ausgefüllt. Die Systeme Tausendbein von Toplicht und Big Easy Cleaner von der Big Easy Cleaner GmbH sind bekannt, da diese im DBU-Projekt getestet wurden (s.o., Daehne et al. 2014; Watermann et al. 2016).

Das Tausendbein ist eine lange Leine, die ähnlich einer Flaschenbürste mit Borsten versehen ist und beidseitig unter den Rumpf geführt wird. Durch Hin- und Herziehen wird der Bewuchs vom Rumpf abgerieben, aber nicht aufgefangen. Das Prinzip ist sehr einfach und alt, es ist jedoch nur für Schiffsrümpfe mit Rundspant ohne Kiel, Kimmstringer, Stabilisatoren oder anderen Rumpfanbauten geeignet.

Der Big Easy Cleaner hingegen ist ein Reinigungspad an einem leicht gebogenen Stiel. Das Pad wird im Wasser durch Auftrieb an den Rumpf gepresst. Durch eine Auf- und Ab-Bewegung reibt das Pad mit einem Grobvlies den Bewuchs ab, ohne ihn aufzufangen. Vom Big Easy Cleaner gibt

es eine Segelbootvariante für Rundspannter und eine Motorbootvariante mit geneigten Bürsten anstatt Pad für Rumpfe mit Kimmstringern (= "Rippen"). Für Kimmkieler oder Boote mit breiteren Stabilisatoren sind beide Varianten ungeeignet. Die Kosten liegen bei 219 bzw. 249 €.

Beide Systeme haben in dem genannten Projekt im Süßwasser sehr gute Ergebnisse erzielt, im Meerwasser auch, aber nicht in allen Fällen. Wenn der Bewuchs zu groß und zu stark haftend geworden war, reichte der Anpressdruck bei beiden Geräten nicht mehr aus, um den Bewuchs abzureiben.

Der Keelcrab ist eine ferngesteuerte „Unterwasserdrohne“, die den Rumpf mittels rotierender Gummilippen abreinigt. Das Gerät wird zu Wasser gelassen und saugt sich mittels selbst erzeugter Wasserströmung am Rumpf an und wird dann ferngesteuert am Rumpf entlang bewegt. Abgereinigtes Material (u. a. Mikroplastik) kann „bedingt in einem eingesetzten Fangsack aufgefangen werden“.

Das französische System CarenEcolo ist in einem mobilen PKW-Anhänger untergebracht. Es enthält eine mobile Waschplatzplane, einen Wasserhochdruckstrahler und ein 7-stufiges Filtersystem. Laut Herstellerangaben kann das gefilterte Waschwasser anschließend wieder in den Vorfluter geleitet werden. Die Kosten liegen bei 39.500 € netto.

Tabelle 8: Anbieter von Reinigungsrichtungen am Liegeplatz (nur für Freizeitschiffe)

Hersteller	Produkt(e)	Anwendung	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
Aquenal Pty Ltd.	IMProtector	Prof. & Freizeit	http://www.aquenal.com.au	nein (beliefert nur Australien)
Armored Hull Boat Shields	Armored Hull Boat Shield	Freizeit	https://armoredhull.com	nein (beliefert nur USA)
Big Easy Cleaner GmbH	Big Easy Cleaner	Freizeit	https://bigeasycleaner.de	ja
Bootservice Zengerle	Keelcrab	Freizeit	http://www.bootservice-zengerle.de/	ja
CarenEcolo	CarenEcolo	Freizeit	http://www.carenecolo.fr	ja
Clean Marine AS	Exhaust Gas Cleaning System	Prof. & Freizeit	https://cleanmarine.no	nein
Cliin	Cargo Hold Robot (CHR)	Prof. & Freizeit	https://cliin.dk	nein
Innermost Containment Systems Inc.	Innermost	Freizeit	-	nein (Firma inaktiv)
Scrubbis AB	Scrubbis Eco Care	Freizeit	https://scrubbis.se	nein
Seaboost Oy	Powerbrush und Powerturf	Freizeit	https://seaboost.fi	Nein, kein dt. Vertrieb
Toplicht GmbH	Tausendbein	Freizeit	http://www.toplicht.de	ja

4.3.2 Tauch- und Reinigungsfirmen

4.3.2.1 Wirkungsprinzipien und Erfahrungen

Um die Rümpfe, insbesondere die der Berufsschifffahrt, bewuchsfrei zu halten, gibt es Firmen, die sich auf die Unterwasserreinigung von Schiffen spezialisiert haben. Dabei gibt es, grob gesagt, zwei Herangehensweisen: Die einen reinigen mit Tauchern, die vor Ort die Reinigungsgeräte bedienen, andere Firmen nutzen ferngesteuerte Reinigungsroboter, die von Land oder einem Begleitboot gesteuert werden. Die Reinigungstechniken reichen von simplen Bürsten über Hochdruckreiniger bis zu Neuentwicklungen, wie dem Vortex-System des Envirocart oder dem Cavi Blaster der Nordseetaucher. Daneben gibt es eine Fülle von Firmen, die Unterwasserreinigungen durchführen, aber dieses zumeist ohne Auffang- und Filteranlagen.

4.3.2.2 Marktrecherche

Von sieben kontaktierten Firmen haben die Nordseetaucher und TechHullClean einen Steckbrief ausgefüllt und eingereicht. Die Nordseetaucher waren auch an F+E-Projekten zur Unterwasserreinigung beteiligt und dabei auch maßgeblich an der Weiterentwicklung des auf Kavitation beruhenden Unterwasserreinigungsgerätes CaviBlaster zum Cavidome beteiligt (s.u.).

Tabelle 9: Tauch- und Reinigungsfirmen (nur für professionelle Schifffahrt)

Hersteller	Reinigungsgerät	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
DG-Diving	DG-Green Cleaning Machine	https://dg.fi	nein
Fleet Cleaner B.V.	Fleet Cleaner	http://www.fleetcleaner.com	nein (in Deutschland nicht aktiv)
Franmarine Underwater Services Pty Ltd.	Envirocart	https://www.franmarine.com.au	nein
GAC Hullwiper	Hullwiper	http://www.hullwiper.co	nein
Kongsberg Maritime & Jotun	HullSkater	https://www.kongsberg.com/maritime/campaign/hullskater	nein
Nordseetaucher GmbH	CaviBlaster, CaviDome	http://www.nordseetaucher.de	ja
TechHullClean	div. Reinigungseinheiten	https://techullclean.com	Ja

DG-Diving

Das DG Green Cleaning System der DG-Diving Group ist ein taucheroperiertes Reinigungssystem, das mit Bürsten in verschiedenen Stärken den Rumpf abreinigt. Der Hersteller gibt an, dass das DG Green Cleaning System durch die Variabilität der Bürsten auch für die Reinigung von Silikonoberflächen geeignet ist. Der abgebürstete Bewuchs wird aufgesaugt und an Land gefiltert, so dass weder Schadstoffe aus den Beschichtungen noch tote Biomasse in das Gewässer gelangen. DG-Diving gibt an, mit diesem von einem Taucher geführten Gerät pro Stunde 500 – 1000 m² reinigen zu können.

Fleet Cleaner

Der Fleet Cleaner ist ein ferngesteuerter Reinigungsroboter, der mit Hochdruckwasserstrahlen Schiffsrümpfe reinigt. Magnete halten den Reinigungsroboter am Rumpf, während er von einem Begleitschiff ferngesteuert wird. Auch hier wird das Waschwasser aufgefangen und an Bord des Begleitschiffes geleitet. Dort werden die Feststoffe sowie mögliche Beschichtungsrückstände herausgefiltert, bevor das Wasser zurück ins Gewässer geleitet wird. Dieses System ist auch auf See einsetzbar, da die gesamte Technik auf einem Schiff montiert ist. Laut Betreiber kann der Fleet Cleaner bis zu 1200 m² pro Stunde reinigen

Franmarine

Franmarine nutzt den Envirocart von CleanSubSea zur Reinigung von Unterwasserschiffen. Dieses tauchergeführte Gerät funktioniert ähnlich wie ein Staubsauger. In dem Gerät rotieren in 20 mm Abstand vom Schiffsrumpf Schaufeln, die einen Vortex erzeugen, der das Gerät am Rumpf hält und den Bewuchs löst und restlos einsaugt. Das eingesaugte Wasser (bis zu 2000 L/min) wird an Land geleitet und gefiltert. So bekämpft dieses System neben Fouling auch effektiv die Verbreitung von Neobiota. Die Beschichtung wird bei diesem System mechanisch nicht beansprucht, weil kein mechanischer Kontakt entsteht, wie z. B. bei Bürsten. Laut Hersteller funktioniert das System daher auch auf weichen silikonbasierten Antifoulingssystemen, ohne diese zu beschädigen (getestet an „Intersleek“ von „International Paint“). Das gesamte Envirocart-System kann in einem 20-Fuß-Container verladen werden und ist somit rund um den Globus einsetzbar.

Caviblaste / Cavidome

Zum Entfernen des maritimen Bewuchses hat sich das Reinigungssystem „Caviblaste“ bewährt, welches mit Hilfe der Kavitationskraft arbeitet. Um die Reinigungsleistung zu verbessern und ein Auffangen des Abriebs zu ermöglichen, entwickelten die Nordseetaucher in einem 2017 beendeten BMWi-Projekt „FoulProtect“ mit dem „CaviDome“ ein verbessertes Gerät. Der CaviDome basiert ebenfalls auf dem Prinzip der Kavitation, bei der die durch ein eigenes System generierten Luftblasen zerplatzen und so ein Vakuum erzeugen, welches den Bewuchs schnell und sicher entfernt. Der CaviDome arbeitet dabei mit zwei rotierenden Düsen, aus denen die Kavitationsbläschen ausgestoßen werden und auf die zu reinigende Fläche treffen. Der Arbeitsdruck des antreibenden Hochdruckgeräts liegt zwischen 100-150 bar. Das damit entfernte Material wird über eine Art Glocke mit Absaugvorrichtung aufgefangen. Durch eine Saugleitung wird das Material zur Filterung oder Entsorgung auf ein Begleitboot gepumpt.

Muscheln und Seepocken mit harten Schalen werden mit der Kavitations-Technik besser entfernt als weiche Organismen wie Algen oder auch die lederartigen Ostasiatischen Seescheiden.

TecHullClean

Das Reinigungssystem der Firma TecHullClean setzt sich aus vier verschiedenen Reinigungsgeräten, einem Filtersystem und einem hydraulischen Antrieb zusammen. Um die Gefahr von Umweltverschmutzung durch austretende Hydrauliköle zu verhindern, werden ausschließlich biologisch abbaubare Öle verwendet. Das mehrstufige Filtersystem filtert aus dem angesaugten Wasser Biomasse sowie Beschichtungsrückstände bis zu einer Größe von 5 µm heraus. Der Filter kann davon bis zu 290 Kg aufnehmen, bevor er gereinigt werden muss.

Um eine lückenlose Reinigung des Unterwasserschiffes zu gewährleisten hat TecHullClean vier Reinigungsgeräte entwickelt:

- Eco Propeller Polisher, ein kleines, leichtes Gerät zur manuellen Propellerreinigung

- ▶ Eco Wing, ein kleines, manuell geführtes Gerät, für schwer erreichbare Stellen
- ▶ In-Liner, ein großes Reinigungsgerät für runde Stellen wie Bugwülste,
- ▶ Crawler, ein großes Reinigungsgerät für große, wenig gekrümmte Flächen

Aktuell werden alle Reinigungsgeräte noch von Tauchern bedient, der Crawler kann aber zum ROUV aufgerüstet werden.

Der Eco Propeller Polisher arbeitet hauptsächlich mit Hochdruck. Eine Druckpumpe (17 bar) wird in der Nähe des Propellers (max. 15 m entfernt) mit Magneten am Schiffsrumpf angebracht, um mit einem Druck von 200 bar und ca. 30 L/min den Propeller zu reinigen. Die Drucksteigerung im Eco Propeller Polisher wird durch eine Venturi-Düse erreicht. Eine Polierscheibe im Gerät, angetrieben durch einen Hydraulikmotor, sorgt für eine glatte Oberfläche des Propellers. Das Waschwasser wird mit 180 – 200 L/min abgesaugt und gefiltert.

Der Eco Wing ist ein mit zwei hydraulischen Motoren angetriebenes Bürstenreinigungsgerät. Durch seine geringe Größe (95 cm (L) x 60 cm (W) x 40 cm (H)) und seinen flexiblen Rahmen eignet er sich gut für enge und gekrümmte Stellen am Rumpf. Mit seinen beiden 40 cm großen, rotierenden Nylon-Bürsten hat der Eco Wing eine Reinigungsleistung von bis zu 500 m² pro Stunde. Um Beschädigungen der Rumpfbeschichtung zu vermeiden, wird der Anpressdruck der Bürsten hydraulisch kontrolliert. Das abgereinigte Material wird mit 700 L/min eingesaugt und herausgefiltert.

Für große Flächen mit deutlicher Krümmung wird der In-Liner eingesetzt. Da dieses Gerät zu groß ist, um von einem Taucher effektiv bewegt zu werden, wird es von Rädern angetrieben, die über den Rumpf fahren. Um sich an Rundungen besser anpassen zu können, sind die Antriebs- und Laufräder des In-Liners mittig in einer Linie angebracht. Die Reinigung wird von drei 420 mm – Nylon-Bürsten durchgeführt, mit denen der In-Liner bis zu 1000 m² pro Stunde reinigen kann. Die Bürstenrotation und Vortrieb erfolgen durch hydraulische Motoren. Eine hydraulische Federung kontrolliert den Anpressdruck der Bürsten. Das abgereinigte Material wird mit 1100 L/min eingesaugt und herausgefiltert, um die Umweltbelastung durch tote Biomasse und Beschichtungsrückstände zu minimieren. Der In-Liner wird durch den entstehenden Unterdruck am Schiffsrumpf gehalten und von einem Taucher gesteuert.

Das größte der vier Reinigungsgeräte ist der Crawler. Auch dieses Gerät verfügt auf Grund seiner Größe über Antriebsräder und kann ferngesteuert werden. Zusätzlich zu drei 420 mm - Nylon-Bürsten wie beim In-Liner verfügt der Crawler noch über einen Hochdruckreiniger (70-140 bar). Das Gerät wird angetrieben von fünf Hydraulikmotoren und hat eine Reinigungsleistung von bis zu 1000 m² pro Stunde. Um Beschädigungen der Antifoulingbeschichtung zu verhindern, wird der Anpressdruck der Bürsten auch hier hydraulisch kontrolliert. Das Waschwasser wird mit 946 L/min abgesaugt und gefiltert. Wie beim In-Liner hält der Unterdruck den Crawler am Schiffsrumpf.

4.3.3 Stationäre Bootwaschanlagen

4.3.3.1 Wirkungsprinzip und Erfahrungen

In einem Projekt der DBU wurde in Bremerhaven ein Prototyp einer Bürsten-Waschanlage zur Reinigung von Sportbooten im Wasser getestet (Lompe et al. 2013). Auch bei stationären Anlagen ähnlich einer Waschstraße für Autos besteht die Notwendigkeit einer Behandlung des Waschwassers über Auffangbecken und Filteranlagen. Es ist noch nicht geklärt, ob damit unerwünschte Auswirkungen auf das Gewässer am Standort der Anlage sicher vermieden werden können, aber grundsätzlich ist das Auffangen des Bewuchses bei einer stationären

Anlage sicher einfacher als bei mobilen Geräten. Die Probleme solcher stationären Anlagen liegen in anderen Bereichen. So muss die Anlage in der Lage sein, die zum Teil sehr unterschiedlichen Rumpfformen von Segelbooten mit und ohne Kiel sowie von Motorbooten z. B. mit Kimmstringern oder Z-Antrieben zu reinigen. Ein weiteres Problem ist alltäglicher Natur: Die Dauer für die Reinigung eines Bootes mit Ein- und Ausfahrt in die Anlage liegt bei ca. 30 Minuten. Da viele Freizeitboote nur am Wochenende genutzt werden, kann es vor der Anlage zu einem Stau kommen.

4.3.3.2 Marktrecherche

Zwei von vier angeschriebenen Herstellern haben einen Steckbrief eingereicht. Der SWISS ELEMENTIC BIGWASH ist eine im Wasser schwimmende Rumpfreinigungsanlage für Motor- und Segelboote bis 16 m und einer Kielbreite von bis 45 cm und einem maximalen Tiefgang von 2,4 m. Es stehen drei Größen zur Verfügung. Durch die nicht abrasiven, rotierenden Bürsten kann der Bootsrumpf gereinigt werden. Mit einem Auffangbecken mit einem sich öffnenden und schließenden Tor werden die Ablagerungen des Rumpfes gesammelt, entfernt und entsorgt. Zudem hat die Anlage eine Vakuumpumpe, die den größten Teil der Ablagerung ansaugt und für die Entsorgung sammelt.

Der Axon Marine Filter der schwedischen Firma Summit Green AB ist keine Reinigungsanlage im eigentlichen Sinne, sondern ein ausgereiftes Filtersystem, das in einem Container an vorhandenen Waschplätzen eingesetzt werden kann. Die Filterkombination aus Fasertorf und Aktivkohle entfernt neben Zink auch Antifoulingbiozide wie Kupfer zu über 90 %.

Tabelle 10: Anbieter von stationären Bootwaschanlagen (nur für Freizeitschiffe)

Hersteller	Produkt(e)	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
BoatWasher Sweden AB	BoatWasher	https://boatwasher.se/	nein
Rentunder AB	Mobile Washer	https://driveinboatwash.com/	nein
Summit Green Tech AB	Axon Marine Filter	http://www.summitgreentech.com/	ja
SWISS ELEMENTIC GmbH	Drive-in Boatwash (Bigwash und Miniwash)	https://www.swisselementic.com/	ja

4.3.4 Bootshebeanlagen

4.3.4.1 Wirkungsprinzip und Erfahrungen

Bootshebeanlagen verfolgen ein simples Prinzip: Die Boote werden an Ihrem Liegeplatz im Heimathafen aus dem Wasser gehoben. Da die Bewuchsansiedlung fast ausschließlich während der Liegezeiten stattfindet, ist somit kein Antifoulinganstrich notwendig. Probleme in der Praxis können auftauchen, wenn der Eigner beispielsweise in den Sommerferien einen längeren Urlaubstörn unternimmt und sich dabei für mehrere Wochen vom Heimathafen entfernt. In anderen Häfen kann das Boot nicht ohne weiteres aus dem Wasser gehoben werden und ist somit einem Bewuchsbefall schutzlos ausgeliefert. Je nach Gewässer, Saison, Aktivität und Geschwindigkeit des Schiffes kann dieser Zustand im ungünstigsten Fall bereits nach einer Woche zu einer Ansiedlung von Seepocken führen, die dann nur noch mechanisch entfernt werden können. Nach drei Wochen wird eine Bürstenreinigung schon schwierig, wenn die Beschichtung keine Antihafteigenschaften aufweist.

Bei den Bootshebeanlagen kann zwischen zwei Systemen unterschieden werden: Schwimmende Anlagen und land- bzw. steggestützte Anlagen. Schwimmende Anlagen haben in der Regel zwei Schwimmkörper, zwischen die das Boot fährt. Dann wird Luft in und das Wasser aus den Schwimmern gepumpt und die Anlage dadurch angehoben, bis das Boot komplett aus dem Wasser gehoben ist. Der Nachteil an diesem System: Die Schwimmkörper werden von außen und in geringem Maße auch von innen bewachsen. Sofern die Schwimmer deshalb mit einem Antifoulinganstrich versehen werden, geht der Umweltbonus durch die gesparte Antifoulingbeschichtung am Schiffsrumpf wieder verloren. Das dieses Prinzip häufig im Meerwasser eingesetzt wird und die Schwimmkörper dort stark bewachsen würden, ist dieses häufig die gängige Praxis. In Vorversuchen im Hafen von Norderney konnten die Schwimmkörper einer Anlage auch mit einem Textilüberzug ausreichend gut geschützt werden.

Bei land- oder steggestützten Anlagen hingegen stellt sich dieses Problem nicht. Das Schiff wird vom Steg aus dem Wasser gehoben und kann dort nicht bewachsen. Da dieses Hebeprinzip zumeist in Süßwasserseen eingesetzt wird, entfallen hier auch die wochenlangen Urlaubstörns und die Anlagen stellen eine sehr umweltfreundliche Alternative dar.

4.3.4.2 Marktrecherche

Leider gab es von den Anbietern von Bootshebeanlagen keine Rückmeldungen bezüglich des Blauen Engels. Da diese Gruppe aber im Hinblick auf die Wirksamkeit gegen Bewuchs (keine Nachweise nötig) und auch die Gefährdung der Gewässer durch Inhaltsstoffe sehr unproblematisch einen Antrag stellen kann, sollten diese Hersteller mit oder nach der Veröffentlichung der Vergabekriterien nochmals kontaktiert werden.

Tabelle 11: Anbieter von Bootshebeanlagen (nur für Freizeitschiffe)

Hersteller	Schwimmend / landgestützt	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
ASCOM S.p.A.	landgestützt	https://www.ascom-italy.it/	nein
Boatlifteurope M. Kahms	schwimmend	http://www.boatlifteurope.de/	nein
Bootshaus am Werlsee	landgestützt	http://www.fangschleuse.de/	nein
bootslift.at	landgestützt	http://www.bootslift.at/	nein
Burchardi Wasserbau GmbH	landgestützt	http://www.burchardi-wasserbau.de/	nein
Eisl & Söhne GmbH	landgestützt	https://eisl-soehne.at /	nein
HydroHoist, LCC.	beides	https://hydrohoist.com/	nein
Iguana Yachts	schwimmend	http://iguana-yachts.com/	nein
J.W. Schaefer	schwimmend	http://www.schaefer-mv.de/	nein
Ortner-Boote GmbH / sunstream boat lifts	beides	https://ortner-boote.com/ https://sunstreamcorp.com	nein
P & B Innovation GmbH	schwimmend	http://www.boat-lifter.com/	nein
Wassereinbauten Strutz	landgestützt	http://www.wassereinbauten.at/	nein

4.3.5 Ultraschallanlagen

4.3.5.1 Wirkungsprinzip und Erfahrungen

In der Fachliteratur finden sich verschiedene Arbeiten zur Anwendung von Ultraschall als Antifoulingssystem. Hauptanwendungsbereiche von Ultraschallwellen sind die Bekämpfung von Blaualgenblüten in Wasserspeichern oder Teichen ([Park et al. 2017a](#)), die Ballastwasseraufbereitung von Schiffen ([Estévez-Calvar et al. 2018](#); [Holm et al. 2008](#)) und die Anwendung als Antifoulingmaßnahme auf Bootsrümpfen insbesondere gegen Seepocken und Muscheln ([Guo et al. 2011](#); [2012](#)). In einer Literaturstudie von [Legg et al. \(2015\)](#), die im Rahmen des EU-Cleanship-Projektes erstellt wurde, wird beschrieben, dass bei einer Frequenz von etwa 20 kHz die optimale Wirkung erzielt wird, wobei in verschiedenen Studien mit Ultraschallfrequenzen zwischen 20 und 100 kHz gearbeitet wurde. Zum Vergleich: Der für Menschen hörbare Frequenzbereich liegt zwischen 20 Hz und 20 kHz, für die Anwendung des Echolots wird meist eine Frequenz um 50 kHz eingesetzt (<https://de.wikipedia.org/wiki/Echolot>, Zugriffsdatum 4.3.2020).

Während die Angabe der verwendeten Frequenzen klar definiert ist, wird die Angabe des Schalldruckes bzw. der Schallintensität in unterschiedlichen Einheiten (Watt, Dezibel, kPa) angegeben. Die Angaben lassen sich zwar ineinander umrechnen, die zugrunde liegenden physikalischen Annahmen sind jedoch sehr komplex ([Anonym, 2020](#)). Der Schalldruck ist von Bedeutung, da ab einer gewissen Intensität das Phänomen der Kavitation auftritt. Ein Teil der Wirkung von Ultraschall gegen Foulingorganismen wird auf diese Kavitationskräfte zurückgeführt. Allerdings wird weiteren, sogenannten Sub-Kavitations-Effekten weitgehend unbekannter Natur, wie z. B. die Vibration selbst, eine Antifoulingwirkung zugeschrieben ([Legg et al. 2015](#)). Als unerwünschter Effekt der Kavitation wird der sogenannte Kavitationsfraß (Herausbrechen von Partikeln durch mechanische Beanspruchung) beschrieben (<https://de.wikipedia.org/wiki/Kavitation>, Zugriffsdatum 4.3.2020). Solche Ergebnisse aus einer Kombination von Ultraschall mit bioziden oder selbstpolierenden Anstrichen können nicht bewertet werden, da die Wirkung der Anstriche hier eine entscheidende Rolle spielt.

Hinweis:

Zum EU-CLEANSHIP-Projekt (Prevention and detection of fouling on ship hulls, Laufzeit 2012 bis 2014), das sich explizit mit der Anwendung von Ultraschall als Antifoulingmaßnahme beschäftigte, wurden mit Ausnahme der Literaturstudie von [Legg et al. \(2015\)](#) keine weiteren Fachpublikationen, sondern lediglich Hinweise auf Tagungen zitiert.
<https://cordis.europa.eu/project/id/312706/reporting>

[Choi et al. \(2013\)](#) untersuchten den Einfluss der Vibration gegen die Ansiedlung von Foulingorganismen. In der Studie wurden Platten über 3 Monate in Meerwasser (Port Phillip Bay, Australien) exponiert und mit Frequenzen zwischen 70 und 445 Hz behandelt (also im hörbaren Bereich). Seepocken waren die einzigen Fouling-Organismen, die sich durch die angewendete Vibration in signifikant geringerer Anzahl anhefteten. Insbesondere bei Frequenzen von mehr als 260 Hz wurde eine verringerte Anhaftung von Seepocken beobachtet, während niedrigere Frequenzen im Bereich von 70–100 Hz wenig oder keine Wirkung hatten. Die Ansiedlung anderer Fouling-Organismen wie Röhrenwürmer, Bryozoen, Seescheiden und Algen war durch die Vibrationen nicht beeinträchtigt.

Im Bewuchs-Atlas des Instituts für Limnische und Marine Forschung (LimnoMar), der nun vom Umweltbundesamt fortgeführt wird, wird ebenfalls beschrieben, dass die reinigende Wirkung von Ultraschallanlagen auf dem Prinzip der Kavitation beruht, d. h. es werden Mikrobubbles erzeugt, die implodieren und dabei einen hohen Anstieg der Temperatur und des Druckes erzeugen und dabei freie Radikale mit starken oxidativen Eigenschaften hervorrufen. Allerdings

sind die Herstellerangaben diesbezüglich widersprüchlich (Umweltbundesamt 2020). In der Literatur ist auch beschrieben, dass bei der Anwendung von Ultraschall (20 kHz, Schallintensität 3,6 bis 5,9 W/cm²) Wasserstoffperoxid, ebenfalls ein biozider Wirkstoff, freigesetzt wird (Ziembowicz et al. 2018). Hier wäre zu klären, ob die physikalische Wirkung der Kavitation überwiegt (nicht-biozid) oder ob die Wirkung überwiegend über die Bildung freier Radikale hervorgerufen wird (in-situ Biozidverfahren). Die US-Systeme, bei denen Biozide gebildet und freigesetzt werden, kommen voraussichtlich für einen Blauen Engel nicht in Betracht.

In einem Übersichtsartikel diskutierten Park et al. (2017a) die Wirksamkeit von Ultraschall gegen das (Blau-)Algenwachstum. Die Autoren führten sowohl Laborversuche als auch Pilotstudien in Wasserbecken und Seen vor. Hierbei bestimmten sie auch die Abnahme des Schalldrucks in Abhängigkeit von Entfernung vom Ultraschallgenerator und der Frequenz (35 - 46 kHz bis 275 - 300 kHz). Generell nimmt der Schalldruck rasch mit der Entfernung ab (rd. 60-90 % nach 2 m). Die Autoren schlussfolgern, dass sich Blaualgen mit der Ultraschalltechnik mit geringem Aufwand (Aufwand an elektrischer Leistung 40-80 Watt) kontrollieren lassen.

Park et al. (2017b) führten einen Praxistest zur Effektivität der Ultraschallbehandlung als Antifoulingmaßnahme mit einem Bohrschiff von 228 m Länge durch. Nach Einschätzung der Autoren handelte es sich um den ersten derartigen Praxistest mit einem größeren Schiff. Hierzu wurden sechs Ultraschallsender (23 kHz, intermittierend, 214 dB, 53 kPa) gleichmäßig um die Steuerbordseite verteilt. Die Schallintensität reichte aus, um Kavitationseffekte zu erzeugen und die Ansiedlung von marinen Fouling-Organismen zu verhindern. Nach vier Monaten aufgenommene Unterwasserfotos zeigten saubere Platten auf der Steuerbordseite, aber starkes Fouling auf der Backbordseite. Die Autoren sehen die Ultraschallbehandlung als eine vielversprechende Antifoulingmethode auch für größere Schiffe an. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Auswirkungen von Ultraschall auf die Schiffsstruktur oder auf die Ablösung der Beschichtung in der kurzen Versuchszeit nicht untersucht werden konnte.

Guo et al. (2011) beobachteten eine reduzierte Anhaftung von Rankenfußkrebse (z. B. Entenmuscheln) mit zunehmender Expositionszeit und Ultraschalldruck. Die Anregungsfrequenz von 23 kHz zeigte die effektivste Hemmung. Die parallel untersuchte Ultraschall-Kavitation ließ vermuten, dass die Cyprislarven physikalisch geschädigt werden. Dies wurde auch schon in der Arbeit von Branscombe & Rittschof (1984) beobachtet, die in Laborexperimenten eine signifikante Hemmung der Anhaftung der Cyprislarven durch Ultraschall niedriger Frequenz (30 Hz) beobachteten.

Teilweise lassen sich aus den anderen Anwendungsbereichen durchaus Daten zu den physikalischen Grundlagen ableiten. Beispielsweise bestimmten Estévez-Calvar et al. (2018) die Elimination früher Lebensstadien von Seepocken (*Amphibalanus amphitrite*), Rädertierchen (*Brachionus plicatilis*) und Salzkrebse (*Artemia salina*) durch Ultraschall (20-22 kHz, 200 Watt, nach 30-60 Sekunde) in Anhängigkeit von Material und der Entfernung des Ultraschallgenerators. Hierbei stellten sie deutliche Mortalitäten fest, die allerdings in einem Meter Entfernung von der Schallquelle bereits nicht mehr nachweisbar waren.

Holm et al. (2008) untersuchten die Wirksamkeit von Ultraschall (19-20 kHz) gegenüber verschiedenen Organismengruppen zur Ballastwasserbehandlung. Die Wirksamkeit variierte mit der Größe des Testorganismus. Zooplankton benötigte für eine 90 %ige Verringerung nur 3-9 Sekunden und 6-19 J/ml Ultraschallenergie während Bakterien und Phytoplankton 1 - 22 Minuten und 31-1240 J/ml benötigten.

Hinsichtlich der Wirkung von Ultraschall gegen Nichtzielorganismen liegen nur wenige Arbeiten vor: In einer Studie der Universität Wageningen (Niederlande) wurde im Labormaßstab festgestellt, dass Ultraschall mit Frequenzen von 20 kHz, 28 kHz, 36 kHz und 44 kHz, wie er für die Bekämpfung von Cyanobakterien und Algenblüten eingesetzt wird, auch eine 100 %ige

Mortalität gegenüber dem Zooplanktonorganismus *Daphnia magna* ausübt. Mit Zunahme der Ultraschallfrequenzen war auch die tödliche Wirkung gegenüber Daphnien beschleunigt. In einem Langzeitexperiment über 25 Tage in einem 85 Liter Tank war die Daphnienpopulation deutlich geschädigt und führte so zu einer Erholung der Algenpopulation (Lürling & Tolman 2014). Allgemein wird der Schutz vor anthropogenem Lärm unter Wasser insbesondere für die marine Umwelt durchaus thematisiert, da Schall für die Organismen zur Kommunikation und Navigation sowie zur Identifikation anderer Lebensformen genutzt wird. Unterwasserlärm könnte daher zu Verhaltensänderungen führen (Legg et al. 2015). Park et al. (2017) verweisen auf die Studie von Southall et al. (2008), wonach Meeressäugetiere, die über 24 Stunden Geräuschen über 230 dB ausgesetzt sind, Verhaltensstörungen entwickeln. Da der Hörbereich vieler Meeressäuger, darunter auch der der in der Nordsee beheimateten Schweinswale (16 - 140 kHz, Kastelein et al. 2017) beinahe deckungsgleich mit den als Fouling-Schutz verwendeten Frequenzen ist, kann eine negative Beeinflussung der Tiere nicht ausgeschlossen werden. Die Ultraschallfrequenzen liegen jedoch weit über den Hörbereichen fast aller Fischarten.

In einer Übersichtsstudie des niederländischen RIVM wurde festgestellt, dass sich zahlreiche Ultraschallsysteme gegen Foulingorganismen auf dem Markt befinden, die nur zum Teil für sich reklamieren, auf dem Kavitationsprinzip zu beruhen. Diese sollen nach Herstellerangaben mit Ausnahme von Holzrümpfen auf allen Rumpffarten funktionieren. Während sich auf den Herstellerwebseiten und in Internetforen zahlreiche wohlwollende Erfahrungsberichte von Bootseignern finden, konnte in dieser Studie kein wissenschaftlicher Nachweis von unabhängiger Stelle gefunden werden, dass Ultraschallsysteme eine ausreichende Wirksamkeit gegen Makrobewuchs haben (Wezenbeek et al. 2018).

In der Produktliste von LimnoMar "Biozidfreie Beschichtungen und Verfahren für den Bewuchsschutz" (Stand September 2019) wurden Ultraschall-Anlagen nicht berücksichtigt, da sie nach bisherigen Erfahrungen unwirksam sind (Watermann mdl. Mitt.). Im EU-Change-Projekt wurde nach Angaben von vier Bootseignern eine mangelnde Effektivität von Ultraschallanlagen festgestellt (Strand et al. 2019).

Sollte für eines dieser Systeme eine Zertifizierung mit dem Blauen Engel angedacht sein, so müsste im Vorfeld abgeklärt werden ob und in welchem Umfang freie Radikale, Wasserstoffperoxid etc. gebildet werden und ob dies eine Einstufung als Biozidprodukt notwendig macht.

Es sei darauf hingewiesen, dass neben Ultraschall (> 20 Hz) auch die Anwendung von Infraschall (< 16 Hz) angeboten wird. Die Wirkung von niederfrequentem Schall wird damit erklärt, dass z. B. die Larven von Rankenfußkrebse den Schall als Anwesenheit von Räubern wahrnehmen. In der ausführlichen Studie zur Alternativenbewertung von bioziden Antifoulingbeschichtungen wurden jedoch sowohl den Systemen Sonihul und Ultra-System (Ultraschall) als auch dem System Marcelo (Infraschall, EMCS Industries, Anbieter in EU nicht bekannt) fehlende Wirksamkeitsnachweise attestiert. (Anonym 2017). Zur Wirkung von Infraschall wird lediglich auf die oben zitierte Studie von Branscombe & Rittschof (1984) verwiesen, die allerdings ergab, dass lediglich im Ultraschallbereich bei 30 Hz eine Wirkung erzielt wurde, nicht jedoch im Infraschallbereich bei 15 Hz. Die für die Navigation in der Schifffahrt mittels Echolots verwendeten Frequenzen liegen heute überwiegend über 50 kHz, für Tiefwasser-Echolote werden auch Frequenzen von 10 bis 20 kHz genutzt.¹²

4.3.5.2 Marktrecherche

Es wurde eine aktuelle Marktstudie zum Einsatz von Ultraschallanlagen als Antifoulingssystem durchgeführt. Grundlage waren Internetrecherchen und die Durchsicht von Anbieter-

¹² <https://de.wikipedia.org/wiki/Echolot> (letzter Zugriff 18.1.2022)

verzeichnissen von Bootsmessen (Interboot 2019 Friedrichshafen, Boot Düsseldorf 2020). Insgesamt wurden sieben Herstellerfirmen identifiziert, denen ein auf Ultraschallsysteme angepasster Fragebogen zugeschickt wurde (Tabelle 13). Nach einem Erinnerungsschreiben stellten sechs Hersteller den ausgefüllten Fragebogen zur Verfügung, ein weiterer erklärte, Ultraschallsysteme aus dem Programm genommen zu haben.

Die Auswertung der Fragebögen ergab, dass die Schallintensität meist in Watt angegeben wird (vgl. Tabelle 12). Lediglich die Fa. Shipsonic gab an, dass die Schallintensität von 80-120 Watt rd. 153 dB entspricht. Die Firma Shipsonic verneinte, dass die Wirkung ihres Ultraschallverfahrens auf der Kavitation beruht, die Fa. Sonihull teilte mit, dass die Schallintensität an der Schwelle zur Kavitation (non-inertial) läge, während die Firmen Electronic Fouling Control, Harsonic und UltraSystem bejahten, dass der Effekt auf einer leichten bzw. geringen Kavitation beruht.

Hinsichtlich der Eignung für verschiedene Rumpfmateriale schließen alle Hersteller die Anwendung für Holzbooten wegen der Schalldämpfung aus. GFK-Rümpfe werden von fünf der sechs Firmen ebenfalls als geeignet angesehen (Ausnahme Hasytec). Alle anderen Rumpftypen (Stahl, Aluminium) werden als geeignet angesehen. Zudem wird Ultraschall herstellenseits auch für andere Oberflächen (Kühler, Schiffsschrauben, Seewasserrohre etc.) empfohlen. Ein oberes Limit für die Schiffslänge besteht nicht.

Nur die Firma Shipsonic verneint die Eignung von Ultraschall in Kombination mit bioziden Anstrichen, andere Firmen schließen biozide Beschichtungen nicht grundsätzlich aus, verweisen jedoch darauf, dass diese nicht notwendig seien. Zu silikonbasierten Antihafanstrichen, selbstpolierenden Anstrichen und faserbasierten Oberflächen liegen widersprüchliche Angaben vor (vgl. Tabelle 13). Hartbeschichtungen werden als beste Option für die Kombination mit Ultraschall angesehen.

Tabelle 12: Eignung von Ultraschall hinsichtlich verschiedener Oberflächen

Hersteller	Biozid-haltig	Antihaft-Silikon	Antihaft-Folien	Selbst-polierend	Fasern	Hart-anstriche
Electronic Fouling Control	Ja	ja	Ja	Ja	Nicht getestet	Ja
Harsonic Biofilm Removal	Ja	Nein	Ja	Nein	nein	Ja
HASYTEC Electronics	Ja	nein	nein	ja	nein	ja
Shipsonic	Nein	ja	Ja	Nein	ja	Ja
Sonihull	Ja	nein	Ja	Ja	ja	Ja
UltraSystem	Ja	nein	Nicht getestet	ja	ja	Ja

Hinsichtlich des Wirksamkeitsnachweises verweisen die Hersteller auf Kooperationen mit verschiedenen Forschungsinstituten und Universitäten (Shipsonic: Technical University Eindhoven, Technical University Delft, Royal Dutch Institute for the Exploration of the Sea (NIOZ), University of Applied Sciences Vlissingen; Harsonic: University Newfoundland, French marine). Die Fa. Ultrasystem bezieht sich auf Erfahrungsberichte von Schiffseignern, die auf ihrer Webseite wiedergegeben sind und diverse Publikationen (allerdings mit Schwerpunkt der Algenbekämpfung). Die Fa. Shipsonic bietet Kunden, die über ihre Erfahrungen mit dem Ultraschallsystem berichten, eine 30 %ige Kostenreduktion an. Auch die Fa. Hasytec verweist

ausschließlich auf Erfahrungen von Kunden. Eindeutige Wirksamkeitsnachweise von unabhängigen Instituten wurden bisher nicht vorgelegt. Die Firmen wurden nochmals angeschrieben und um weitergehende Informationen gebeten.

Bezüglich der für Ultraschallanlagen verwendeten Materialien sind neben der elektrischen Ausrüstung insbesondere Epoxidharzkleber zu erwähnen, mit denen die Schallumformer an der Schiffswand befestigt werden.

Ein Einfluss der Ultraschallverfahren auf Nichtziel-Organismen wie Fische oder Robben wird von allen Herstellerfirmen verneint. Die Fa. Shipsonic gibt lediglich an, dass Säugetiere den „Schall hören könnten“. Auch Emissionen von Nanopartikeln, Mikroplastik durch Abrasion oder die Auswaschung gefährlicher Stoffe werden herstellerseits nicht angenommen.

Die Stromleistung wird für jede Einheit mit etwa 4-20 Watt, bei einer Spannung von 12 bis 24 Volt, angegeben, die über Landstrom und/oder Batterien bereitgestellt wird.

Die Kosten für die Installation von ca. 10 Ultraschallumformern, die für etwa 50 m² Fläche bzw. ein Schiff mit 15 m Wasserlinie ausgelegt sind, werden mit rd. 1000 – 2000 € angegeben.

Es sei darauf hingewiesen, dass in-situ erzeugte freie Radikale derzeit als biozider Wirkstoff im Rahmen der Biozidprodukte-Zulassung (Verordnung (EU) Nr. 528/12) bewertet werden. In einem Leitfaden der bewertenden Behörden wird die Erzeugung freier Radikale über Elektroden, UV oder Photokatalyse thematisiert, nicht aber die über Ultraschall (European Commission, 2016). Die gezielte in-situ Erzeugung von Wasserstoffperoxid wird ebenfalls vom Biozidrecht erfasst. Bisher wird davon ausgegangen, dass die physikalische Wirksamkeit von Ultraschall im Vordergrund steht und die Erzeugung freier Radikale oder Wasserstoffperoxid ein nicht intendierter Nebeneffekt ist. Somit wäre Ultraschall nicht als biozides Verfahren zu werten.

Zusammenfassend sollte, um eine Lärmbelastung der Gewässerfauna zu begrenzen oder auszuschließen, an die Ultraschall-Emissionen fachlich fundierte Anforderungen bezüglich Frequenzen, maximalem Schalldruck und Schalldauer (Exposition) gestellt werden.

Tabelle 13: Anbieter von Ultraschallanlagen als Antifoulingssystem

Hersteller	Webseite	Frequenzbereich kHz	Lautstärke Watt	Steckbrief ausgefüllt
Electronic Fouling Control (früher SonicShield)	http://ultrasonicantifoulingworks.co.uk	20 – 40	50	ja
Harsonic Biofilm Removal	http://www.harsonic.com	20 – 100	6, 20	ja
HASYTEC Electronics GmbH	https://www.hasytec.de/	20 - 60	10 - 20	ja
Keelcrab (ULTRACRAB)	http://www.keelcrab.com/en/	Multifrequency	Keine Angaben	nein
Shipsonic	http://www.shipsonic.nl	20 - 45	80, 100, 120	ja
Sonihull	http://www.sonihull.com	19,5- 55	50	ja
UltraSystem	http://www.ultrasonic-antifouling.com	20 – 140	9 – 20	ja

4.3.6 Unterwasserplanen

4.3.6.1 Wirkungsprinzip und Erfahrungen

Zur Anwendung von Unterwasser-Planen und -Matten als Antifoulingmaßnahmen wurde in einem vorangegangenen Projekt eine Fallstudie durchgeführt, die auf einem nationalen Workshop vorgestellt und diskutiert wurde ([Gartiser et al. 2018](#)). Die SLIP UnderWaterCoat Folie wird unter das Schiff gezogen und befestigt. Anschließend wird das Wasser zwischen der Folie und dem Rumpf abgepumpt, so dass sich die Folie eng an den Rumpf anlegt. Eine Zugabe von Essigsäure zur Auflösung von Kalkschalen ist für ein Produkt mit Blauem Engel nicht zulässig.

In der Literaturrecherche wurde die Arbeit von [Atalah et al. \(2016\)](#) gefunden, in der Laborversuche und ein Praxisversuch zur Methode des „Einpackens“ bzw. „Einkapselns“ als Antifoulingmaßnahme wissenschaftlich beschrieben sind. Im Feldversuch dienten mit Wasser gefüllte Plastikbehälter aus 20 L HD-Polyethylen als Modell, die 4 Jahre im Yachthafen von Nelson (GB) dem Fouling ausgesetzt waren. Durch Einpacken des zu schützenden Objektes (Schiffsrumpf, Bootsstege, Schwimmplattformen etc.) mit einer PVC-Folie über ein bis 18 Tage wurden die anhaftenden Organismen von Licht und Nährstoffen abgekoppelt, der Sauerstoffgehalt des eingeschlossenen Wassers sank und es bildete sich Sulfid. Dadurch starb der anhaftende Bewuchs ab, wobei Seescheiden empfindlicher waren als Miesmuscheln. Durch Zugabe von Essigsäure oder Chlor ließ sich im Praxisversuch der Prozess von empfohlenen 15 Tagen auf etwa 2 Tage verkürzen.

[Roche et al. \(2015\)](#) untersuchten in einer Marina in Wales die Methode des „Einkapselns“ von Booten im Wasser in Hinblick auf die Verhinderung des Einschleppens fremder Arten am Beispiel der invasiven Seescheidenart *Didemnum vexillum*. Üblicherweise dienen Einkapselungsverfahren von Booten dazu, anoxische Bedingungen herzustellen, wodurch der Bewuchs abstirbt. Allerdings werden hierfür mehrere Tage benötigt, in denen das Schiff nicht genutzt werden kann. Die Autoren schlagen daher vor, den Liegeplatz als „Dekontaminationsplatz“ umzufunktionieren und die Entfernung des Bewuchses durch Essigsäure oder Natriumhypochlorit zu beschleunigen. Allerdings ist die Verfügbarkeit und Verwendung von Einkapselungsmethoden bislang nicht weit verbreitet. Zudem sind Essigsäure und Natriumhypochlorit als biozide Wirkstoffe zugelassen, so dass es dann auch als biozides Verfahren eingestuft werden müsste.

Das Problematische bei diesen Methoden ist, dass der Bewuchs dann zwar abgestorben ist, aber immer noch am Untergrund haftet. Insbesondere Muscheln und Seepocken mit kalkhaltigen Schalen bzw. Platten müssen dennoch mechanisch entfernt werden. Die Haftung von Seepocken bleibt unverändert fest. Ähnlich ist es auch bei der Ostasiatischen Seescheide *Styela clava*, deren englischer Name „Leathery Sea-Squirt“ bereits verrät, dass sie einen lederartigen Mantel aufweist, der nur sehr schwer entfernt werden kann. Ein Einsatz von Essigsäure oder Chlor kommt nicht in Frage, da sie als biozide Wirkstoffe zugelassen sind. Insofern sind diese vorgestellten Methoden allenfalls für eine Verhinderung von initialem Bewuchs, aber nicht für eine Entfernung von Bewuchs geeignet.

Als weiteres Verfahren wurden Matten betrachtet, die am Liegeplatz verbleiben. Hierbei wird der Bewuchs beim Auffahren abgerieben. Daher ist es nur für Motorboote ohne Kiel geeignet. Zu nennen ist hier das SEABOOST-POWERTURF-Verfahren, bei dem eine schwimmende, mit Bürsten bzw. Noppen besetzte Matte eingesetzt wird. Das Schiff fährt auf die Matte am Steg oder Schwimmsteg und der Rumpf wird durch die ständigen Bewegungen aufgrund von Wind, Wellen und Strömungen über Reibungskräfte gesäubert. Ein ähnliches Verfahren wird in Schweden unter dem Namen „Clean Marine Tarp“ vermarktet. Die aus drei Polyolefinschichten bestehende Schwimmmatte sorgt für einen engen Kontakt zwischen Bootsrumpf und Matte und verhindert

durch die Reibung eine Ansiedlung von Foulingorganismen. Die Auftriebskraft wird mit rd. 50 N/m² angegeben (zu Details siehe [Gartiser et al. 2018](#)).

4.3.6.2 Marktrecherche

Aus der Produktgruppe der Unterwasserplanen wurden ein finnischer, ein schwedischer und ein slowenischer Hersteller kontaktiert. Für das schwedische Produkt Clean Marine Tarp wurde Interesse am Blauen Engel bekundet und ein Steckbrief eingereicht.

Tabelle 14: Anbieter von Unterwasserplanen

Hersteller	Produkt(e)	Anwendung	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
Seaboost Oy	Powerturf	Freizeit	https://seaboost.fi	nein
SLIP	Slip UnderWaterCoat	Freizeit	http://www.slipboat.si	nein
Ekeröds Utveckling	Clean Marine Tarp	Freizeit	https://cleanmarine.se	ja

Das System Clean Marine Tarp der schwedischen Firma Ekeröds Utveckling ist eine Plane mit Anteilen von Polythylen (PE) und Polypropylen (PP), die am Liegeplatz eines bis zu 10 Meter langen Bootes befestigt wird. Beim Anlegen fährt das Boot auf die Plane, die dann seitlich am Rumpf hochgezogen wird. Die Plane liegt somit direkt am Rumpf und verhindert so den Zugang der Larven von Muscheln, Seepocken und den Sporen der Algen. Das System wurde im EU-BONUS-Projekt CHANGE in der Ostsee erprobt.

4.3.7 Sonstige Verfahren

4.3.7.1 Wirkungsprinzip und Erfahrungen

Luftblasensysteme

Schon in den vierziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurde von der US-Navy ein sogenanntes "Prairie Masker" zur Minderung der Geräuschkentwicklung von Schiffen und insbesondere von U-Booten entwickelt. Das „Prairie“ System ist mit dem Propeller verbunden, das „Masker“-System mit dem Rumpf. Durch die Ausströmung von Luftblasen wird sehr effektiv akustische Energie reflektiert, so dass durch den erzeugten Luftblasenvorhang akustische Signale abgefangen werden. Gleichzeitig stellte sich heraus, dass die Luftblasen zu einer Verminderung des Reibungswiderstands führten (<https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/systems/prairie.htm> und <https://fas.org/man/dod-101/sys/ship/weaps/prairie.htm>).

Auch in den siebziger Jahren wurden Ideen für eine Verminderung des Reibungswiderstands von Schiffsrümpfen durch die Erzeugung eines dichten Vorhangs aus Luftblasen entwickelt. Diese Annahmen waren von Anfang an sehr umstritten und wurden immer wieder in Zweifel gezogen ([Foeth et al. 2010](#)). Nach anfänglich sehr optimistischen Annahmen zur Reibungswiderstandsminderung von bis zu 20 % ([Kato & Kodama 2003](#)) mussten diese zunehmend nach unten korrigiert werden.

In einer Arbeit von [Bullard et al. \(2010\)](#) werden Praxisexperimente beschrieben, die sich mit einer Reduzierung von Foulingorganismen durch eine kontinuierliche Belüftung von Unterwasser-Oberflächen beschäftigt. Hierzu wurden Versuchsplatten (10 x 10 cm) aus PVC und Beton mit oder ohne kontinuierliche Belüftung an einem Schwimmsteg in Long Island (USA) einer benthischen Fouling-Biozönose ausgesetzt. Die Belüftung erfolgte 0,5 m unterhalb der

senkrecht eingetauchten Platten mit einer Fließrate von 3 bis 5 L/Minute. Nach 1 und 4 Wochen wiesen die belüfteten Platten einen deutlich geringeren Bewuchs auf als die nicht belüfteten Kontrollen. Allerdings war ein direkter Kontakt der Oberflächen zu den Luftblasen erforderlich. Der genaue Mechanismus des Belüftungseffekts ist unklar: Es wurde beobachtet, dass die Blasen, wenn sie auf die Oberfläche trafen, kurz anhafteten und dann langsam abrollten. Somit kann die Belüftung Larven oder kleinere Tiere von den Oberflächen wegdrücken oder beschädigen.

Menesses et al. (2017) untersuchten die Wirkung einer kontinuierlichen Belüftung auf die Entwicklung von Foulingorganismen. Hierzu nutzen sie einen Prüfstand mit um 22,5° geneigten Epoxid-Platten, um die Form eines Schiffsrumpfes zu simulieren. Der Luftstrom von 150 mL/Min. wurde über 3,2 mm Düsen erzeugt. Der Luftstrom verhinderte in seinem Einflussbereich deutlich die Ansiedlung und das Wachstum von Foulingorganismen. Letztlich erzeugt der Auftrieb der Luftblasen eine Wasserströmung an der Oberfläche und damit mechanische Scherkräfte. Allerdings scheinen noch weitere Effekte für die Wirkung verantwortlich zu sein, da die gemessenen Wasserströmungsgeschwindigkeiten im Bereich der Belüftung deutlich niedriger lagen als 55 cm /Sekunde, durch die bei der Fahrt durch Wasser ein Biofoulingwachstum verhindert werden kann.

Aktuell wirbt Mitsubishi mit Treibstoffeinsparungen von 5 % je nach Rumpfform (Kawabuchi et al. 2011). Neben einer Diskussion über die optimale Größe der Luftblasen, ihrer Dichte und Verteilung auf dem Flachboden und die Wirkungsweise in Abhängigkeit der Entfernung zu den Düsen, zeigten erste Praxisversuche, dass die Düsen im Hafen ständig mit elektrolytisch erzeugtem Chlor durchströmt werden mussten, damit sie sich nicht zusetzten. Auch hierbei handelt es sich um eine genehmigungspflichtige in-situ Biozidanwendung.

2012 sollte Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) zwei Neubauten von Kreuzfahrt-Schiffen für die Reederei AIDA Cruises fertigen, die zur Carnival Corporation gehört. Es gab aber erhebliche Schwierigkeiten beim Bau der Schiffe, sodass AIDA wieder zur Meyer Werft wechselte. In diese Schiffe wurde erstmals das „Mitsubishi Air Lubrication System“ (MALS) eingebaut. MALS ist eine MHI Technologie, die den Treibstoffverbrauch um 7 % und somit die gasförmigen Emissionen senken sollte. Es war das erste Mal, dass MALS in einem Kreuzfahrtschiff eingebaut wurde. Beide Schiffe befinden sich seit 2015 und 2016 im Dienst. Zuvor hatte Mitsubishi an zwei Frachtern gezeigt, dass ein Treibstoffersparnis von 13 % erreicht werden konnte. Für Massengutfrachter entwickelte MHI in Verbindung mit einem speziellen Rumpf- und Antriebsdesign eine Treibstoffersparnis, die 25 % weniger CO₂-Emissionen erreichen soll. Kürzlich unterzeichnete MHI mit der Grimaldi Reederei und einem dänischen Schiffdesigner einen Kontrakt zum Bau von sechs Fähren mit autonomer elektrischer Versorgung im Hafen, MALS System und nicht-bioziden Foul-Release Coatings. (<https://www.mem-online.com/news/article/grimaldi-newbuilds-based-on-cg5g-battery-powered-design-concept.html>). Dahinter steckt die unausgesprochene Hoffnung, dass das MALS System in Verbindung mit einer Antihalt-Beschichtung deren Bewuchsschutz-Effektivität erhöht. Es bleibt abzuwarten, ob dieses eintritt.

UV-Systeme

Eine Forschungsgruppe um K.Z. Hunsucker hat in Florida die Antifoulingseigenschaften von UVC-Strahlung (100 - 280 nm) untersucht. Es wurde getestet, welcher Abstand von der UVC-Lampe ideal ist und welche Bestrahlungsintervalle nötig sind, um Fouling zu verhindern. Es zeigte sich, dass kürzere Intervalle (Makro-) Fouling effektiver verhindern. Bei dauerhafter Bestrahlung war auf allen Platten nicht einmal ein Biofilm zu finden.

Während die Epoxid- und die Silikonbeschichtung keinerlei Schäden durch die UV-Strahlung zeigten, war eine Kupfer-Antifouling stark ausgebleicht und an einigen Stelle bis auf die darunter liegende Epoxidbeschichtung erodiert.

Wegen technischer Schwierigkeiten und dem erhöhten zeitlichen Aufwand wurde ein Reinigungseinsatz mit UVC-Lampen am Schiffsrumpf durch AUV's bzw. ROUV's verworfen. Denkbar ist eine wirtschaftliche Anwendung allenfalls an schwer erreichbaren Stellen eines Rumpfes wie Seekästen oder Kühlwasserleitungen (Hunsucker et al. 2019).

AkzoNobel entwickelt momentan zusammen mit Philips eine Folie mit integrierten UV-LEDs, die auf den Schiffsrumpf aufgebracht werden kann. Das Licht der LEDs wird durch Totalreflexion in der Folie gestreut, um eine flächendeckende Wirkung zu erzielen (Hijnen & Jongerius 2018). Aber auch diese Technologie ist noch in einem frühen Entwicklungsstadium, so dass noch keine Marktprodukte existieren.

Braga et al. (2020) untersuchten den Einsatz von UVC-Licht ($\lambda = 254 \text{ nm}$) als umweltfreundliche Antifouling-Alternative in Abständen von 25 mm bis 275 mm mittels PVC-Platten, die auf einer Nautilus-Plattform (in Anlehnung an die Form einer Nautilus-Schale) exponiert waren. Nach zwei Monaten kontinuierlicher Exposition wurde kein Fouling auf den UV-exponierten Platten festgestellt, während die Kontrollplatten vollständig bewachsen waren. Bei einer einminütigen UV-Exposition pro Tag war der Effekt deutlich weniger ausgeprägt aber noch erkennbar. Ein bereits existierender Fouling-Bewuchs mit Entenmuscheln konnte nach kontinuierlicher UV-Exposition über 1 Monat bis zu einem Abstand von ca. 175 mm deutlich reduziert/abgetötet werden.

Lasersysteme

Das Laserzentrum Hannover entwickelt im BMWi-Projekt FouLAS ein technisches Bewuchsschutzsystem durch Laserbestrahlung. Erste Ergebnisse klingen vielversprechend, aber bis zur Marktreife ist noch ein weiter Weg (Emde et al. 2021).

4.3.7.2 Marktrecherche

Laser- und UV-Systeme befinden sich noch in der Entwicklung und sind noch nicht auf dem Markt erhältlich. Luftblasensysteme werden von der US Navy nur für eigene Schiffe verwendet und die Firma Mitsubishi wurde nicht kontaktiert, da diese auf dem europäischen Markt nicht aktiv ist.

Tabelle 15: Anbieter von sonstigen Verfahren

Hersteller	Produkt(e)	Art des Systems	Anwendung	Webseite	Steckbrief ausgefüllt
Mitsubishi	MALS	Luftblasensystem	Prof.	www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e481/e481053.pdf	nein
US-Navy	PRAIRIE	Luftblasensystem	Prof.	www.globalsecurity.org	nein

4.4 Ökotoxikologische Bewertung von Antifoulingbeschichtungen

4.4.1 Biozide Beschichtungen

Produkttestungen von Antifoulinganstrichen in Form einer Kombination von Leachingtests mit Ökotoxizitätstests sind ein gängiges Mittel in der Produktentwicklung. Die allermeisten Arbeiten hierzu wurden bisher allerdings mit bioziden Schiffsanstrichen durchgeführt: Carteau et al. (2014) untersuchten die ökotoxische Wirkung selbstpolierender Anstriche, die mit „nicht konventionellen“ Bioziden (Chlorhexidin, Zinkperoxid und Tween 85) in einer biologisch abbaubaren Polyestermatrix (Poly(methylmethacrylat-co-butylmethacrylat mit Polycaprolactom) ausgerüstet waren. Die Farben wurden auf Polycarbonatplatten (50 cm²) mit einer flüssigen Filmschicht von 200 µm aufgetragen. Als Organismen wurden Mikroalgen

(*Cylindrotheca*, *Closterium AC515*), Kieselalgen (*Phaedactylum tricornutum*), Crustaceen (*Acartia tonsa*), Muscheln (*Crassostrea gigas*) und Fische (Seebarsch) eingesetzt. Die antibakterielle und algizide Wirkung wurde anhand von Hemmhofstests bzw. Kontakttests ermittelt, während die Ökotoxizitätstests mit den formulierten Farben (mit Lösemittel Xylol) durchgeführt wurden. Aus den Versuchsergebnissen wurde ein Ranking der Toxizität der verschiedenen Biozide und die Optimierung der gewählten Konzentrationen abgeleitet.

Persooone und Castritsi-Catharios (1989) untersuchten Eluate von mit Antifoulingfarben beschichteten PVC-Platten mit Naupliuslarven von Salzwasserkrebschen (*Artemia*). Das Oberflächen-/Volumen-Verhältnis lag zwischen 2 und 50 mm²/mL (=20-500 cm²/L), die Testdauer bei 48 h. Es wurden deutliche Unterschiede zwischen den Anstrichen und klare Dosis/Wirkungs-Beziehungen beobachtet.

Ytreberg et al. (2010) verglichen die Freisetzungsraten von Kupfer und Zink aus Antifoulingbeschichtungen in Süß- und Salzwasser und ergänzten die Schwermetalluntersuchungen mit Ökotoxizitätstests. Hierzu wurden Petrischalen (10 cm²) mit den Beschichtungen bestrichen, getrocknet und dann in je 1 L Wasser für 14 d eluiert. Eingesetzt wurden Leuchtbakterien (*Vibrio fischeri*), marine Algen (*Ceramium tenuicorne*) sowie Copepoden (*Nitocra spinipes* und *Nitocra spinipes*). Die beobachteten Toxizitäten korrelierten gut mit den freigesetzten Kupfer- und Zinkkonzentrationen.

Rossini et al. (2019) bewerteten zwei kommerzielle Antifoulinganstriche auf Basis von Kupferoxid (25-50 %) und Zinkoxid (25-50 %) anhand von Lebenszyklusanalysen in Verbindung mit Mikrokosmos-Untersuchungen. Hierzu wurden die bestrichenen Metallplatten in sechs Mikrokosmen mit je 5 L Meerwasser exponiert und in Ergänzung Leuchtbakterientests von Eluaten zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt. Hierbei wurden nach einem Monat vergleichbare Freisetzungsraten von Kupfer und Zink (> 5 mg/L) sowie vergleichbare Ökotoxizitäten wie nach 2 Monaten Kontaktzeit bestimmt.

Amara et al. (2018) beschreiben in ihrem Reviewartikel die ökotoxischen Wirkungen verschiedener Antifoulingwirkstoffe. Allerdings werden hier nur die Wirkstoffe selbst und nicht deren auswaschbare Anteile in Eluaten ausgehärteter Anstriche betrachtet.

Oliveira et al. (2017) bestimmten die Ökotoxizität von drei Antifouling-Wirkstoffen (Tralopyril, Triphenylboranpyridin und Capsaicin) gegenüber Algen (*Chlamydomonas reinhardtii*), Crustaceen (*Daphnia magna*) und Fischembryonen (*Danio rerio*). Das Molluskizid Tralopyril und das in Asien eingesetzte Antifoulingmittel Triphenylboranpyridin sind als biozide Wirkstoffe anzusehen, für das aus Chilischoten gewonnene Alkaloid Capsaicin wäre dies zu überprüfen. Capsaicin hatte keine bzw. geringe Effekte auf Algen und Daphnien und Fischembryonen, während die beiden anderen Wirkstoffe stark ökotoxisch wirkten (z. B. EC₅₀ von Tralopyril gegenüber Fischembryonen 5 µg L⁻¹).

Die ISO/TC 35 „Paints and varnishes“ erarbeitete mehrere Standards zur Bestimmung des Auswaschverhaltens von Bioziden, die prinzipiell als Grundlage für die Definierung eines Leachingtests herangezogen werden könnten. Die DIN EN ISO 15181-1 beschreibt ein Auswaschverfahren von Bioziden aus künstlichem Meerwasser unter festgelegten Laborbedingungen. Die Antifoulingbeschichtung wird entsprechend den Anweisungen des Herstellers auf einen beidseitig wasserdicht verschlossenen Prüfzylinder mit einem Durchmesser von 64 ± 5 mm und einer Länge von 178 ± 15 mm aufgetragen und in einem Wasserbad (2 Liter Fassungsvermögen, Durchmesser 120 bis 150 mm) bei einer Drehzahl von 60 ± 5 U/min im kontinuierlichen Wasserstrom bei 25 °C exponiert. Nach 1, 3, 7, 10, 14, 21, 28, 31, 35, 38 und 42 Tagen werden ausgewaschene Biozide aus einer Meerwasserprobe extrahiert und quantifiziert. Eine ähnliche Methode, die ASTM D6903-07, wurde von Teilnehmern des Fachgespräches am 15.06.2021 vorgeschlagen. Allerdings zielen diese Methoden auf den

analytischen Nachweis von Bioziden in den Eluaten und die Bestimmung von Freisetzungsraten. Der Aufwand für diese Elutionstests wird als sehr hoch eingeschätzt. Erfahrungen bezüglich der Kopplung dieser Elutionsverfahren mit Ökotoxizitätstests liegen nicht vor. Zudem müssten bei Verwendung marinen Wassers auch Meerwasserorganismen verwendet werden. Daher wurde dieser Ansatz bei den Anforderungen hinsichtlich der Ökotoxizität des Eluats (Kapitel 5.7.2) nicht weiterverfolgt.

4.4.2 Nicht-biozide Beschichtungen

Zur Ökotoxizität von nicht-bioziden Antifoulinganstrichen liegen wenige Arbeiten vor: Karlsson et al. (2004) untersuchten die Ökotoxizität von fünf neuartigen nicht-bioziden Anstrichen (je 5 cm²), die auf Petrischalen ausgestrichen und mit 500 mL synthetischem Meerwasser über 2, 8, und 16 Wochen eluiert wurden. Das erste, nach einer Stunde entnommene, Eluat wurde wegen möglicherweise enthaltenen Resten von Konservierungsstoffen verworfen. Bei drei Anstrichen handelte es sich um selbstpolierende Farben (Mille Light von Hempel, Micron Eco von International und SSC-44 von US Gloss), von einer Farbe (Lefant H2000 von Lotrec AB) wird herstellerseits ein physikalisch wachstumshemmender Effekt postuliert, die fünfte Farbe basiert auf Silikon nach dem Intersleek700-System. Als Referenz wurden konventionelle Kupfer-, Irgarol- und Zinkpyrithion-haltige Antifoulinganstriche mitgetestet. Untersucht wurde die Wirksamkeit gegenüber Rotalgen (*Ceramium tenuicorne* und *Ceramium strictum*) sowie die Toxizität gegenüber Crustaceen am Beispiel des Copepoden *Nitocra spinipes*. Hierbei zeigten mit Ausnahme der silikonbasierten Farben alle anderen Anstriche deutliche Effekte, die durchaus im Bereich der konventionellen bioziden Antifoulingbeschichtungen lagen.

In einer weiteren Untersuchung testeten Karlsson et al. (2010) die Ökotoxizität von Antifouling-Anstrichen, die z. T. auch für Freizeitboote verwendet werden, gegenüber Leuchtbakterien (*Vibrio fischeri*), Makroalgen (*Ceramium tenuicorne*) und Crustaceen (*Nitocra spinipes*). Die Prüfstücke (je 5 cm²) wurden wiederum mit 500 mL synthetischem Meerwasser bzw. natürlichem Meerwasser über 2-16 Wochen eluiert. Verwendet wurden drei handelsübliche Kupfer(I)oxid haltige Farben (Olympic 86 951, Interspeed 617, Fabi), die zusätzlich 2,5-15 % Zinkoxid enthielten. Zudem wurde das nicht-biozide selbstpolierende Produkt „Micron Eco“ mit einem Zinkoxidanteil von 25– 50 % getestet, dessen Wirkmechanismus herstellerseits mit „physikalisch“ angegeben wird. Zum Vergleich wurde ein in Schweden seit 1999 verbotenes Mittel (Cruiser superior mit 19 % Kupferthiocyanat + 3,3 % Irgarol + 10-25 % Zinkoxid) untersucht. Die Ökotoxizität konnte auf die Auswaschung von Kupfer und Zink zurückgeführt werden, wobei von dem nicht-bioziden Produkt „Micron Eco“ die höchste Toxizität ausging.

Löschau & Krätke (2005) untersuchten die Ökotoxizität von zwei nicht-bioziden selbstpolierenden Antifoulinganstrichen gegenüber Bakterien (*Vibrio fischeri*) und marinen Grünalgen (*Dunaliella tertiolecta*). Die Farben enthielten nach Herstellerangaben keine Schwermetalle. Hierzu wurden je 10 g der Anstriche auf Petrischalen als Träger ausgebracht und drei Wochen in 1 L künstlichem Meerwasser eluiert. Zudem wurden Kontakttests mit Crustaceen (*Balanus amphitrite*, *Artemia salina*) und Fischeiern (*Danio rerio*) in lackierten und 9-14 d ausgehärteten Petrischalen bzw. 24-well Mikroplatten durchgeführt. Beide Antifouling-Farben verhinderten die Anhaftung von Cypris-Larven (Seepocke *B. amphitrite*), waren jedoch gleichzeitig auch deutlich ökotoxisch (z. B. Toxizität bezogen auf Farbauftrag auf die extrahierte Fläche gegenüber *Artemia salina* = 1000 bis 4000 mg L⁻¹). Die Autoren schlussfolgern daraus, dass auch biozid- und metallfreie selbstpolierende Antifoulinganstriche sorgfältig hinsichtlich möglicher negativer Effekte auf die aquatische Umwelt untersucht werden sollten.

Watermann et al. (2005) untersuchten 21 verschiedene nicht-biozide Antifoulinganstriche, darunter Silikonanstriche, Faseranstriche, sowie Epoxid- bzw. vinylbasierte Anstriche (alle nicht erodierend) und erodierende epoxid- bzw. kolophoniumbasierte Anstriche. Hierzu wurden

lackierte Objektträger in 50 ml künstlichem Meerwasser für drei Tage eluiert und im Leuchtbakterientest untersucht. In keinem der Eluate wurden deutliche toxische Wirkungen gegenüber Leuchtbakterien beobachtet, mit maximalen Werten für ein Topcoat von $GL = 32$. Der GL ist der Verdünnungsfaktor, bei dem die Hemmung von der Lumineszenz im Vergleich zur Kontrolle unter 20 % beträgt. Die Autoren schlagen auch ein Bewertungssystem vor, nach dem Proben bis zu GL -Werten von 4 als ungiftig, solche mit GL -Werten zwischen 8 und 32 als leicht toxisch, solche mit $GL > 32$ als toxisch und solche mit $GL > 256$ als sehr toxisch eingestuft werden. Die Autoren weisen allerdings auch darauf hin, dass das Langzeitverhalten der Anstriche aufgrund der kurzen Elutionszeit nicht bewertet werden kann. Ein ähnliches Elutionsverfahren (beschichtete Glasplatten von 10×10 cm werden nach Trocknungszeit von 24 h in 1 L standardisiertem Süßwasser für 24 Stunden geschüttelt) wurde auch in der ersten Machbarkeitsstudie für ein neues Umweltzeichen für nicht-biozide Antifouling-Produkte vorgeschlagen ([Watermann et al. 2004](#)).

[Piazza et al. \(2018\)](#) analysierten nicht-biozide sogenannte Fouling Release Coatings (FRC), die als umweltfreundliche Alternative zu selbstpolierenden Anstrichen gesehen werden, die kontinuierlich Biozide oder Zinkoxid freisetzen. Die Wirkung von FRC basiert auf Verschmutzung abweisenden Oberflächen. Es wurden Eluate von fünf handelsüblichen Coatings auf Silikonbasis in Ökotoxtests mit Crustaceen (Naupliuslarve von *Amphibalanus amphitrite*) untersucht. Hierzu wurden die Coatings auf Objektträgern (26×76 mm) aufgetragen und 24 h bis hin zu drei Monaten „gealtert“, indem die Flächen kontinuierlich in einem 150 L Tank mit Meerwasser (200 L/h) umspült wurden. Je 6 Objektträger wurden dann in 80 mL Meerwasser eluiert (Oberflächen-Volumenverhältnis $180 \text{ cm}^2: 80 \text{ mL}$, dies entspricht dem 4-fachen des von [Watermann et al. \(2005\)](#) bzw. dem 15-fachen des in [ASTM D6442](#) angegebenen Verhältnisses). Hierbei wurden in allen Eluaten der Silikonbeschichtungen eine mehr oder weniger deutliche Wirkung festgestellt, die mit der künstlichen Alterung abnahm. Hierbei wurde keine Korrelation mit den Metallkonzentrationen festgestellt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass in der Kombination von Leachingtests mit Ökotoxizitätstests ein großes Potential zur Erfassung gefährlicher auswaschbarer Stoffe anhand ihrer summarischen Wirkung gesehen wird, hierzu aber meist die unterschiedlichsten Hausmethoden als Leachingtest eingesetzt werden. Auch die Auswahl der Testorganismen variiert stark, wobei Leuchtbakterien, Daphnien und Fischeier relativ häufig verwendet wurden, neben einer Vielzahl von Algenspezies und speziellen marinen Crustaceen. Der Sinn von vergleichenden Produkttestungen an nicht ausgehärteten Anstrichen mit Lösemittelanteil wird als fragwürdig angesehen. Es besteht ein hoher Bedarf an einem abgestimmten Testkonzept, um die verschiedenen Ergebnisse untereinander vergleichen zu können. Daher bietet es sich an, die Methoden an die für andere Branchen, insbesondere die zur ökotoxikologischen Bewertung von Bauprodukten, anzupassen. Hier werden auch flächige Bauprodukte wie z. B. Coatings oder Abdichtfolien erfasst.

5 Entwicklung von Vergabekriterien

Im Rahmen des Projekts und aufbauend auf der Marktrecherche und den Rückmeldungen der Fragebögen wurden die nachfolgenden Kategorien als relevant für die Produktgruppe identifiziert und erste Kriterien in Rücksprache mit dem UBA erstellt. Diese wurden dann auf einem ersten Workshop mit den interessierten Firmen sowie anderen Teilnehmenden diskutiert. Darauf aufbauend wurden die Kriterien überarbeitet und im Rahmen einer offiziellen Expertenanhörung erneut diskutiert und überarbeitet. Das folgende Kapitel fasst grundlegende Aspekte zu den einzelnen Kriterien zusammen und stellt am Ende jeweils das im Diskussionsprozess endgültige festgelegte Kriterium dar – so wie es dann am Ende in die offiziellen Vergabekriterien gekommen ist.

Die finalen Vergabekriterien für das Umweltzeichen sind bereits veröffentlicht und können auf der Internetseite www.blauer-engel.de unter der Rubrik „Zertifizierung“ eingesehen werden.¹³

5.1 Ziele

Ziel einer Umweltkennzeichnung mit dem Blauen Engel ist es, Produktaussagen zu überprüfbareren und nicht irreführenden Angaben hinsichtlich der Umweltaspekte zu vermitteln sowie Produkte zu unterstützen, die weniger Umweltbelastungen verursachen. Umweltzeichen sollen auch jene Produkte ausweisen, die darüber hinaus Anforderungen des Gesundheits- und Arbeitsschutzes, der Verbrauchersicherheit und der Gebrauchseigenschaften entsprechen.

Die Erarbeitung von Vergabekriterien für neue Produktgruppen des Blauen Engels erfolgt üblicherweise anhand von detaillierten Machbarkeitsstudien in Anlehnung an DIN EN ISO 14024 unter Festlegung des Geltungsbereichs, allgemeiner stofflicher Anforderungen und Ausschluss bestimmter Gefahrstoffe bis hin zu konkreten Anforderungen hinsichtlich Herkunft der Rohstoffe, ökotoxikologischer Wirkungen bzw. Abbaubarkeit und zur Gebrauchseigenschaften. Die Arbeiten werden in enger Abstimmung mit dem RAL bzw. dem Umweltbundesamt durchgeführt und sehen eine Beteiligung der interessierten Kreise in Form von Fachgesprächen und Expertenanhörungen vor. Durch die Entwicklung von vielfältigen nicht-bioziden Produkten und Verfahren im Bewuchsschutz wünschen sich besonders kleine und mittelständische Firmen eine gewisse Rückendeckung zur erfolgreichen Platzierung auf dem Markt. Sie stehen in Konkurrenz zu den Biozidprodukten und werden von den Endverbrauchern besonders hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Unbedenklichkeit kritisch betrachtet. Daher wäre ein Umweltzeichen, welches neben den zuvor genannten Produkteigenschaften auch einen Wirksamkeitsnachweis beinhaltet, für diese Firmen interessant.

5.2 Vergleich mit bestehenden Umweltzeichen

Neben der Neukonzeption dieser Umweltzeichen für Antifouling-Systeme war auch die Möglichkeit der Einbindung von nicht-bioziden Antifouling-Produkten in bereits bestehende Umweltzeichen zu überprüfen. Hierzu wurde eine systematische Analyse von Umweltzeichen mit Biozidbezug durchgeführt, indem alle bestehenden Umweltzeichen des Blauen Engels (www.blauer-engel.de), des EU-Umweltzeichens (<http://www.eu-ecolabel.de>), des Nordischen Schwans (<http://www.nordic-ecolabel.org>) sowie des österreichischen Umweltzeichens (<http://www.umweltzeichen.at>) ausgewertet wurden. Die Analyse wurde mit Recherchen weiteren Datenbanken zu Umweltlabeln (<https://label-online.de>, <https://globalecolabelling.net>) ergänzt. Als Ergebnis wurden keine bestehenden Vergabekriterien gefunden, die in Hinblick auf nicht-biozide Antifouling-Produkten erweitert werden könnten. Allerdings lassen sich aus den

¹³ <https://www.blauer-engel.de/de/zertifizierung/vergabekriterien#UZZ21-2022> (letzter Zugriff 12.05.2022)

Vergabekriterien zu Umweltzeichen von verwandten Produktgruppen z. T. erste Hinweise auf mögliche Kriterien ableiten:

- ▶ Das Nordic Ecolabelling for car and boat care products (Version 5.9 vom 21 March 2012) weist explizit darauf hin, dass Antifouling-Farben oder auch Geräte zur mechanischen Reinigung (wie Schwämme, Bürsten, Abdeckungen oder Ähnliches) außerhalb des Geltungsbereiches dieses Umweltlabels liegen.

Das DE-UZ 12a „Emissions- und schadstoffarme Lacke“ (2019) schließt Antifouling-Beschichtungen vom Anwendungsbereich aus. Gleiches gilt für das EU-Umweltzeichen für Innen- und Außenfarben und -lacke (2014/312/EU). Selbst wenn die bestehenden Umweltzeichen für Lacke für nicht-biozide Antifoulinganstriche geöffnet würden, könnten damit nur ein Teil der Rumpfbeschichtungen abgedeckt werden. Gleichwohl können die dort beschriebenen Kriterien z. B. bezüglich der Beschränkung bestimmter gefährlicher Stoffe und Gemische anhand der CLP-Einstufungskriterien oder des Gehaltes an flüchtigen und schwerflüchtigen organischen Verbindungen (VOC, SVOC) durchaus als Richtschnur verwendet werden. So dürfen die mit dem DE-UZ 12a ausgezeichneten Lacke keine Biozide enthalten. Ausgenommen sind die in der Liste der zulässigen Topfkonservierungsmittel genannten Biozide mit den dort genannten Gehalten. Die Konservierung der Vorprodukte ist so zu dimensionieren, dass die Konservierung des Lackes der Liste der zulässigen Topfkonservierungen entspricht, dies gilt auch für Formaldehydabspalter. Für die Topfkonservierung ist die erforderliche minimale Menge an Konservierungsmittelzubereitung z. B. durch einen Biotest gemäß Anhang C zu ermitteln. In emissions- und schadstoffarmen Lacken dürfen gefährliche Stoffe oder Gemische nicht in Konzentrationen enthalten sein, die zu einer Einstufung des Produktes mit H400, H410 oder H411 führen würden.

- ▶ In den Vergabekriterien für das DE-UZ 123 Emissionsarme Dichtstoffe für den Innenraum sind zudem auch als umweltgefährlich eingestufte Stoffe und Gemische (H410, H411, H412) im Produkt in Anlehnung an die CLP-Verordnung begrenzt, so dass auch eine Einstufung in H412 (Schädlich für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung chronisch 3) nicht zulässig ist. Ausgenommen von dieser Regelung sind Topfkonservierer nach der Liste der zulässigen Topfkonservierungsmittel.
- ▶ Das Blaue-Flagge-Label für Sportboothäfen (<http://www.blaue-flagge.de>) sieht u. a. Bootswaschplätze vor, deren Reinigungswasser im Kreislaufführung geführt und/oder der Reststoffentsorgung zugeführt wird. Auch das DE-UZ 141 „Umweltfreundliches Schiffsdesign“ oder das DE-UZ 110 „Umweltschonender Schiffsbetrieb“ vergeben jeweils 5 Pkt. für „biozidfreie Beschichtungen“, beschreiben aber keine Kriterien für nicht-biozide Antifoulingstrategien.
- ▶ Im Abschlussbericht zum Change-Projekt beschreiben Strand und Watermann im Kapitel „Eco-labelling – a way forward?“ verschiedene Optionen der Umweltzeichenvergabe von der Zertifizierung von Anstrichen, Booten bis hin zu Marinas und Dienstleistungen (Strand et al. 2019). Es bestehen für ein Eco-Labeling verschiedene Optionen. Hierzu zählen potenzielle Labels für a) die Infrastruktur der Marinas hinsichtlich des Umweltschutzes und der Sicherheit, insbesondere für Unterhaltungsarbeiten am Rumpf (Entschichtung,

Beschichtung, Entsorgung von Abfällen, Waschplätze), b) die Auszeichnung der umweltfreundlichen und nicht gesundheitsschädlichen Unterwasserbeschichtungen und c) die Auszeichnung von umweltfreundlichen Booten, ähnlich wie umweltfreundliches Schiffdesign im Berufsschiffbereich. Das Eco-Labeling von Booten kann sich auf die Bootsbaumaterialien, die Antriebsart und die Ausrüstung inklusive aller Beschichtungen beziehen.

- In der ersten Machbarkeitsstudie wurde noch auf das Umweltzeichen für nicht-biozide Antifoulingprodukte (Marine Foul Release Coatings) des „Environmental Choice Program“ der kanadischen Umweltbehörde (Environment Canada) hingewiesen ([Watermann et al. 2004](#)). Der aktuelle Status diese Labels ist nicht bekannt. Die Webseite ist nicht mehr aktiv und bei einer Internetrecherche wurden keine weiteren Informationen hierzu gefunden.

5.3 Geltungsbereich

Die in der Marktrecherche identifizierten alternativen Bewuchsschutzsysteme lassen sich drei Produktkategorien zuordnen. In der 1. Produktkategorie wurden zahlreiche alternative Unterwasserbeschichtungen wie Antihaftbeschichtungen, Klebefolien, reinigungsfähige Hartbeschichtungen u. a. zusammengefasst. Hierzu zählen auch elektrische Verfahren mit speziellen Beschichtungsaufbau. Der 2. Produktkategorie wurden andere Antifoulingstrategien wie Unterwasserplanen, Ultraschallanlagen oder auch Bootshebeanlagen zugeordnet. Hiervon lassen sich wiederum mobile Schiffsreinigungsgeräte und stationäre Schiffsreinigungsanlagen unterscheiden, die in der 3. Produktkategorie berücksichtigt sind.

Im Projektverlauf wurde zunächst angedacht, die Kriterien für die Produktkategorie Unterwasserbeschichtungen in einer Vergabegrundlage zu beschreiben und für die beiden anderen Produktkategorien eigene Vergabegrundlagen für den Blauen Engel zu entwickeln. Da sich hierbei aber zahlreiche Überlappungen bei der Ableitung der Vergabekriterien ergaben, wurde beschlossen, nur eine Vergabegrundlage zu erstellen und die Anforderungsprofile in Form einer Anforderungsmatrix festzulegen. Beispielsweise setzen alle Reinigungsverfahren das Vorhandensein einer reinigungsfähigen biozidfreien Unterwasserbeschichtung voraus und die Anwendung von Unterwasserplanen oder Ultraschallanlagen von einer Unterwasserbeschichtung ohne Biozide der PA 21.

Die Vergabekriterien gelten für Rumpfaußenbereiche von Schiffs- und Bootsrümpfen. Nischenbereiche wie Seekästen, Bugstrahlruder, Ruderanlage, Welle und Propellertunnel sind vom Geltungsbereich ausgeschlossen, da hierfür noch keine Wirksamkeitstests entwickelt wurden.

Selbstpolierende und erodierende Beschichtungen sind wegen der intendierten Freisetzung von Stoffen ebenfalls ausgeschlossen (Ausnahme bioabbaubare Naturstoffe; vgl. 5.6.12 ff).

Der Geltungsbereich für das Umweltzeichen zielt primär auf Verbraucherprodukte, aber auch auf durch professionelle Anwender aufgetragene Antifoulingssysteme, die überwiegend in der Sportschiffahrt verwendet werden. Hintergrund ist, dass einige Silikonbeschichtungen oder Antifoulingfolien nicht mit einem vertretbaren Aufwand von Privatanwendern aufgebracht werden können. Es sind jedoch auch Systeme für die Berufsschiffahrt zertifizierbar. Produkte zum Bewuchsschutz von statischen Konstruktionen im direkten Wasserkontakt sind hingegen ausgeschlossen.

5.4 Anforderungsmatrix

Die Anforderungen wurden zunächst für Beschichtungssysteme definiert. Für die anderen Bewuchsschutzsysteme wurde anhand einer Anforderungsmatrix dargestellt, welche der Anforderungen relevant sind. Nachfolgend ist die Anforderungsmatrix für die unterschiedlichen Produktgruppen des Entwurfes der Vergabekriterien wiedergegeben (Stand 07.12.2021):

Abbildung 1: Anforderungsmatrix für die unterschiedlichen Produktgruppen des Entwurfes der Vergabekriterien (x – relevant; n.a. - nicht anwendbar)

Anforderungen Ausgangsstoffe	Unterwasserbeschichtungen			Andere Systeme			Reinigung	
	Beschichtungen u. Klebefolien	Reinigungsfähige Hartbeschichtungen	Elektrische Verfahren mit speziellem Beschichtungsaufbau	Unterwasserplanen	Ultraschallanlagen	Bootshebeanlagen	Mobile Schiffsreinigungsgeräte	Stationäre Schiffsreinigungsanlagen
Allgemeine Anforderungen	x	x	x	x	x	x	x	x
Anforderungen zum Einsatz von Bioziden	x	x	x	x	n.a.	n.a.	x	x
Flüchtige organische Verbindungen (VOC)	x	x	x	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Spezielle stoffliche Anforderungen	x	x	x	x	n.a.	n.a.	x	x
Intendierte Freisetzung von Stoffen	x	x	x	x	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Anforderungen an das Produkt								
Gefahrstoffrechtliche Produktanforderungen	x	x	x	x	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ökotoxizität der Eluate	x	x	x	x	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Wirksamkeitsnachweis	x	n.a.	x	x	x	n.a.	x	x
Spezielle systemspezifische Anforderungen	n.a.	x	n.a.	n.a.	n.a.	x	x	x
Werbeaussagen	x	x	x	x	x	x	x	x
Anwendungsinformationen	x	x	x	x	x	x	x	x

Quelle: eigene Darstellung, Dr. Brill + Partner

5.5 Anforderungen an die Ausgangsstoffe

5.5.1 Allgemeine stoffliche Anforderungen

Die Einhaltung der gesetzlichen Regelungen des europäischen und deutschen Chemikalienrechts wird vorausgesetzt; hierzu gehören insbesondere die REACH-Verordnung, die POP-Verordnung, die Biozidprodukte-Verordnung und die CLP-Verordnung. Sofern für das spezifische Produkt weitere rechtliche Regelungen gelten, sind diese ebenfalls einzuhalten.

Darüber hinaus dürfen mit einem Umweltlabel ausgezeichnete Produkte üblicherweise keine Stoffe enthalten, die gemäß REACH Artikel 57 als besonders besorgniserregend identifiziert und in die gemäß REACH Artikel 59 Absatz 1 erstellte Liste (sogenannte „Kandidatenliste“) aufgenommen wurden. Das betrifft Stoffe die

- ▶ karzinogen (krebserzeugend) der Kategorie Carc. 1A oder Carc. 1B oder Carc. 2
- ▶ keimzellmutagen (erbgutverändernd) der Kategorie Muta. 1A oder Muta. 1B oder Muta 2
- ▶ reproduktionstoxisch (fortpflanzungsgefährdend) der Kategorie Repr. 1A oder Repr. 1B oder Repr 2
- ▶ persistent, bioakkumulierbar und toxisch (PBT)
- ▶ sehr persistent und sehr bioakkumulierbar (vPvB)
- ▶ mit endokrinen Eigenschaften oder nach wissenschaftlichen Erkenntnissen als ebenso besorgniserregend geltend.

Darüber hinaus werden in den Vergabekriterien verschiedener Umweltzeichen (z. B. DE-UZ 12a, DE-UZ 120) oftmals Stoffe ausgeschlossen, die gemäß CLP-Verordnung als

- ▶ akut toxisch (giftig) der Kategorie Acute Tox. 1, Acute Tox. 2, Acute Tox. 3 oder
- ▶ toxisch für spezifische Zielorgane der Kategorie STOT SE 1 (toxisch bei einmaliger Exposition), STOT RE 1 (toxisch nach wiederholter Exposition) oder
- ▶ die Ozonschicht schädigend (Kategorie Ozon 1)

eingestuft sind. Oftmals wird zudem auf das Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe der TRGS 905 hingewiesen.

Die Persistenz eines Stoffes allein wird bisher nicht als Kriterium für besorgniserregende Stoffe angesehen, sondern nur in Kombination mit der Bioakkumulation und der aquatischen Ökotoxizität (PBT, vPvB). In neueren Bewertungskonzepten werden auch „mobile persistente Stoffe“ (PM) als besorgniserregend angesehen, da sie sich - einmal freigesetzt - nur schwer wieder aus der Umwelt und dem Rohwasser für die Trinkwassergewinnung entfernen lassen.¹⁴ Die Neigung zur Mobilität wird hierbei anhand von Adsorptionskoeffizienten eingeschätzt. So beschreibt z. B. der Bodenadsorptionskoeffizient die Konzentration eines Stoffes im Boden (bezogen auf den organischen Kohlenstoff) im Vergleich zur Konzentration des Stoffes in der wässrigen Phase unter Gleichgewichtsbedingungen (K_{oc}). Wenn dieser Verteilungskoeffizient $\log K_{oc} < 4$ ist, wird ein Stoff als mobil angesehen. Ähnlich werden Stoffe mit einem Verteilungskoeffizient Octanol/Wasser von $\log K_{ow} < 4,5$ als mobil angesehen (Rüdel et al. 2020). Allerdings ist dieses Konzept noch nicht etabliert und findet bisher regulatorisch keine Anwendung.

Auf dem Online-Fachgespräch vom 15.06.21 wurde auch vorgeschlagen, endokrin wirksame Substanzen grundsätzlich auszuschließen. Derzeit gibt es noch keine verbindlichen Einstufungskriterien nach CLP-Verordnung, diese würden derzeit diskutiert. Allerdings sind viele endokrine Stoffe wie Bisphenol A als reprotoxisch (und endokrin wirksam) eingestuft. Unter REACH als endokrin identifizierte Stoffe werden als SVHC eingestuft. Somit sind diese Stoffe bei den allgemeinen stofflichen Kriterien mitberücksichtigt.

¹⁴ <https://www.umweltbundesamt.de/mobile-chemikalien>

Es sei darauf hingewiesen, dass in Anlehnung an das EU-Umweltzeichen für Emissionsarme Innen- und Außenfarben und Lacke (2014/312/EU, Anlage 1) Ausnahmen für bestimmte gefährliche Stoffe wie Konservierungsmittel, Trockenstoffe, Korrosionsschutzmittel, Katalysatoren u. a. bestimmt werden können, auf deren Verwendung nicht verzichtet werden kann. Ein ähnliches Vorgehen hinsichtlich zugelassener Konservierungsmittel wird auch im DE-UZ 12a durch Verweis auf Anhang A des DE-UZ 102 „Emissionsarme Wandfarben“ verfolgt.

Im REACH Anhang XVII sind Anwendungsbeschränkungen für die Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe, Gemische und Erzeugnisse beschrieben, die ebenfalls einzuhalten sind. So dürfen keine Anstrichfarben und Lacke mit Cadmiumkonzentrationen $\geq 0,01$ Gew.-% verwendet oder in Verkehr gebracht werden (Eintrag 23 REACH Anhang XVII). Zudem werden die Beschränkungen zinnorganischer Verbindungen beschrieben. Diese dürfen grundsätzlich nicht als biozide Wirkstoffe (z. B. Antifoulingmittel) verwendet werden. Für trisubstituierte zinnorganische Verbindungen wie etwa Tributylzinnverbindungen (TBT) und Triphenylzinnverbindungen (TPT) sowie Dibutylzinnverbindungen (DBT) wurde ein Limit von 0,1 Gew. % Zinn definiert. Abweichend davon dürfen DBT-Verbindungen weiterhin als Katalysatoren in Farben und Beschichtungen oder als Stabilisatoren in PVC für Außenanwendungen eingesetzt werden. Dioctylzinnverbindungen (DOT) dürfen nicht mehr in Erzeugnissen für die breite Öffentlichkeit abgegeben oder von dieser verwendet zu werden, wenn die Konzentration 0,1 Gew. % Zinn übersteigt.

In diesem Zusammenhang ist darauf zu achten, dass die Konzentrationen von Katalysatoren oder Additiven nur so hoch angesetzt werden, dass sie in der Matrix chemisch gebunden werden können und nicht aus dem Endprodukt ausschwitzen. In letztem Fall ist davon auszugehen, dass eher eine biozide Antifoulingwirkung beabsichtigt ist. Ähnliches gilt für die Konzentration von Topfkonservieren, da z. B. die Wirkschwelle als Antifoulingbiozid für Isothiazolinone nur wenig über dem zulässigen Gehalt als Topfkonservierer liegt (s. a. Kap. 5.7.3)

Die Prüfung der Rezeptur ist ein integraler Bestandteil vieler Vergabekriterien für den Blauen Engel. Im DE-UZ 12a erfolgt der Nachweis der Einhaltung der stofflichen Anforderungen über die Rezepturprüfung. Hierzu muss der Antragsteller die vollständige Rezeptur des Produktes und die Sicherheitsdatenblätter des Produktes sowie auf Nachfrage der RAL gGmbH die Sicherheitsdatenblätter für alle Komponenten der Rezeptur vorlegen. Für Dichtstoffe im Innenbereich (DE-UZ 123) wird die Einhaltung der Anforderungen über eine Herstellererklärung unter Nennung der Markennamen und Lieferanten aller Vorprodukte sowie deren Anteil und Funktion im hergestellten Produkt gefordert. Zudem sind Erklärungen der Hersteller bzw. Vertreiber der verwendeten Vorprodukte und die entsprechenden Sicherheitsdatenblätter des Produktes und der verwendeten Vorprodukte vorzulegen.

Die Vorlage der vollständigen Rezeptur bei der RAL gGmbH wird dort vertraulich gehandhabt. Dennoch scheint die Weitergabe der Rezeptur nach den bisherigen Ergebnissen der Marktrecherche von Seiten der Hersteller sehr kritisch gesehen zu werden. Nur über eine eindeutige Identifikation der Substanzen anhand ihrer CAS-Nummer können die Inhaltsstoffe (und nicht nur die kennzeichnungspflichtigen) identifiziert und bewertet werden. Von Seiten des RAL wurde auf dem Online-Fachgespräch am 15.6.2021 festgestellt, dass die Erfahrungen bei der Antragstellung zum UZ 12a (Farben Lacke) gezeigt hätten, dass die vollständige Rezeptur oftmals nicht vorgelegt werden kann, da die Vorlieferanten diese Daten, die als Betriebsgeheimnis gewertet werden, nicht zur Verfügung stellen. Über die Sicherheitsdatenblätter aller Vorprodukte und Erklärungen der Hersteller lassen sich die Produkte jedoch bewerten.

Aus Sicht der Gutachter besteht dennoch die Möglichkeit, dass die Deklaration der Inhaltsstoffe nicht vollständig bzw. unzureichend ist. Daher werden verpflichtende Ökotoxizitätsprüfung der Eluate von einigen Produktgruppen durchgeführt (vgl. 5.7.2).

Die allgemeinen stofflichen Anforderungen sind in Anhang E der Vergabekriterien „Zuordnung von Gefahrenkategorien und -hinweisen“ wiedergegeben. In Bezug auf das Ausschlusskriterium Carc. 2 (H351) wurde eine Ausnahme für Titandioxid aufgenommen, wenn das Produkt als flüssiges Gemisch und nicht in pulvriger Form in Verkehr gebracht wird. Hintergrund ist, dass sich die Einstufung nur auf einatembare Stäube bezieht (vgl. 5.6.6).

5.5.2 Anforderungen zum Einsatz von Bioziden

Herleitung der Kriterien

Ziel der Zertifizierung von Antifouling-Systemen ist die Förderung von Produkten und Verfahren, die auf den Einsatz von Bioziden, insbesondere der Produktarten 7, 9 und 21, verzichten. Daher sollte der Einsatz von Bioziden gemäß Verordnung (EU) Nr. 528/2012 grundsätzlich ausgeschlossen werden. Hiervon könnten Biozide, die bei den verwendeten Vorprodukten zur Topfkonservierung eingesetzt werden, im begründeten Einzelfall ausgenommen werden (Produktart PA 6). Dafür sollte die Notwendigkeit der Verwendung eines Topfkonservierungsmittels erkennbar sein (z. B. in wasserbasierten Produkten) und die Konzentration des Topfkonservierungsmittels sollte so niedrig wie möglich gewählt werden. Zudem sollten alle Topfkonservierungsmittel aus den Vorprodukten in der Summe nicht zur Einstufung des Produktes in Hinblick auf die Umwelt führen (H400 und H410, H411, H412 und H413). In verschiedenen Vergabekriterien für den Blauen Engel (DE-UZ 12a Emissions- und schadstoffarme Lacke, DE-UZ 113 Emissionsarme Bodenbelagsklebstoffe, DE-UZ 123 Emissionsarme Dichtstoffe für den Innenraum, DE-UZ 132 Wärmedämmstoffe und Unterdecken etc.) wird auf eine Positivliste der zulässigen Topfkonservierungsmittel verwiesen, in der auch die maximal zulässigen Konzentrationen definiert sind.¹⁵ Für einzelne Vergabekriterien kann diese Liste auch erweitert werden. So darf laut DE-UZ 123 der Wirkstoff Thiabendazol bis zu 400 ppm zum Schutz vor Schimmelbefall bei Sanitärsilikonem eingesetzt werden.

Neben dem Ausschluss von Wirkstoffen der Produktart 21 sollten auch Verfahren der in-situ Freisetzung biozider Wirkstoffe ausgeschlossen werden, die in den Geltungsbereich der Biozidprodukteverordnung fallen. Dies betrifft in-situ erzeugte freie Radikale, Chlor oder Wasserstoffperoxid, die über Elektroden, UV oder Photokatalyse freigesetzt werden. Bei einigen Verfahren, wie der Anwendung von Ultraschall, überwiegt vermutlich die physikalische Wirkung und die Freisetzung von freien Radikalen ist primär nicht beabsichtigt. Dennoch ist weiter zu beobachten, ob hierzu eindeutige Beschlüsse gefällt werden.

Umsetzung in den Vergabekriterien

Gemäß den Vergabekriterien ist der Einsatz von Bioziden gemäß Verordnung (EU) Nr. 528/2012 in den Produkten und Vorprodukten ausgeschlossen. Als Ausnahme dürfen Topfkonservierungsmittel (PA 6) in den Vorprodukten enthalten sein, wenn die Anforderungen an die Einstufung des Produktes eingehalten werden (vgl. 5.7).

5.5.3 Flüchtige organische Verbindungen (VOC)

Herleitung der Kriterien

Bislang gibt es keine einheitliche Definition für VOC. In der VOC-Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in

¹⁵ https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/attachment/de/Liste_der_zulaessigen_Topfkonservierungen_Okt_2018.pdf (Zugriff 02.09.2020).

bestimmten Anlagen (Richtlinie 1999/13/EG, in Deutschland umgesetzt durch die 31. BImSchV zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 21. August 2001) werden VOC wie folgt definiert: „flüchtige organische Verbindung: eine organische Verbindung, die bei 293,15 Kelvin (also 20 °C) einen Dampfdruck von 0,01 Kilopascal oder mehr hat oder unter den jeweiligen Verwendungsbedingungen eine entsprechende Flüchtigkeit aufweist“. Diese Definition wurde in die Vergabegrundlagen übernommen.

Nach DIN EN ISO 11890 Teil 1 und 2 ist als VOC jede flüchtige organische Verbindung zu bezeichnen, die bei den herrschenden Umgebungsbedingungen (Temperatur und Druck) von selbst verdunstet. Halbflüchtige organische Verbindung (SVOC) sind Verbindungen, die bei den herrschenden Umgebungsbedingungen (Temperatur und Druck) von selbst verdunsten, jedoch langsamer im Vergleich zu VOC.

Teilweise wird auch auf die EG-Richtlinie 2004/42/EG zur „*Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aufgrund der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Farben und Lacken*“ Bezug genommen. Hier werden VOC als organische Verbindung mit einem Anfangssiedepunkt von höchstens 250 °C bei einem Standarddruck von 101,3 kPa definiert.

Sowohl das DE-UZ 12a „Emissions- und schadstoffarme Lacke“ als auch das EU-Umweltzeichen für Innen- und Außenfarben und -lacke (2014/312/EU) limitieren den Anteil an VOC, wobei der VOC-Gehalt über den Gehalt an Lösemitteln im Rahmen der Rezepturprüfung berechnet wird. Die Lösemittel lassen sich u. a. Kohlenwasserstoffen, Alkoholen oder Aldehyden zuordnen. Wenn die Rezeptur nicht bekannt ist, wird die VOC-Freisetzung über Emissionsmessungen messtechnisch erfasst. Das Hauptaugenmerk bei den VOC liegt auf dem Gesundheitsschutz im Innenraum, so dass der VOC-Anteil bei Schiffsanstrichen gegebenenfalls als nicht relevant angesehen werden könnte. Allerdings werden Antifoulingbeschichtungen durchaus auch in geschlossenen Hallen auf die Schiffsrümpfe aufgebracht. Zudem ist die allgemeine Problematik von VOC auch im Umweltbereich (u. a. Treibhauspotential und Bildung von bodennahem Ozon) zu bedenken.

Sowohl das DE-UZ 12a als auch das EU-Umweltzeichen verweisen auf die Methoden der ISO 16000-Reihe zu Innenraumluftverunreinigungen. Nach DIN ISO 16000-6 wird zwischen den gesamten flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC), leichtflüchtigen organischen Verbindungen (VOC, Siedepunkt < 0 °C bis 100 °C) und schwerflüchtigen organischen Verbindungen (SVOC, Siedepunkt 240 °C bis 400 °C) unterschieden. Referenz sind Prüfkammeruntersuchungen nach ISO 16000-9 über 3 bis 28 Tagen vor. Die gefahrstoffrechtliche Einstufung der üblichen in der Marktrecherche identifizierten Lösungsmittel ist in der Tabelle 16 wiedergegeben.¹⁶

¹⁶ ECHA-Stoffdatenbank <https://echa.europa.eu/de/> (Zugriff am 01.09.2020).

Tabelle 16: Gefahrstoffrechtliche Einstufung von Lösemitteln nach CLP-Verordnung

Lösemittel	CAS	Harmonisierte Einstufung nach CLP
Aceton Propan-2-on Propanon	67-64-1	Flam. Liq. 2 H225 Eye Irrit. 2 H319 STOT SE 3 H336
n-Butylacetat	123-86-4	Flam. Liq. 3 H226 STOT SE 3 H336
Ethylacetate	141-78-6	Flam. Liq. 2 H225 Eye Irrit. 2 H319 STOT SE 3 H336
Ethanol Ethylalcohol	64-17-5	Flam. Liq. 2 H225
Formaldehyd	50-00-0	Acute Tox. 3 H301, H311 Eye Irrit. 2; H319: 5 % ≤ C < 25 % STOT SE 3; H335: C ≥ 5 % Skin Corr. 1B; H314: C ≥ 25 % Skin Irrit. 2; H315: 5 % ≤ C < 25 % Skin Sens. 1; H317: C ≥ 0,2 % Muta. 2 H341 Carc. 1B H350
Propan-2-ol isopropylalkohol isopropanol	67-63-0	Flam. Liq. 2 H225 Eye Irrit. 2 H319 STOT SE 3 H336
Isopropylacetat	108-21-4	Flam. Liq. 2 H225 Eye Irrit. 2 H319 STOT SE 3 H336
Styrol	100-42-5	Flam. Liq. 3 H226 Skin Irrit. 2 H315 Eye Irrit. 2 H319 Acute Tox. 4 H332 STOT RE 1 H372 (hearing organs) Repr. 2 H361d
Toluol	108-88-3	Flam. Liq. 2 H225 Skin Irrit. 2 H315 Asp. Tox. 1 H304 STOT SE 3 H336 STOT RE 2 H373 Repr. 2 H361d
Xylol	1330-20-7	Flam. Liq. 3 H226 Acute Tox. 4 H312 Skin Irrit. 2 H315 Acute Tox. 4 H332

Demnach sind Formaldehyd (Muta 2) sowie Styrol und Toluol (Repro 2) anhand der grundsätzlichen stofflichen Anforderungen auszuschließen und keines der Lösemittel hat eine Einstufung als gewässergefährdend (H400 bis H413). Die Einstufung von Toluol und Styrol als fruchtschädigend (Reprotoxisch Kategorie 2) führt in mehreren Umweltlabeln (u. a. auch DE UZ

12a) dazu, dass diese Stoffe ausgeschlossen werden, auch wenn nur reprotoxische Stoffe der Kategorie 1A und 1B das Einstufungskriterium als SVHC-Stoff erfüllen.

Während verschiedene Vergabekriterien des Blauen Engels bislang die VOC-Thematik vorwiegend unter dem Aspekt der Innenraumbelastung und dem Gesundheitsschutz betrachten, leisten VOC-Emissionen beim Abdampfen von Lösemitteln auch einen erheblichen Beitrag zur Luftverschmutzung (u. a. Ozonbildungs- und Treibhauspotential). Die Bedeutung zeigt sich auch in dem BVT-Merkblatt der EU zur Oberflächenbehandlung mit Lösemitteln, das im Kapitel 4 auf die Beschichtung von Schiffen und Yachten eingeht ([European Commission 2020](#)). Von der Industrieemissionsrichtlinie 2010/75/EU betroffen sind allerdings nur Werften mit einem Lösemittelverbrauch > 5 t/Jahr. Das Merkblatt führt aus, dass für die Beschichtung von Schiffen üblicherweise lösungsmittelbasierte Coatings aufgetragen werden, deren Lösungsmittelgehalt im Bereich von 20-40 % liegt. Damit werden rd. 150 g VOC je m² Anstrich freigesetzt, bei einer mehrlagigen Vollbeschichtung kommt ein VOC-Verbrauch für den Unterwasserbereich von bis zu 500 g VOC / m² und über der Wasserlinie von bis zu 250 g VOC / m² zusammen. Reduktionsmaßnahmen bestehen in der Verwendung von „high-solids“-Anstrichen (VOC-Gehalt ca. 150 g/L), der Verwendung wasserbasierter Beschichtungen (bisher nur wenige Produkte auf dem Markt) oder lösungsmittelfreier Zweikomponentenbeschichtungen (Airless-Hot-Spraying) sowie in der Abluftbehandlung.

Ziel der Richtlinie 2004/42/EG ist eine Verringerung der VOC-Emissionen aus Farben und Lacken. In Deutschland wurde diese Richtlinie durch die Chemikalienrechtliche Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) durch Beschränkung des Inverkehrbringens lösemittelhaltiger Farben und Lacke (Lösemittelhaltige Farben- und Lack-Verordnung - ChemVOCFarbV) vom 16.12.2004 umgesetzt (letzte Änderung 19.6.2020). Hier wird zwischen wasserbasierten (Wb) und lösemittelbasierten Beschichtungsstoffen (Lb) unterschieden. Für Beschichtungsstoffe für Holz-, Metall- oder Kunststoffe für Gebäude (innen und außen) gelten VOC-Grenzwerte von 130 (Wb) bzw. 300 (Lb) g/L. Speziell auf Schiffsanstriche wird jedoch nicht eingegangen. Der Nachweis der VOC erfolgt über die ISO 11890-2 (<15 % VOC) bzw. die ISO 1189-1 (> 15 % VOC). Bei der DIN EN ISO 11890-1 wird der VOC-Gehalt über das Differenzverfahren bestimmt. Hierbei wird zunächst der Gehalt an nicht flüchtigen Anteilen nach ISO 3251 durch Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz gemessen und dann der Wassergehalt titrimetrisch nach Karl Fischer nach ISO 760 bestimmt. Hieraus errechnet sich dann der VOC-Gehalt der Probe. Die DIN EN ISO 11890-2 bestimmt den VOC- und SVOC-Gehalt hingegen über das gaschromatographische Verfahren. Der Anwendungsbereich geht von 0,1-15 % VOC. Nach Konditionierung der Proben werden die flüchtigen, halbflüchtigen und nicht flüchtigen organischen Verbindungen gaschromatographisch getrennt. Nach dem Identifizieren der Verbindungen, z. B. über GC-MS, werden diese über die Peakflächen, bezogen auf ihre verbindungsspezifische relative Response, mit Hilfe eines internen Standards mittels GC-FID quantifiziert.

Die Folgen der VOC-Verordnung für die Aufbringung von Beschichtungssystemen im Schiffsbau wurde von [Gnass et al. \(2009\)](#) abgeschätzt. Anlagenbetreiber werden durch die 31. BImSchV bzw. VOC-Verordnung vom 21. August 2001 angehalten, die VOC-Emissionen bei der Verwendung organischer Lösemittel zu begrenzen. Als Zielgröße wird ein Lösemittelgehalt von 37,5 % bei einem gesamten Lösemittelverbrauch von 5-15 t/a und von 27,3 % bei einem Verbrauch > 15 t/a angestrebt. Dies kann durch Verwendung sogenannter High-Solid-Produkte oder durch wasserbasierte Beschichtungsstoffe erreicht werden.

Für wasserbasierte Farben wie Dispersionsfarben hat sich die „In-can VOC-Methode“ nach DIN EN ISO 17895, ebenfalls ein gaschromatographisches Verfahren, etabliert, die für VOC-Gehalte zwischen 0,01 % und 0,1 % ausgelegt ist.

Als Diskussionsgrundlage wurde zunächst vorgeschlagen, die Kriterien des DE-UZ 12a bezüglich der maximal zulässigen VOC-Gehalte für wasserbasierte Farben und Lacke von 100 g/L (10 %) (für Feststoffgehalte ≥ 30 %) zu übernehmen. Für lösemittelbasierte Beschichtungsstoffe wurde empfohlen, einen etwas niedrigeren Wert von 250 g/L, als in der ChemVOCFarbV vorgesehen (300 g/L), anzusetzen.

Auf dem Fachgespräch am 15.6.2021 zum 1. Entwurf der Vergabekriterien für die Zertifizierung von Antifouling-Systemen wurde von Seiten der Lackindustrie vorgeschlagen, neben dem absoluten VOC-Grenzwert in den Produkten alternativ einen flächenbezogenen VOC-Grenzwert zu definieren. Hintergrund ist, dass es Dünnschichtsysteme gibt, die zwar einen sehr hohen Lösemittelanteil (insbesondere Alkohole) aufweisen, die jedoch in deutlich geringeren Schichtdicken aufgetragen werden, so dass die gesamten VOC-Emissionen je m^2 insgesamt niedriger liegen als bei Vergleichsprodukten. Daraufhin wurden typische flächenbezogene VOC-Emissionen aus den Produktangaben in Sicherheitsdatenblättern sowie der Ergiebigkeit laut Anwendungsmerkblättern wie folgt berechnet: Teilweise werden die VOC-Anteile im Produkt in den Produktunterlagen direkt ausgewiesen. Bei anderen Produkten lässt sich der VOC-Anteil über die in den Sicherheitsdatenblättern ausgewiesenen Lösemittelanteile abschätzen. Der VOC-Anteil bei lösemittelbasierten Lacken kann aber auch über die in Anwendungsmerkblättern ausgewiesenen Schichtdicken (trocken/nass) abgeschätzt werden. Die so bestimmten VOC-Gehalte im Produkt können dann mit der Produktergiebigkeit in m^2/L verrechnet werden, wobei jeder Schichtauftrag einzeln gewertet wird und die VOC-Gesamtemissionen pro Quadratmeter berechnet werden. In typischen Produktsystemen wurden so VOC-Emissionen über den gesamten Schichtaufbau zwischen ca. 30 und 200 g/m^2 abgeschätzt.

Eine tiefergehende Bewertung der VOC entsprechend der „Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) aus Bauprodukten“ wird jedoch nicht empfohlen, da beim DE-UZ 12a der Gesundheitsschutz in Innenräumen im Vordergrund steht.¹⁷ Über die allgemeinen Ausschlusskriterien der stofflichen Anforderungen werden jedoch auch gesundheitliche Aspekte berücksichtigt.

Umsetzung in den Vergabekriterien

Der maximal zulässige Gehalt an VOC in Unterwasserbeschichtungen ist für wasserbasierte Produkte auf 100 g/L und für lösemittelbasierte Produkte auf 250 g/L begrenzt. Alternativ kann auch ein flächenbezogener Verbrauch für alle aufgetragenen Schichten von insgesamt maximal 150 g/m^2 eingehalten werden (betrifft in erster Linie Dünnschichtsysteme).

5.6 Spezielle stoffliche Anforderungen

5.6.1 Oxime

Herleitung der Kriterien

Gemäß DE-UZ 12a zu emissionsarmen Lacken und Farben dürfen Oxime und Vorprodukte, die Oxime enthalten, dem Lack und den Rohstoffen nicht zugesetzt werden. Hierbei handelt es sich um Derivate von Aldehyden oder Ketonen, die als funktionelle Gruppe die Gruppierung $C=N-OH$ enthalten. 1,2-Dioxime werden als Chelatbildner und Antihautmittel (engl.: anti-skinning agents) verwendet. 2-Butanonoxim (CAS 96-29-7) und Acetonoxim (CAS 127-06-0) sind als kanzerogene Stoffe schon durch die allgemeinen Stoffkriterien ausgeschlossen, allerdings nicht in der Kandidatenliste für SVHC-Stoffe aufgeführt. Die harmonisierte Einstufung von 2-Butanonoxim ist u. a. Carc. 1B (H350) und Skin Sens. 1 (H317), die notifizierte Einstufung von

¹⁷ Auch beim DE-UZ 154 Textilien werden die VOC beim Imprägnieren, Drucken oder Beschichten auf einen maximalen VOC-Gehalt von 5 Masse % in den Imprägnierflotten, Druckpasten oder Beschichtungscompounds begrenzt.

Acetonoxim ist Skin Sens. 1B (H317) und Carc. 2 (H351). Es gibt aber auch Oxime wie Cyclohexanon Oxim (CAS 100-64-1) für die eine solche Einstufung fehlt. Allerdings meinen Gefahrstoffexperten der Berufsgenossenschaften, dass über kurz oder lang alle Oxime als krebserzeugend eingestuft werden (Rühl 2017). Aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit aller Oxime wird vorgeschlagen, diese Gruppe prinzipiell von der Verwendung auch in Vorprodukten auszuschließen.

Umsetzung in den Vergabekriterien

Oxime und Vorprodukte, die Oxime enthalten, dürfen den Produkten nicht zugesetzt werden.

5.6.2 PVC

Begründung der Anforderung

Die Verwendung des Werkstoffes Polyvinylchlorid (PVC) ist bei der Vergabe des Blauen Engels normalerweise nicht zulässig. Unter den beschriebenen Klebefolien wird jedoch bekanntermaßen auch PVC eingesetzt, obwohl es auch Folien auf Basis von Polyethylen (PE) gibt. Nach einem Statement des BUND verursacht der Einsatz von PVC von der Produktion bis zur Entsorgung gravierende Gesundheits- und Umweltprobleme. So gibt Weich-PVC gesundheitsschädliche Weichmacher ab. Das Recycling ist durch die Vielzahl der Zusatzstoffe problematisch, bei der Verbrennung können giftige Dioxine entstehen.¹⁸

In einer Studie über den Sachstand von Schadstoffen in Kunststoffen und ihre Auswirkungen auf die Entsorgung wird festgestellt, dass der Hauptteil der Weichmacher bei der Verwendung von PVC anfällt. Da z.B. Phthalat-Weichmacher, die in Weich-PVC in hohen Konzentrationen bis 30 Gew. % eingesetzt werden, nicht chemisch in die Polymermatrix gebunden sind, migrieren sie während der gesamten Nutzungsphase. Hart-PVC kommt hingegen ohne Weichmacher aus. Im Gegensatz dazu benötigen Polyethylen oder Polypropylen (PP) keine Weichmacher, um die verschiedenen Arten (HD = „high density“ oder LD = „low density“) einzustellen. Die Materialeigenschaften werden hier durch den Aufbau bzw. die Anzahl der Verzweigungen eingestellt. Bei schwach verzweigten Polymerketten ergibt sich HDPE, bei stärker verzweigten Polymerketten LDPE (Polcher et al. 2020).

Der Einsatz von PVC in Umweltlabeln ist in der Regel unerwünscht. Bei einer Recherche zum Einsatz von PVC in bestehenden Umweltzeichen wurden folgende Vergabekriterien gefunden:

- ▶ Das DE-UZ 30a (2019) zu Produkten aus Recycling-Kunststoffen schließt die Verwendung von Weich-PVC sowie von Hart-PVC mit Cadmium- oder Bleianteilen in Recyclingkunststoffen (Post-Consumer-Material = PCR-Material) aus. Damit wird die Verwendung von PVC jedoch über die Additive (Weichmacher, Schermetalle) begrenzt und nicht grundsätzlich. Fertigerzeugnisse aus Recyclingkunststoffen, die direkten Boden- und Wasserkontakt haben, müssen hinsichtlich der Migration von Schwermetallen in die Umweltmedien geprüft werden. Die Methoden werden in der Richtlinie 2009/48/EG über die Sicherheit von Spielzeug beschrieben. Im Hintergrundbericht zu den aktualisierten Vergabekriterien wird erläutert, dass in der vorangegangenen Fassung der Vergabekriterien PVC grundsätzlich ausgeschlossen war. Durch die Änderungen sollte das Recycling von Hart-PVC Materialien aus bestimmten Bauprofilen ermöglicht werden. So darf Cadmium zwar gemäß Eintrag 23 Anhang XVII der REACH-Verordnung nicht in Polymeren einschließlich PVC eingesetzt

¹⁸ <https://www.bund.net/themen/chemie/achtung-plastik/schadstoffe-in-plastik/>

werden. Für Recycling-Hart-PVC wurde jedoch eine Ausnahmeregelung bis zu einer Cadmiumkonzentration von maximal 0,1 Gew. % erlassen (Wirth und Jepsen 2020).

- ▶ In den Vergabekriterien für das UZ 120 (Februar 2011, Version 10) zu elastischen Bodenbelägen wird PVC zwar nicht explizit erwähnt. Der Einsatz von PVC als Kunststoffbelag ist jedoch durch das Verbot halogener organischer Verbindungen generell ausgeschlossen.¹⁹ Weichmacher aus der Gruppe der Phthalate dürfen nicht eingesetzt werden. Auch der Leitfaden zur umweltfreundlichen, öffentlichen Beschaffung von elastischen Bodenbelägen geht auf PVC nicht ein (Umweltbundesamt 2012).
- ▶ Im DE-UZ 155 für Schuhe und dem EU-Umweltzeichen für Schuhe (EU) 2016/1349 wird die Verwendung von PVC grundsätzlich ausgeschlossen.
- ▶ In einem Rechtsgutachten zur umweltfreundlichen, öffentlichen Beschaffung wird auf eine Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt in Berlin (VwVBU 2016) hingewiesen, nach der bestimmte Produkte/-gruppen (z. B. Einweggeschirr in Kantinen und Mensen, bestimmte Getränke in Einwegverpackungen, Farbmittel auf Schwermetallbasis oder Bauteile aus PVC unter bestimmten Bedingungen) nicht beschafft werden dürfen. Die VwVBU führt dazu aus, dass für Bauteile aus PVC, wie Fensterprofile, Rollläden, Türen, Dach- und Dichtungsbahnen, Rohre, Kabelkanäle und Kabel Beschaffungsbeschränkungen unterliegen, sofern die blei- und cadmiumfreie Stabilisierung des Neumaterials durch Herstellererklärung nicht belegt ist.²⁰
- ▶ In einer vergleichenden Studie zu den Regelungen der Bundesländer auf dem Gebiet der umweltfreundlichen Beschaffung ist lediglich in Hamburg ein Verzicht auf PVC vorgeschrieben, wenn geeignete Alternativprodukte zur Verfügung stehen (Schmidt und Dubbers 2014).
- ▶ Es sollte bei der Zulassung von PVC-Produkten geprüft werden, ob Organozinnverbindungen als Katalysatoren benutzt wurden und ein Leaching ausgeschlossen werden kann (s. a. Watermann et al. 1997).

Prinzipiell bestünde die Option, den Einsatz von Hart-PVC über die Begrenzung der kritischen Inhaltsstoffe (Phthalate, Cadmium) einzuschränken. In der Regel ist der Einsatz von PVC in Umweltlabeln unerwünscht. Es wurde daher vorgeschlagen, die Verwendung von PVC als chlororganische Verbindung und aufgrund der hohen Schadstoffanteile grundsätzlich auszuschließen.

Umsetzung in den Vergabekriterien

Die Verwendung des Kunststoffs Polyvinylchlorid (PVC) ist nicht zulässig.

¹⁹ Persönliche Mitteilung Frau Dr. Wurbs, Umweltbundesamt FG III 1.3 vom 11.6.2021.

²⁰ Verwaltungsv. für die Anw. von Umweltschutzanforderungen bei der Beschaffung von Liefer-, Bau- und Dienstleistungen (Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt – VwVBU) 23. Februar
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/service/gesetzestexte/de/download/beschaffung/VwVBU.pdf>

5.6.3 Anforderungen an Polymere und Kunststoffe

Herleitung der Kriterien

Zum Aufbau der Beschichtungen liegen oftmals unvollständige oder widersprüchliche Informationen vor. Neben PVC werden auch verschiedene Polyester, Polyurethane, Polyamide, Polypropylen, Polytetrafluorethylen verwendet. Insbesondere die unter Hartbeschichtungen verbreiteten Epoxidharze auf Basis von Bisphenol A gelten aufgrund der Einstufung von Bisphenol A als reproduktionstoxisch und der Aufnahme in die SVHC-Liste als problematisch. Hinzu kommen weitere Polymere, wie Kolophonium, Polyethylenglykol etc., die als Zusatzstoffe eingesetzt werden. In einigen Vergabekriterien für den Blauen Engel, insbesondere DE-UZ 154 „Textilien“ und DE-UZ 155 „Schuhe“, werden Kriterien für verschiedene Kunststoffe definiert, die sich allerdings an die Emissionen und Abfälle bei der Produktion sowie an die Forderung, Recyclingkunststoffe einzusetzen, richten. Dies betrifft Polyester, Polyamide, Polypropylen und Polyacrylate. Zudem darf der Antimonengehalt im Polyester 260 ppm oder von eluierbarem Antimon 30 mg/kg nicht übersteigen. Der Restgehalt an Acrylnitril in den Rohfasern muss weniger als 1,5 mg/kg betragen. Bei Polypropylenfasern dürfen keine Pigmente auf Bleibasis verwendet werden.

Aufgrund der Komplexität der verschiedenen für Unterwasseranstriche und -folien verwendeten Materialien fällt es schwer, hier geeignete Kriterien zu definieren.

Von den nicht ausgehärteten **Monomeranteilen** der Polymere geht oftmals eine (zyto)toxische Wirkung aus, die insbesondere in Hinblick auf die menschliche Gesundheit kritisch bewertet wird. Sowohl das DE-UZ 12a zu emissions- und schadstoffarmen Lacken als auch das entsprechende EU-Umweltlabel begrenzen daher den Restmonomergehalt. Diese dürfen gemäß DE-UZ 12a im Bindemittel 0,05 Masse-% nicht überschreiten. Auch das EU-Umweltzeichen fordert, dass nicht umgesetzte Monomere aus Bindemitteln einschließlich Acrylsäure im Endprodukt in maximal 0,050 % Massenanteil vorliegen. Als Nachweis werden keine Prüfungen, sondern die Vorlage einer Herstellererklärung einschließlich der CAS-Nummern und Einstufungen verlangt. Nach den Erkenntnissen aus der Marktrecherche sind die Restmonomergehalte der verwendeten Polymere auch den Herstellern meist nicht bekannt. Da es sich bei Unterwasseranstrichen eher um umweltoffene Anwendung handelt und der Gesundheitsschutz in Innenräumen nicht im Vordergrund steht, wird der Monomerrestgehalt als relativ unkritischer Parameter angesehen. Es wird daher vorgeschlagen, keine Kriterien bezüglich des Restmonomergehaltes für Antifoulinganstriche zu definieren. Bezüglich der Epoxidharze auf Basis von Bisphenol A werden derzeit Substitutionspotentiale diskutiert und BPA freie Produkte werden am Markt angeboten, so dass der Einsatz in einem Umweltzeichen kaum vertretbar erscheint.²¹

Allerdings sollten bestimmte Weichmacher reglementiert werden. Generell sind **Weichmacher** Substanzen, die einem Beschichtungstoff oder Kunststoff zugesetzt werden, um die Verformbarkeit/Elastizität zu verbessern. Hierbei wird zwischen äußeren und inneren Weichmachern unterschieden. Innere Weichmacher sind fest (kovalent) in die Polymermatrix gebunden, äußere Weichmacher können hingegen langsam freigesetzt und dann ausgewaschen werden (VDL 2019). Gemäß den Vergabekriterien des DE-UZ 12 a „Emissionsarme Lacke und Farben“ wird der Einsatz von weichmachenden Substanzen aus den Gruppen der Phthalate und Organophosphate untersagt. In den Vergabekriterien für Textilien (DE-UZ 154) und Schuhe (DE-UZ 155) wurde festgelegt, dass die Summe der genannten Phthalate und Weichmacher höchstens 1.000 mg/kg betragen darf.

²¹ Annex XV report 4,4'-isopropylidenediphenol (Bisphenol A) <https://echa.europa.eu/documents/10162/93bf4be3-9af6-d7ca-8b07-4e8fb42bad11> (Zugriff 3.9.2020)

Unter den Weichmachern sind insbesondere die endokrin wirkenden Phthalate umstritten. Die fünf wichtigsten Phthalate sind DIDP (Di-isodecyl-phthalat), DINP (Di-isononyl-phthalat), DEHP (Di(2-ethylhexyl)phthalat), DBP (Dibutylphthalat) und BBP (Benzylbutylphthalat). Die drei letztgenannten wurden von der ECHA als fortpflanzungsgefährdend eingestuft. Phthalate werden insbesondere für die Produktion von Weich-PVC verwendet. Mehr als 90 % der Phthalate gehen in die PVC-Produktion (Umweltbundesamt 2007).

Auch die Verwendung von perfluorierten und polyfluorierten Alkylverbindungen als Chemikalie oder Polymer (PFAS) sollte aufgrund ihrer Persistenz und teilweise auch Toxizität ausgeschlossen werden.

Umsetzung in den Vergabekriterien

In den Vergabekriterien werden mehrere Kunststoffadditive ausgeschlossen, wobei im Wesentlichen die REACH-Anforderungen an SVHC-Stoffe berücksichtigt werden. So sind Pigmenten oder Sikkativen, die Bleiverbindungen enthalten ausgeschlossen. Hiervon ausgenommen sind natürliche und produktionsbedingte Verunreinigungen bis zu 200 ppm. Weichmacher aus der Gruppe der Phthalate oder aus der Gruppe der Organophosphate dürfen Unterwasserbeschichtungen oder Kunststoffen ebenfalls nicht zugesetzt werden. Dies gilt auch für deren Vorprodukte. Ferner dürfen keine per- und polyfluorierten Chemikalien (PFAS), beispielsweise Fluorcarbonharze und -dispersionen, perfluorierte Tenside, perfluorierte Sulfon- und Karbonsäuren in den Produkten und Vorprodukten eingesetzt werden. Der Einsatz von Polytetrafluorethylen-Kunststoffen (PTFE) ist ebenfalls ausgeschlossen. Die Verwendung von Bisphenol A-basierten Kunstharzen oder ähnlichen Bisphenol-Verbindungen ist aufgrund der reprotoxischen und endokrinen Wirkungen nicht zulässig (SVHC-Stoff). Die gilt auch für fest in die Polymermatrix gebundene Bisphenol-Verbindungen (vgl. 5.7.3).

5.6.4 Alkylphenoethoxylate

Herleitung der Kriterien

Alkylphenoethoxylate (APEO) sind nicht-ionische Tenside wie Nonylphenolverbindungen, die eine emulgierende bzw. dispergierende Wirkung haben und auch als Emulgatoren für Emulsionspolymerisate auf Basis von Styrol-Butadien, Styrol-Acrylat, reinen Acrylat- oder PVC-Systemen eingesetzt werden. Die Produktpalette umfasst demnach auch Kunststoffbeschichtungen, Lacke, Klebstoffe und Dichtungsmassen (Leisewitz und Schwarz 1997). Gemäß den Vergabekriterien des DE UZ 12 a dürfen Produkte, die Alkylphenoethoxylate und/oder deren Derivate enthalten, dem Lack nicht zugesetzt werden. Als Nachweis gilt eine entsprechende Erklärung der Vorlieferanten oder der chemische-analytische Nachweis, wobei Verunreinigungen bis 0,1 Masse-% zulässig sind. Im Anhang M der Vergabekriterien zu DE-UZ 155 „Schuhe“ werden die Alkylphenoethoxylate und Alkylphenole genauer spezifiziert. Nicht verwendet werden dürfen

- ▶ Nonylphenol, Isomergemisch, CAS 25154-52-3
- ▶ 4-Nonylphenol, CAS 104-40-5
- ▶ 4-Nonylphenol, verzweigt, CAS 84852-15-3
- ▶ Octylphenol, CAS 27193-28-8
- ▶ 4-Octylphenol, CAS 1806-26-4
- ▶ 4-tert-Octylphenol, CAS 140-66-9

- ▶ Polyoxyethyliertes Octylphenol, CAS 9002-93-1
- ▶ Polyoxyethyliertes Nonylphenol, CAS 9016-45-9
- ▶ Polyoxyethyliertes p-Nonylphenol, CAS 26027-38-3

Umsetzung in den Vergabekriterien

Produkte, die Alkylphenoethoxylate (APEO) und/oder deren Derivate enthalten, dürfen Unterwasserbeschichtungen oder Kunststoffen nicht zugesetzt werden. Dies gilt auch für die Vorprodukte.

5.6.5 Zinnorganische Verbindungen

Herleitung der Kriterien

Zinnorganische Verbindungen werden als Katalysator zur Vernetzung und als Härter von Silikonen und PVC eingesetzt und sollten weitmöglichst ausgeschlossen werden. Bestehende Initiativen zur Substitution zinnorganischer Verbindungen wie Dibutylzinndilaurat durch die dänische Umweltbehörde in Kooperation mit der Firma Hempel sollten daher unterstützt werden (Olsen et al. 2019). Eine vollständige Substitution erscheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht umsetzbar zu sein. Daher sollte der Einsatz zinnorganischer Verbindungen gemäß der Empfehlung des BfR zu Materialien für den Lebensmittelkontakt: XV. Silikone als Katalysator für die Vernetzungsreaktion zulässig sein, wie es auch die Vergabekriterien DE-UZ 123 für Dichtstoffe vorsehen (BfR 2019). Dort wird die zulässige Konzentration von Zink-di-2-ethylhexoat oder Di-n-octylzinndimaleinat als Härter in Silikonharzen auf insgesamt höchstens 1,5 % begrenzt. Zudem sollten sie, wie oben dargelegt, in Konsumenten-Endprodukten nicht eingesetzt werden. Die häufigste notifizierte Einstufung von Zink-di-2-ethylhexoat (CAS 301-10-0) ist „Aquatic Chronic 2“ (H411) sowie „Skin Sens. 1“ (H317). Für Di-n-octylzinndimaleinat (CAS 15571-60-5) wurden keine Daten zur Einstufung gefunden.

Die in Beschichtungsmitteln eingesetzten Verbindungen wie Dibutylzinndilaurat, Dibutylzinn-diacetat oder Dibutylzinndineodecanoat unterstützen den Trocknungsprozess und werden in „Wintergrade“-Produkten eingesetzt, die für Verarbeitungen unter 10 °C ausgelegt sind. Für „Summergrade“-Produkte kann auf zinnorganische Zusätze weitgehend verzichtet werden (Iotun 2021).

Umsetzung in den Vergabekriterien

Zinnorganische Stoffe sind unter REACH streng reglementiert. Ihr Einsatz darf 0,1 Gew. % Zinn nicht übersteigen. Aus prinzipiellen Erwägungen ist die Verwendung zinnorganischer Verbindungen in den Vergabekriterien des Blauen Engels für Unterwasserbeschichtungen und andere Bewuchsschutzsysteme grundsätzlich nicht zulässig.

5.6.6 Titandioxid

Herleitung der Kriterien

Titandioxid wird als Weißpigment in Farben und Lacken eingesetzt. In den Vergabekriterien DE-UZ 12a und DE-UZ 102 wird TiO₂ nicht wegen seiner Nanoform thematisiert, sondern wegen seiner kanzerogenen Wirkung in staubförmiger Form (Einstufung als Carc. 2, H351 bei Inhalation). Da TiO₂ in Farben und Lacken nicht in staubförmiger Form vorliegt, wurde in Anlehnung an das DE-UZ 12a im Rahmen der Expertenanhörung folgende Ausnahmeregelung für TiO₂ vorgeschlagen: „wenn das Produkt als flüssiges Gemisch in Verkehr gebracht wird, da sich die Einstufung nur auf einatembare Stäube bezieht“.

Umsetzung in den Vergabekriterien

In den Vergabekriterien wurde in Anhang E der Vergabekriterien mit der Zuordnung nicht verwendungsfähiger Gefahrstoffe eine Fußnote aufgenommen, nach der Titandioxid trotz der Einstufung als Carc. 2, H351 in flüssigen Gemischen oder in einer festen, nicht pulvrigen Form von den Ausschlusskriterien ausgenommen ist, da sich die Einstufung nur auf einatembare Stäube bezieht. Die Verwendung von TiO₂ in Nanoform wird im nächsten Kapitel thematisiert.

5.6.7 Verwendung von Nanopartikeln

Herleitung der Kriterien

Der Einsatz von Nanotechnologie im Bereich der Unterwasseranstriche eröffnet ein hohes Innovationspotential. Andererseits werden die Risiken von Nanopartikeln kontrovers diskutiert. In den Vergabekriterien zu emissionsarmen Lacken und Farben ([DE-UZ 12a](#)) werden lediglich (verharmlosende) Werbeaussagen mit dem Begriff „Nano“ untersagt, nicht Nanopartikel insgesamt. In anderen Vergabekriterien (u. a. DE-UZ 154 Textilien) wird der Einsatz von Nanosilber (als Biozid) ausgeschlossen. Zudem werden „technisch hergestellte Nanomaterialien“ ggf. über die grundsätzlichen stofflichen Anforderungen (Einstufung in bestimmte H-Sätze) limitiert. Die Einstufung/Testung muss dann anhand von geeigneten Daten für die eingesetzte Nanoform erfolgen. Ein Beispiel ist Titandioxid (TiO₂), das als Weißpigment, UV-Blocker und Lebensmittelzusatzstoff (E 1171) eingesetzt wird, jedoch in Nanoform auch photokatalytisch wirkt und z. B. für die photokatalytische Selbstreinigung (Abbau organischer Substanz durch Hydroxylradikale) Verwendung findet.

Mit der Verordnung (EU) 2018/1881 wurden spezifische Anforderungen für Stoffe in Nanoformen eingeführt, die in Mengen von 1 Tonne oder mehr hergestellt oder in die EU eingeführt werden (Anhang VII REACH ff). Hier wird z. B. mitgeteilt, dass Registranten von Nanoformen weitere Prüfungen vorzuschlagen sind oder weitere Prüfungen von der ECHA verlangt werden können, wenn es Hinweise darauf gibt, dass bestimmte Partikeleigenschaften die Gefahren oder die Exposition gegenüber diesen Nanoformen signifikant beeinflussen. Seit 1.1.2021 müssen die spezifischen Anforderungen für Stoffe mit Nanoformen auch in den Sicherheitsdatenblättern aufgeführt werden (Änderung Anhang II der REACH-Verordnung durch Verordnung (EU) 2020/878).

Es wird empfohlen Nanobeschichtungen nicht prinzipiell auszuschließen, sondern über deren Funktion (keine biozide Wirkung) bzw. deren gefahrstoffrechtliche Einstufung zu reglementieren. Die Verwendung der Nanopartikel sollte in keinem Fall zu einer Einstufung des Produktes als gewässertoxisch (H400, H410, H411, H412, H413) führen. Bei der stofflichen Bewertung ist die Nanoform zu berücksichtigen. Es sollte aber auch berücksichtigt werden, dass als „Nano“ deklarierte Beschichtungen bislang keinerlei Wirksamkeit zeigten, sodass neben den Inhaltsstoffen auch der Nachweis einer Wirksamkeit besonders wichtig erscheint ([Watermann et al. 2010](#)).

Auf der Expertenanhörung am 8.9.21 wurde mehrheitlich beschlossen, den Einsatz von Nanopartikel in Unterwasserbeschichtungen und anderen Bewuchsschutzsystemen zunächst auszuschließen. Zum einen ist deren Wirksamkeit bisher nicht belegt, zum anderen gibt es fast keine Produkte auf dem Markt. Hauptargument ist aber die fehlende regulatorische Bewertung von Nanopartikeln. Das Konzept hierfür wird derzeit auf EU-Ebene erst vorbereitet. Um künftige Innovationen in diesem Bereich nicht zu behindern, kann der Geltungsbereich der Vergabekriterien auf Antrag in Rücksprache zwischen RAL gGmbH und UBA erweitert werden.

Umsetzung in den Vergabekriterien

Die Verwendung von Nanomaterialien ist nicht zulässig. Allerdings soll das Thema Nanotechnologie bei der nächsten Überarbeitung der Vergabekriterien nach aktuellem Stand der Wissenschaft und Technik neu bewertet werden.

5.6.8 Silikonöle

Herleitung der Kriterien

Silikonöle werden z. T. in Antihafbeschichtungen auf Silikonbasis (Grundbaustein meist Polydimethylsiloxan, PDMS) eingesetzt, um durch das Ausschwitzen die Antifoulingwirkung zu verstärken. Silikonöle sind persistent, so dass ihre Verwendung in den Vergabekriterien grundsätzlich ausgeschlossen werden sollte. Ersatzstoffe, die denselben Effekt hervorrufen sind Paraffine, Wachse oder Fettsäuren (Watermann et al. 2004). Einige zyklische Silikonöle wurden in die SVHC-Kandidatenliste aufgenommen. Dies betrifft die Verbindungen Octamethylcyclotetrasiloxan = D4 (CAS 556-67-2), Decamethylcyclopentasiloxan = D5 (CAS 541-02-6) und Dodecamethylcyclohexasiloxan = D6 (CAS 540-97-6), die alle drei als PBT- bzw. vPvB-Stoffe eingestuft wurden.²² In den Sicherheitsdatenblättern potentieller Zeichennehmer wurden D4, D5 und D6 in mehreren Antifoulingbeschichtungen (Silic One, SIGMAGLIDE 1290 BASE WHITE) identifiziert. Dort werden diese jedoch als Entschäumer eingesetzt und sind als Restmonomere in Konzentrationen von 0,1-0,3 % als Verunreinigung vorhanden (Protokoll Fachgespräch 15.6.21). Eine intendierte Freisetzung findet somit nicht statt. In der Arbeit von Nendza (2007) werden diese Verbindungen nicht erwähnt.

Als Diskussionsgrundlage wurde zunächst vorgeschlagen, alle ausschwitzbaren Silikonöle in den Vergabekriterien aufgrund deren Persistenz auszuschließen. Gegebenenfalls könnten Silikonöle, die als Lebensmittelzusatzstoff eingesetzt oder gegen deren Verwendung in Materialien mit Kontakt zu Lebensmittel oder bei Kontakt mit Trinkwasser keine Bedenken bestehen, von dem allgemeinen Verbot ausgenommen werden:

- a) Das Silikonöl Polydimethylsiloxan ist ein zugelassener Lebensmittelzusatzstoff (E900) und darf als Schaumverhütungsmittel in verschiedenen Lebensmitteln in Konzentrationen von 10 bis 100 mg/kg eingesetzt werden.²³
- b) Von dem BfR wurden folgende Silikonöle in Materialien mit Lebensmittelkontakt zugelassen:²⁴ Lineare oder verzweigte und/oder cyclische Organopolysiloxane mit Methylgruppen allein oder n-Alkyl(C2-C32)-, Phenyl – und/oder Hydroxylgruppen am Siliciumatom und deren Kondensationsprodukte mit Polyethylen- und/oder Polypropylenglykol und/oder Polyalkylen(C2-C4)glycolmonoalkyl(C1-C4)ether. Es dürfen jedoch keine cyclischen Polysiloxane enthalten sein, die neben einer Phenylgruppe ein Wasserstoffatom oder eine Methylgruppe am gleichen Siliciumatom tragen. Als zweite Gruppe sind lineare oder verzweigte Organopolysiloxane mit zusätzlich bis zu höchstens 5 % Wasserstoff und/oder Alkoxy(C2-C4)- und/oder Carboalkoxy-alkyl(-(CH₂)₂₋₁₇-C(O)-O-(CH₂)₀₋₁₇CH₃)- und/oder Hydroxyalkyl(C1-C3)-Gruppen am Siliciumatom zugelassen.
- c) Die UBA-Übergangsempfehlung zur trinkwasserhygienischen Beurteilung von Silikonölen im Kontakt mit Trinkwasser verweist auf die zugelassenen Additive Methylsilsesquioxan (CAS 68554-70-1, Methyltrimethoxysilan < 1 mg/kg) und Polydimethylsiloxan (CAS 63148-62-9, Molekulargewicht > 6800 Dalton).²⁵

Nendza (2007) untersuchte den Einfluss von Silikonölen in nicht-erodierenden Antihaf-Beschichtungen auf Silikonbasis. Silikonelastomere bilden nach der Applikation eine gummiartige Schicht auf dem Schiffsrumpf, haben allerdings nur eine geringe mechanische Haltbarkeit. Daher werden vielen Produkten zur Stabilisierung bis zu 50 % Füllstoffe wie CaCO₃, TiO₂, Fe₃O₄,

²² <https://echa.europa.eu/documents/10162/2be7bcbf-f797-c28c-2c67-939664155c7c> (Zugriff 20.4.2020)

²³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Silikon%C3%B6le> (Zugriff 07.09.2020)

²⁴ Siehe Fußnote 8.

²⁵ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5620/dokumente/silikon-uebergangsempfehlung_2_aenderung.pdf (Zugriff 07.09.2020)

neben Weichmachern auf PDMS-Basis zugegeben, die zugleich die Wirksamkeit erhöhen. Die Produkte bestehen dann aus einer Silikonharzmatrix, mit inkorporierten Silikonölen (1-10 %), die nicht fest in der Matrix gebunden sind. Wenn diese Silikonöle „ausschwitzen“, gelangen sie in die Umwelt. PDMS sind grundsätzlich persistent. Sie adsorbieren an Schwebstoffe und können mit diesen sedimentieren, daher stellen marine Sedimente die ultimative Senke dar. Typische Silikonöle in marinen Beschichtungen sind Dimethylpolysiloxanöl (CAS 63148-62-9), Dimethyl- und Diphenylsilikonöl (CAS 68083-14-7), Methylphenylsilikonöl (CAS 63148-52-7) und Methylphenylsilikonöl (CAS 63148-52-7). Es werden aber zahlreiche weitere Silikonöle beschrieben, deren Markrelevanz unklar ist (Nendza 2007).

Der Ausschluss ausschwitzbarer Silikonöle ist neben den genannten ökologischen Gründen auch dadurch gerechtfertigt, dass Silikonöle in modernen PDMS-Systemen inzwischen durch Hydrogele, Paraffine oder Lanolin ersetzt worden sind. Diese hydrophilen Stoffe in der hydrophoben Silikonmatrix haben die Wirksamkeit der Beschichtungen nochmals enorm verstärkt, da solche amphiphilen Oberflächeneigenschaften in der Natur nicht vorkommen und deshalb von den Organismen gemieden werden. Zudem sollten Silikonöle, die bestimmungsgemäß aus Unterwasserbeschichtungen ausgewaschen werden, auch aufgrund ihrer fehlenden biologischen Abbaubarkeit ausgeschlossen werden (vgl. 5.6.12). Der chemische Nachweis der Siloxane gilt gemäß den ECHA Dokumenten zur Identifizierung als SVHC-Stoffe als sehr schwierig. Daher könnte der Ausschluss über eine Herstellererklärung nachgewiesen werden.

Umsetzung in den Vergabekriterien

Die Verwendung von Silikonölen, die bestimmungsgemäß aus Beschichtungen ausschwitzen, ist untersagt. Davon ausgenommen sind gebundene Silikonöle, die in Materialien für den Lebensmittelkontakt zugelassen oder aus trinkwasserhygienischer Sicht als unbedenklich eingestuft wurden.

5.6.9 Hydrogele

Hydrogele werden wie Lanolin als effektivere Ersatzstoffe für die zuvor verwendeten Silikonöle in Silikonbeschichtungen eingesetzt (s. Kap. 4.2.2). Als Hydrogele werden überwiegend (zu 60-99 %) aus Wasser bestehend Polymernetzwerke bezeichnet, wie sie bei Meeresorganismen wie Algen, Fischen und Quallen sowie bei weichen Kontaktlinsen vorkommen. Hydrogele haben, ähnlich wie Meeresorganismen auch, eine weiche und feuchte Struktur. Als Polymerbasis dienen z. B. organische Polyelektrolyte, natürliche Polymere, vernetzte Polyvinylalkohole (PVA) und Polysaccharide. Die Antifouling-Wirkung von Hydrogelen mit Hydroxy- und Sulfongruppen gegen die Ansiedlung von Seepocken ist gut belegt. Der zugrunde liegende Mechanismus ist noch nicht vollständig bekannt, es wird jedoch vermutet, dass die Hydratation der Polymerkette die Adhäsion von Zementprotein der Cyprislarve behindert. Aufgrund des hohen Wassergehaltes und der geringen Toxizität werden Hydrogele als umweltfreundliche Antifouling-Materialien angesehen (Murosaki et al. 2011). Welche Polymere als Grundlage für Hydrogele in der Praxis in Antifouling-Beschichtungen eingesetzt werden, ist bislang nicht bekannt. Während das aus Schafswolle gewonnene Lanolin(=Wollwachs) als Naturstoff als unproblematisch eingestuft werden kann (es wird z. B. auch in Kosmetika eingesetzt), sollten Hydrogel-Polymere noch dahingehend geprüft werden, wie diese einzustufen sind.

In den Vergabekriterien werden Hydrogele nicht extra thematisiert, werden jedoch indirekt über das Verbot einer intendierten Freisetzung von Polymeren mit Ausnahme biologisch abbaubarer Naturstoffe, zu denen Lanolin und andere natürliche Polymere gehören, berücksichtigt.

5.6.10 Zinkoxid

Herleitung der Kriterien

Zinkoxid wird in größeren Mengen sowohl in bioziden als auch in „biozidfrei“ deklarierten Antifoulinganstrichen zur Steuerung der Polierrate in selbstpolierenden Anstrichen verwendet (Watermann et al., 2005). Die Freisetzung von Zink aus Antifouling Farben ist jedoch mit einer deutlichen Ökotoxizität verbunden (Karlsson et al., 2010). Zinkoxid ist nach CLP-VO als H400 (sehr giftig für Wasserorganismen) sowie H410 (sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung) eingestuft. Entsprechend der CLP -Einstufungsregeln für Gemische sind Produkte mit einem Anteil an Zinkoxid ab 0,25 % als chronisch 3 (H412) und ab 2,5 % Zinkoxid als chronisch 2 (H411) einzustufen. Eine Einstufung des Gemisches in chronisch 1 (H410) erfolgt erst ab einen Anteil von 25 % Zinkoxid. Demnach sind Konzentrationen unterhalb von 2,5 g/kg ZnO zulässig, wenn keine anderen umweltgefährlichen Substanzen im Gemisch enthalten sind.

Zinkoxid wird auch als Hilfsstoff bei der Verwendung von Zinkpyrithion eingesetzt. In der Liste der zulässigen Topfkonservierungsmittel des DE-UZ 12a (Farben, Lacke) wird u. a. auch 200 ppm Zinkpyrithion als Grenzwert aufgeführt, wobei als Hilfsstoff zusätzlich Zinkoxid bis maximal 500 ppm zulässig ist.

Da Zinkoxid ursprünglich als biozider Wirkstoff identifiziert, aber nicht als solcher klassifiziert wurde, wird der Status nach Biozidrecht immer wieder widersprüchlich diskutiert.²⁶ Fakt ist, dass der Einsatz als biozider Wirkstoff nach Biozidrecht nicht zulässig ist und herstellerseits andere Einsatzzwecke (Pigment, Steuerung der Selbstpolierrate, Korrosionsschutzmittel für Stahl) aufgeführt werden. Allerdings wird in der Literatur empfohlen, Zinkoxid-basierte Nanolacke als Antifouling einzusetzen. Hierbei wird das Zinkoxid als Pigment bzw. zur Steuerung der Polierrate – oft in Verbindung mit kupferhaltigen Bioziden – in eine Alkydharzmatrix eingebunden. Durch in situ Antifouling-Tests wurde die Wirksamkeit bestätigt (Wezenbeek et al. 2018). In der Arbeit von Al-Fori et al. (2014) wurden die Antifouling-Eigenschaften von Zinkoxid-Nanobeschichtungen (5 und 10 mM = 407 und 814 mg/kg) gegenüber Bakterium *Acinetobacter sp.*, Bryozoen *Bugula neritina* und Algen *Tetraselmis sp.* In Laborexperimenten untersucht. Die Beschichtungen wurden 5 Stunden lang unter künstlichem Sonnenlicht und im Dunkeln (keine Bestrahlung) getestet. Dabei wurde unter leichter Bestrahlung eine hohe Mortalität festgestellt. Die Autoren folgerten daraus, dass der Antifouling-Effekt auf den photokatalytisch erzeugten reaktiven Sauerstoffspezies beruht. Auch in Nanoform wird Zinkoxid eine Antifoulingwirkung zugeschrieben.²⁷ In der Arbeit von Dobretsov et al. (2020) wurde die Ökotoxizität verschiedener ZnO-Nanostrukturen gegenüber Mikroalgen (*Dunaliella salina*), Crustacea (*Artemia salina*) und Bakterien (*Bacillus cereus*) untersucht und hierbei festgestellt, dass ZnO-Nanorods (stäbchenförmige Nanopartikel) im Vergleich zu anderen ZnO-Nanostrukturen die geringste Ökotoxizität aufweisen. Daher wurden diese für den Einsatz in Antifoulinganstrichen empfohlen.

Aus Umweltschutzsicht ist der Einsatz von Zinkoxid in selbstpolierenden Schiffsanstrichen kritisch zu sehen und sollte limitiert werden. In der ersten Machbarkeitsstudie zu einem Umweltzeichen für nicht-biozide Antifouling-Produkte wurde gefordert, dass Schiffsanstriche, die Zinkoxid in einer Konzentration $\geq 2,5$ % enthalten, die zu einer Einstufung als chronisch 2 (H411) führt, nicht ausgezeichnet werden sollen. Das Umweltbundesamt prüft im Rahmen der

²⁶ CEPE. 2011a. CEPE Directive interpretation of zinc oxide use. CEPE/JW/20110902. <http://www.cepe.org/efede/public.htm#!HTML/3006> sowie

CEPE. 2011b. Function of zinc oxide in antifouling paints. CEPE/JW/20110902. <http://www.cepe.org/efede/public.htm#!HTML/3006>

²⁷ <https://www.farbeundlack.de/Wissenschaft-Technik/Anwendungsbereiche/Korrosionsschutzlacke-Schiffslacke/Zinkoxid-basierte-Nalxch> würde nolacke-als-Antifouling-einsetzen

Zulassung von Biozid-Produkten, ob enthaltenes Zinkoxid unter Berücksichtigung der eingesetzten Konzentrationen als besorgniserregender Stoff (substance of concern, SoC) zu bewerten ist und dieses mit in der Umweltrisikobewertung betrachtet werden muss (mündl. Mitteilung UBA IV 1.2, 2020).

Umsetzung in den Vergabekriterien

Die Verwendung von Zinkoxid als Hilfsstoff (z. B. Pigment, UV-Absorber, Katalysator) darf nur erfolgen, wenn dies nicht zu einer gefahrstoffrechtlichen Einstufung des Produktes in H400, H410, H411, H412 oder H413 führt.

5.6.11 Kupfer als Katalysator

Herleitung der Kriterien

Für die Herstellung von Silikonen kann elementares Kupfer oder eine Kupferverbindung als Katalysator benötigt werden. Elementares Kupfergranulat (CAS 7440-50-8, Länge 0,9 – 6,0 mm, Breite 0,494 – 0,949 mm) darf als biozider Wirkstoff der PA 21 nicht in mit dem Blauen Engel ausgezeichneten Produkten eingesetzt werden. Kupfergranulat ist als aquatisch chronisch 2 (H411) eingestuft. Demnach führen Konzentrationen ab 2,5% zu einer Einstufung des Produktes in chronisch 3 (H412), so dass der Verwendung als Katalysator in Silikonbeschichtungen enge Grenzen gesetzt sind. Kupfer(II)oxid (CAS 1317-38-0) ist als aquatisch akut 1 (H400) sowie als aquatisch chronisch 1 (H410) eingestuft und ebenfalls als biozider Wirkstoff der PA 21 ausgeschlossen. Bei Verwendung als Hilfsstoff wären Konzentrationen größer/gleich 0,25 % (2,5 g/kg CuO) ausgeschlossen, da sie zu einer Einstufung des Produktes in H412 führen würden.

Umsetzung in den Vergabekriterien

Die Verwendung in geringen Mengen als Katalysator in Silikonbeschichtungen darf gemäß den Vergabekriterien nur erfolgen, wenn dies nicht zu einer gefahrstoffrechtlichen Einstufung des Produktes in H400, H410, H411, H412 oder H413 führt.

5.6.12 Freisetzung von Kunststoff

Herleitung der Kriterien

Obwohl die Diskussion um den Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt derzeit ein Hauptthema in der öffentlichen Umweltdiskussion ist, wurden Einträge aus Antifoulinganstrichen bis vor Kurzem wenig beachtet. In den Arbeiten von Essel et al. (2015) oder UNEP (2016) zu den verschiedenen Quellen für Mikroplastik werden lediglich polymerhaltige Strahlmittel (Abrasionspulver) zur Reinigung von Schiffsrümpfen oder die illegale Abfallentsorgung von Schiffen berücksichtigt. In jüngerer Zeit rücken jedoch auch Schiffsanstriche (insbesondere bei den selbstpolierenden Anstrichen) in den Fokus. Die Meeresschutzorganisation Deepwave fordert, abriebfeste Antifoulinganstriche zu verwenden. Bei der Reinigung des Bootes gelangen Plastik sowie die dabei verwendeten Biozide in das umgebende Wasser. Daher sollten die Boote in gesicherten Waschplätzen an Land gereinigt und die Antifoulingreste gezielt entsorgt werden.²⁸

Soroldoni et al. (2017, 2018) untersuchten das Vorkommen und die Toxizität von Antifouling-Farbparkeln, die bei der Wartung von Bootsrümpfen freigesetzt wurden, in Ästuar-Sedimenten des Rio Grande in Südbrasilien. Hierbei wurden hohe Konzentrationen an Metallen (Kupfer, Zink) und des Biozids 4,5-Dichloro-2-octyl-4-isothiazolin-3-one (DCOIT) gefunden. In Kontakttests (2 g Sediment mit 15 mL Salzwasser überschichtet) war die Reproduktionsrate des

²⁸ <https://www.deepwave.org/vermeidung-des-mikroplastikeintrags-in-die-marine-umwelt-workshop/> (Zugriff 17.34.2020)

benthischen Copepoden *Nitokra sp.* deutlich reduziert. In einer Folgeuntersuchung an der Patos-Lagune in Südbrasilien wurden 10 Standorte im Mündungsgebiet untersucht. Hierbei konnte die Art und Form der Antifouling-Farbpartikel anhand der Metallkonzentrationen (Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sn und Zn) und Biozide (Irgarol = Cybutryn CAS 28159-98-0, Diuron CAS 330-54-1, Dichloroethylisothiazolinon = DCOIT CAS 64359-81-5 und (Benzothiazol-2-ylthio)methylthiocyanat = TCMTB CAS 21564-17-0) direkt in Beziehung zu den verwendeten Schiffsanstrichen und Farbentfernungsmethoden gesetzt werden. Obwohl Fischereihäfen als eine Quelle der Partikel identifiziert wurden, waren zahlreiche diffuse Quellen auszumachen, da sich die Wartung der Boote weiträumig verteilt.

Watermann et al. (2019) schätzten den Eintrag von Bioziden und Polymeren aus Antifouling-anstrichen in den skandinavischen Ländern und Deutschland anhand von Verbrauchszahlen ab. Die Autoren stellten fest, dass die Freisetzung von Polymeren bzw. Mikroplastik durch Verwendung nicht-biozider Hartbeschichtungen im Vergleich zu herkömmlichen erodierenden bzw. selbstpolierenden Anstrichen drastisch reduziert werden kann. Während letztere über ihre Lebensdauer etwa 70–85 % der eingesetzten Polymere, Oligomere, Biozide und Additive (Weichmacher, Pigmente etc.) in die marine Umwelt freisetzen, sind es bei den Hartanstrichen nur 1-5 %.

Insbesondere die Arbeit von Dibke et al. (2021) führte zu einem Umdenken, da hier erstmals deutlich nachgewiesen wurde, dass sich das in Schiffsfarben enthaltene Mikroplastik im Meerwasser an den Schifffahrtswegen ansammelt. In einem aktuellen Reviewartikel schätzen auch Gaylarde et al. (2021) den Beitrag von Antifoulingfarben an der Freisetzung von Mikroplastik ab. Demnach stammen viele Farbreste von Antifouling-Farben, die auf Handelsschiffen und Freizeitbooten verwendet werden. Diese enthalten nicht nur Schwermetalle und Biozide, sondern setzen diese auch durch Auslaugung frei.

Daraufhin wurde die Gruppe der selbstpolierenden und erodierenden Beschichtungen, die in den Zwischenberichten zunächst bezüglich Wirkungsprinzipien und Marktanalyse bearbeitet worden war (s. Kap. 4.2.7), nach intensiver Diskussion von einer Teilnahme am Umweltzeichen Blauer Engel ausgeschlossen, da bei all diesen Beschichtungen eine intendierte Freisetzung von Stoffen in die Gewässer stattfindet. Erodierende Beschichtungen enthalten instabile Polymere, die sich bei Wasserkontakt auflösen oder abpolieren. Dabei werden alle Pigmente, Füllstoffe, Weichmacher und Konservierungsstoffe bestimmungsgemäß freigesetzt. In der ersten Machbarkeitsstudie zu einem Umweltzeichen für nicht-biozide Antifouling-Produkte wurde daher gefordert, dass alle organischen Bestandteile mit einem Anteil über 1 % abbaubar sein müssen und nicht bioakkumulieren dürfen. Dies bezieht sich sowohl auf die Bindemittel (Epoxid, Methylmethacrylate, Kolophonium etc.) als auch auf organische Additive, Pigmente und Füllstoffe (Watermann et al. 2004). Es erscheint jedoch sehr fraglich, ob der Nachweis der Abbaubarkeit in umweltrealistischen Zeiträumen für diese hochkomplexen Verbindungen tatsächlich gewährleistet ist. Bisher liegen zu dieser Problematik keine wissenschaftlich fundierten Untersuchungen vor.

Der Abrieb polymerhaltiger Partikel spielt auch bei anderen Umweltzeichen eine Rolle. Das EU-Umweltzeichen für Lacke sieht z. B. vor, dass Fußbodenbeschichtungen und -farben einen Abriebwiderstand aufweisen müssen, der nach 1 000 Zyklen mit einer Last von 1 000 g und einem CS10-Reibrad gemäß EN ISO 7784-2 einem Masseverlust von höchstens 70 mg entspricht.

Der Einsatz selbstpolierender Schiffsanstriche wird vor dem Hintergrund der Mikroplastikdiskussion grundsätzlich kritisch gesehen. Daher sollte diese Gruppe aus dem Anwendungsbereich für ein Umweltzeichen ausgeschlossen werden. Alternativ wären die Inhaltsstoffe und deren Abbaubarkeit zu beschreiben. So kann z. B. davon ausgegangen werden,

dass Naturstoffe wie das aus Baumharzen gewonnene Kolophonium²⁹ oder das bei der Wäsche von Schafwolle gewonnen Wollwachs bzw. Wollfett (auch als Lanolin bezeichnet) zumindest längerfristig abbaubar sind. Von anderen Inhaltsstoffen wie Polyacrylverbindungen oder Polymethylmethacrylaten ist das eher nicht anzunehmen. Die Verbindung von selbstpolierenden Anstrichen mit Zinkoxid ist in jedem Fall kritisch zu sehen.

Es wird vorgeschlagen, selbstpolierende Unterwasseranstriche nur zuzulassen, wenn der biologische Abbau der freigesetzten Komponenten nachgewiesen wird. Als Nachweis wird vorgeschlagen, auf die ECHA-Vorgaben zur Einschränkung des Einsatzes von Mikroplastik zu verweisen. So hat die ECHA im Januar 2019 eine Beschränkung der absichtlichen Verwendung von Mikroplastik in Produkten vorgeschlagen, um deren Freisetzung in die Umwelt zu verringern. Im (Entwurf) des Anhang XV Restriction Report on Intentionally Added Microplastics³⁰ wird die gezielte Zugabe von Mikroplastik eingeschränkt. Allerdings wurde eine Ausnahmeregel für Mikroplastikpartikel aufgenommen, die biologisch abbaubar sind. Der Nachweis erfolgt in einem der Tests auf leichte biologische Abbaubarkeit (OECD 301 Serie, OECD 310) innerhalb von 28 Tagen oder in „enhanced“ Tests innerhalb von 60 Tagen. Zudem werden Mikroplastikpartikel, die z. B. in Abbautests nach DIN EN ISO 14851 oder DIN EN ISO 14852 90 % des Abbaugrades eines Referenzmaterials wie mikrokristalliner Cellulose erreichen, als biologisch abbaubar angesehen.³¹ Gemäß dieser Einschätzung wird vorgeschlagen, selbstpolierende und erodierende Anstriche vom Anwendungsbereich auszuschließen.

Damit wird der Fokus im Bereich der Beschichtungen auf reinigungsfähige Hart- oder Antihafanstriche gelegt. Die Kriterien zum Abrasionswiderstand sind in der Methode ASTM D4060-19. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser definiert (vgl. Kap. 5.7.5.2).

Umsetzung in den Vergabekriterien

Die intendierte Freisetzung von Kunststoffen (wie z. B. Mikroplastik) ist nicht zulässig. Damit werden explizit erodierende und selbstpolierende Beschichtungen ausgeschlossen. Davon ausgenommen sind lediglich bioabbaubare Naturstoffe (vgl. 5.6.13). Auch die Verwendung von Silikonölen, die bestimmungsgemäß aus Beschichtungen ausschwitzen, ist untersagt (vgl. 5.6.8).

5.6.13 Freisetzung von bioabbaubaren Naturstoffen

Herleitung der Kriterien

Vereinzelte werden auch Versuche unternommen, die Antifoulingseigenschaften durch Auftragen von biologisch abbaubaren Naturstoffen wie Carnaubawachs zu erzielen, deren Wachsschicht sich dann im Gebrauch langsam auflöst bzw. ablöst, ohne dass eine Polymermatrix, wie bei den selbstpolierenden bzw. erodierenden Beschichtungen mit freigesetzt wird. Diese Anwendungen könnten für die Anwendung des Blauen Engels geeignet sein, wenn sie einen Abbautest, wie er in der ECHA-Ausnahmeregelung für Mikroplastik vorgesehen ist, bestehen. Allerdings werden dort natürliche Polymere, die nicht chemisch modifiziert wurden, sowie biologisch abbaubare Polymere und wasserlösliche Polymere nicht zu Mikroplastik gerechnet (vgl. auch [Faber et al. 2021](#), [Torres and De-la-Torre 2021](#)). Prinzipiell sind natürliche Polymere oftmals aufgrund ihrer limitierten Wasserlöslichkeit zwar nicht leicht biologisch abbaubar, wohl aber über einen

²⁹ Für Kolophonium (engl. Rosin, CAS 8050-09-7) liegt ein ECHA-Datensatz vor, nach dem die Substanz leicht biologisch abbaubar ist. <https://echa.europa.eu/de/substance-information/-/substanceinfo/100.029.518> (Zugriff am 30.08.2020)

³⁰ <https://echa.europa.eu/documents/10162/05bd96e3-b969-0a7c-c6d0-441182893720> (Zugriff 02.09.2020)

³¹ DIN EN ISO 14851 (2019-07): Bestimmung der vollständigen aeroben Bioabbaubarkeit von Kunststoff-Materialien in einem wässrigen Medium - Verfahren mittels Messung des Sauerstoffbedarfs in einem geschlossenen Respirometer.

DIN EN ISO 14852 (2018-12): Bestimmung der vollständigen aeroben Bioabbaubarkeit von Kunststoff-Materialien in einem wässrigen Medium - Verfahren mittels Analyse des freigesetzten Kohlenstoffdioxides.

längeren Zeitraum. Wichtigstes Kriterium sollte daher der Nachweis sein, dass die eingesetzten Naturstoffe nicht persistent sind.

Als Nachweis einer nicht vorhandenen Persistenz können in Anlehnung an die ECHA-Ausnahmeregelung für Mikroplastik folgende Testsysteme verwendet werden:

- ▶ Leichte biologische Abbaubarkeit OECD 301 B, C, D, F, OECD 310: Kriterium 60 % Abbau in 28 d (CO₂ Entwicklung oder Sauerstoffzehrung)
- ▶ Enhanced Tests OECD 301 B, C, D, F, OECD 310: Kriterium 60 % Abbau in 60 d (CO₂ Entwicklung oder Sauerstoffzehrung), ggf. Verwendung größerer Testgefäße
- ▶ Inhärente biologische Abbaubarkeit OECD 302 B, C: Kriterium 70 % Mineralisation (CO₂ Entwicklung oder Sauerstoffzehrung) in 7 Tagen, lag-Phase < 3 Tage
- ▶ Bioabbau in Bezug auf Referenzmaterial, u. a. EN ISO 14851 oder EN ISO 14852: Mineralisation ≥ 90 % der Abbaubarkeit des Referenzmaterials innerhalb von 6 Monaten. Als geeignete Referenzmaterialien werden mikrokristalline Cellulose oder Polyhydroxybutyrat aufgeführt.

Zwar wird auch auf Simulationstests bzw. Kompartiment-spezifische, höherwertige Abbaustudien wie OECD 307, 308 oder 309 hingewiesen, die als Goldstandard für die Ableitung der Persistenzkriterien nach der ECHA Guidance Chapter R.11 herangezogen werden.³² Diese werden jedoch in der Regel mit ¹⁴C markierten (radioaktiv gelabelten bzw. synthetisierten) Stoffen durchgeführt, was bei Naturstoffen nicht praktikabel erscheint. Zudem ist der Aufwand für solche Simulationsstudien sehr hoch und diese sind damit kostenaufwändig.

Für viele Naturstoffe liegen publizierte Abbaudaten vor. So erwies sich z. B. Carnaubawachs, das aus den Blättern der brasilianischen Carnaubapalme gewonnen wird, als Bionanocomposite im Boden innerhalb von 45 Tagen als weitgehend abbaubar ([Castro e Silva et al. 2019](#)). Allerdings sind viele dieser Studien nicht Guideline konform (hier Gewichtsabnahme statt Mineralisierung), so dass die Interpretation entsprechende Expertise voraussetzt. Daher wurde vorgeschlagen, die Antragsteller aufzufordern, aussagekräftige Unterlagen zur Abbaubarkeit der Naturstoffe (Literaturhinweise oder Studienberichte) vorzulegen, die dann von den Expertinnen und Experten des Umweltbundesamtes geprüft werden.

Umsetzung in den Vergabekriterien

Das Freisetzen von bioabbaubaren Naturstoffen, die nicht chemisch modifiziert sind, mit dem Ziel einer Antihafwirkung ist im Regelfall dann zulässig, wenn keine Polymermatrix, wie bei den selbstpolierenden bzw. erodierenden Beschichtungen mit freigesetzt wird. Eine Entscheidung über die Zulässigkeit der intendierten Freisetzung von Naturstoffen erfolgt fallspezifisch durch das Umweltbundesamt.

³² ECHA (2017). Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment Chapter R.11: PBT/vPvB assessment, Version 3.0, January 2017

5.7 Anforderungen an das Produkt

5.7.1 Gefahrstoffrechtliche Anforderungen an das Produkt

Herleitung der Kriterien

In Anlehnung an das DE-UZ 12a „Emissions- und schadstoffarme Lacke“ sollten gefährliche Stoffe oder Gemische nicht in solchen Konzentrationen enthalten sein, dass das Produkt selbst in einen der H-Sätze H400, H410 oder H411 eingestuft wird. Ähnliche Vorgaben finden sich auch im DE-UZ 123 „Emissionsarme Dichtstoffe für den Innenraum“. Hier sind als umweltgefährlich eingestufte Stoffe und Gemische (H410, H411, H412) im Produkt in Anlehnung an die Einstufungsregeln der CLP-Verordnung nachfolgendem Berechnungsmodell begrenzt:

$$M * 100 * H410 + 10 * H411 + H412 \leq 11,0 \%$$

Wobei M der Multiplikationsfaktor für besonders ökotoxische Stoffe ist und H410, H411 und H412 die Konzentrationen der mit H410, H411 und H412 klassifizierten Stoffe in % sind. Einziger Unterschied zu den CLP-Einstufungsregeln ist, dass die einstufigsrelevante Summe $\leq 11 \%$ statt $< 25 \%$ beträgt. Gemäß den CLP-Einstufungsregeln würde das Gemisch ab einem Gehalt von $\geq 25 \%$ an H412 Stoffen in H412 (Schädlich für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung chronisch 3) eingestuft. Die Vorgaben des DE-UZ 123 sind also etwas strenger als die CLP-Vorgaben.

Im DE-UZ 12a „Emissionsarme Lacke“ werden auch Kriterien zu gesundheitsschädlichen und ätzenden Bestandteilen definiert. Demnach dürfen die Lacke nur gefährliche Stoffe oder Gemische enthalten, die nicht zur Einstufung des Lackes als gesundheitsschädlich bei Verschlucken, Hautkontakt oder Einatmen (H302, H312 oder H332) oder H304 (Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein), H334 (Kann bei Einatmen Allergie, asthmaartige Symptome oder Atembeschwerden verursachen), H371 oder H373 (Kann Organe bei einmaliger oder wiederholter Exposition schädigen) führen. Eine Einstufung als „ätzend“ mit H-Satz 314 (schwere Verätzungen der Haut und der Augen) ist ebenso untersagt. Hierbei werden die Kriterien insofern weiter verschärft, indem die nur 40 Massen % der jeweiligen einstufigsrelevanten Grenzkonzentrationen zulässig sind.

Es wird vorgeschlagen, die Einstufung des Produktes in „akut gewässergefährdend (Akut 1 = H400) sowie langfristig gewässergefährdend (Chronisch 1 = Sehr giftig = H410, chronisch 2 = giftig = H411, chronisch 3 = schädlich H412, chronisch 4 = kann schädlich sein = H413) auszuschließen. Bei Einstufung in H400, H410 und H411 müssten die Produkte zudem mit dem Gefahrenpiktogramm „Umwelt“ (GHS09) gekennzeichnet werden, was für mit dem Blauen Engel ausgezeichnete Produkte kaum vermittelbar wäre. Weitergehende Kriterien zu gesundheitsschädlichen Bestandteilen sollten über die allgemeinen stofflichen Anforderungen und nicht auf Produktebene geregelt werden, da nicht die Anwendung in Innenräumen betroffen ist.

Umsetzung in den Vergabekriterien

In den Vergabekriterien wurde festgelegt, dass das Endprodukt nicht mit H400, H410, H411, H412 oder H413 gekennzeichnet sein darf. Hierüber werden die zulässigen Konzentrationen an H400-H413 Stoffen limitiert. Die gesundheitsbezogenen Gefahrenkategorien werden hingegen nicht auf Produktebene, sondern auf Stoffebene geregelt (vgl. 5.5.1).

5.7.2 Ökotoxizität der Eluate

Herleitung der Kriterien

Die einzelnen Bestandteile der für Antifoulinganstriche oder deren nicht-biozide Alternativen verwendeten Stoffe werden oftmals als Firmen-Know-How angesehen und nicht vollständig mitgeteilt. Bekannt ist jedoch, dass zahlreiche organische Komponenten eingesetzt werden, die sich in ihrer Auswaschbarkeit unterscheiden. Daher wird vorgeschlagen, neben den stofflichen Kriterien zusätzlich das Freisetzungspotential besorgniserregender Inhaltsstoffe anhand geeigneter Leachingverfahren in Verbindung mit Ökotoxizitätstests zu beschreiben. Die Erfassung summarischer ökotoxischer Effekte soll als Sicherheitsnetz für das Leachingpotential komplexer und schlecht charakterisierter Bestandteile dienen. Wie im Kapitel 4.4 beschrieben, unterscheiden sich die angewandten Leachingmethoden und die Auswahl der Organismen erheblich und eine Harmonisierung der Verfahren ist gefordert, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Daher wird ein ähnliches Vorgehen wie in den Vergabekriterien des Blauen Engel DE-UZ-216 (2021-01) „Betonwaren mit rezyklierten Gesteinskörnungen für Bodenbeläge im Freien“ vorgeschlagen. Letzteres stammt aus der Bewertung von Baustoffen, die der Bewitterung oder dem Grundwasser ausgesetzt sind. Die Kombination von Leachingtests mit Ökotoxizitätstests wird bereits für die Bewertung von Bauprodukten (DIN CEN/TR 17105: 2018-02; Gartiser et al. 2016) eingesetzt. In Ergänzung zu einer weiteren Studie der Bundesanstalt für Materialkunde, in der explizit Leachingtests für die Vergabe des Blauen Engels für Bauprodukte vorgeschlagen wurden (Bandow et al. 2018) soll die Kombination von Leaching- und Ökotoxizitätstests in einem laufenden Vorhaben unter Beteiligung der Hydrotox GmbH nun auch für die Umweltzeichenvergabe von (Bau-)Produkten verwendet werden (FKZ 3719 37 302 „Methoden und Kriterien zur Bewertung der Ökotoxizität von Produkten, Laufzeit 2019-2022). Hierbei werden flächige oder monolithische Bauprodukte im dynamischen Oberflächenauslaugtest (DSL_T=dynamic surface leaching test) nach DIN CEN/TS 16637-2 eluiert. Beim Standardverfahren wird diese Prüfung über 64 Tage ausgeführt, wobei das Eluatwasser zu bestimmten Zeitintervallen (nach 6 und 24 h, 2,25 d sowie 4, 9, 16, 36 und 64 d) ausgetauscht wird. Um die anfängliche Auswaschrates zu bestimmen, werden die ersten beiden Fraktionen nach 6 und weiteren 18 h vereinigt und in den Ökotoxizitätstests untersucht. Optional sollen auch weitere Fraktionen zu einem späteren Zeitpunkt ebenfalls untersucht werden, um das Langzeitauswaschverhalten zu beschreiben. Die Kombination des DSL_T-Leachingtests mit Ökotoxizitätstests wird in verschiedenen European Assessment Documents (EAD) zur Bewertung von Bauprodukten wie z. B. flexiblen Dachabdichtungsplatten, Kunststoffarmaturen aus recycelten Kunststoffabfällen oder Kits für Außenwandputzplatten ebenfalls gefordert.³³ Hierbei wird meist ein Elutionsverhältnis von 25 L/m² bis 80 L/m² angewendet und es werden die Fraktionen nach 6 h und 64 Tagen im Leuchtbakterien-, Algen- und Daphnientest untersucht, ohne allerdings konkrete Kriterien zur Einstufung der Ergebnisse zu definieren.

Der Vollständigkeit halber sei noch auf die Vergabekriterien des DE-UZ 115 „Lösemittelarme Dachanstriche und Bitumenkleber“ (Ausgabe April 2011) verwiesen, in denen bereits ein Auslaugtest in Kombination mit Ökotoxizitätsprüfungen gefordert wird. Das Elutionsverfahren sieht vor, jeweils zwei Platten pro Produkt mit synthetischem Verdünnungswasser bei 20 °C bei mittlerer Rührerdrehzahl für 24 h in einem Chromatographie-Trog zu eluieren. Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen beträgt ca. 1:8 (8 mL/cm²). Damit weicht das Verfahren stark von anderen genormten Verfahren ab. Die Ökotoxizität der Eluate muss entsprechend den Vorgaben des DIBt-Merkblattes zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser (DIBt 2009-2012) folgende Werte einhalten: Leuchtbakterientest $GL \leq 8$,

³³ <https://www.eota.eu/en-GB/content/home/2/185/>

Daphnientest $GD \leq 4$, Algentest, $GA \leq 4$. Die diesbezüglichen Vorgaben des DE-UZ 115 gelten jedoch als veraltet. Auf dem Kick-off Treffen wurde daher vorgeschlagen, sich an dem laufenden Bauproduktvorhaben (siehe oben) zu orientieren.

Hinsichtlich der anzuwendenden Ökotoxizitätstests verweisen sowohl die CEN/TR 17105 als auch die Vergabekriterien für Umweltverträgliche Betonwaren DE UZ 216 auf die in Tabelle 17 beschriebenen Tests.

Tabelle 17: Prüfkriterien für Ökotoxizität für Produkte mit organischen Zusatzstoffen

Prüfspezies	Prüfnorm	Endpunkt	Kriterium LID
Leuchtbakterien (<i>Vibrio fischeri</i>)	EN ISO 11348 Teil 1 bis 3	Leuchten	$GL \leq 8$
Algen (<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> oder <i>Desmodesmus subspicatus</i>)	EN ISO 8692	Wachstum	$GA \leq 4$
Krustentiere (<i>Daphnia magna</i>)	EN ISO 6341	Mobilität	$GD \leq 4$
Zebrafischeier (<i>Danio rerio</i>)	EN ISO 15088	Mortalität	$Gei \leq 4$
Umu-Test	ISO 13829	erbgutveränderndes Potenzial	$Geu \leq 1,5$

Der LID (lowest ineffective dilution) entspricht der niedrigsten geprüften ineffektiven Verdünnungsstufe G, bei der keine Effekte beobachtet werden, die die prüfspezifische Variabilität übersteigen.

Die Durchführung von Fischttests ist in den Bewertungssystemen nicht vorgesehen, da Wirbeltiersversuche aus Tierschutzgründen grundsätzlich nicht für Einstufungszwecke oder für die Umweltzeichenvergabe neu durchgeführt werden sollen. Ersatzweise werden im Bauproduktbereich der Fischeitest nach DIN EN ISO 15088 oder der Fish Embryo Test (FET) nach OECD 236 als tierversuchsfreie Ersatzmethoden eingesetzt (optionale zusätzliche Prüfungen). Nach bisherigen Erfahrungen aus dem Bauproduktbereich ist der Fischeitest im Vergleich zu den anderen Ökotoxizitätstests in der Regel unempfindlicher (Gartiser et al. 2017). In den DIBt Bewertungskriterien zu den Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser (DIBt 2008) ist der Fischeitest berücksichtigt worden, allerdings werden die Eluate hier durch verschiedene andere Verfahren (u. a. auch Schütteltest) gewonnen, so dass die Ergebnisse nicht direkt auf die mit dem DSLT gewonnenen Eluate übertragbar sind. Daher wird vorgeschlagen, hier einen LID ≤ 4 statt LID ≤ 6 zu fordern.

Es sei darauf hingewiesen, dass dieselben Tests auch zur Abwasserbewertung eingesetzt werden. Im Entwurf eines vom Land Schleswig-Holstein vorgeschlagenen Anhang 30 „Einleiten von Abwasser aus dem Bereich „Reinigung, Konservierung, Instandhaltung, Instandsetzung sowie dem Neubau und der Verwertung von Wasserfahrzeugen“, wird gefordert, dass bei der Einleitungsstelle in das Gewässer die Ökotoxizität im Algen-, Daphnien- und Leuchtbakterientest die Verdünnungsstufe 4 nicht überschreiten darf (GA, GD und $Gei \leq 4$).³⁴

Zusammenfassend wird vorgeschlagen, den im Bauproduktbereich für flächige Produkte eingesetzten DSL-Test als Leachingtest einzusetzen und mit einer Basistestbatterie bestehend

³⁴ https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/A/abwasser/Downloads/Indirekteinleiterhandbuch/11_Leitfaeden/PDF/Werften.pdf;jsessionid=866884F0327752831B5496FE11063168.delivery1-replication?blob=publicationFile&v=1 (Zugriff am 03.09.2020)

aus Leuchtbakterien-, Algen- und Daphnientest zu koppeln. Die Ökotoxizitätstests sollten zu zwei Zeitpunkten nach 24 h (Fraktionen nach 6 h und zusätzlich 18 h) und nach 64 Tagen (Fraktion zwischen 36 und 64 Tagen, Elutionsdauer 4 Wochen) durchgeführt werden. Um das Eluat nicht zu sehr zu verdünnen, sollte das von der DIN CEN/TR 17105 vorgeschlagene Elutionsverhältnis von 20 L/m² (bzw. 2 ml/cm²) eingehalten werden. Es sei darauf hingewiesen, dass der DSL-Test eher diffusionsgesteuerte Leachingprozesse abbildet. Der Einfluss turbulenter Wasserströmungen wird daher nicht erfasst. Allerdings gibt es hierfür auch noch keine geeigneten Prüfvorschläge, die sich mit Ökotoxizitätstests koppeln lassen.

Umsetzung in den Vergabekriterien

Die Vorschläge wurden vollumfänglich umgesetzt. Demnach sind Produkte mit ständigem Wasserkontakt im DSLT zu eluieren und die Ökotoxizität im Eluat gemäß Tabelle 17 zu prüfen. Besteht ein Produkt aus mehreren Komponenten, so ist das Produkt im vollständigen Aufbau zu testen. Es wird die Mischung aus den zwei ersten Eluaten nach 6 Stunden und weiteren 18 Stunden sowie das Eluat nach 64 Tagen (Eluatfraktion 8 von Tag 36 bis 64, Gesamtdauer 28 d) untersucht.

5.7.3 Freisetzung kritischer Stoffe aus dem Endprodukt

Wenn der Einsatz besorgniserregender Stoffe nicht vermieden werden kann, bestünde die Option, deren chemische Bindung im Endprodukt über einzelstoffliche Analysen in Leachingtests nachzuweisen, um festzustellen, ob die Stoffe ausgewaschen werden. Vorbild wären die für Polymere im Trinkwasserbereich vorgeschriebenen Methoden, die in der UBA-Leitlinie zur hygienischen Beurteilung von organischen Materialien im Kontakt mit Trinkwasser (KTW-Leitlinie) beschrieben werden. Die Migrationsprüfung erfolgt anhand der

- ▶ DIN EN 12873-1 (2014-09) Einfluss von Materialien auf Trinkwasser - Einfluss infolge der Migration - Teil 1: Prüfverfahren für fabrikmäßig hergestellte Produkte aus oder mit organischen oder glasartigen Materialien
- ▶ DIN EN 12873-2 (2005-04) Einfluss von Materialien auf Trinkwasser - Einfluss infolge der Migration - Teil 2: Prüfverfahren für vor Ort aufgebrachte nicht metallische und nicht zementgebundene Materialien.

Neben der stoffspezifischen Analytik wird auch der TOC (total organic carbon) als Summenparameter verwendet (wie auch beim DSL-Test). Einige Hersteller reinigungsfähiger Unterwasserbeschichtungen bewerben ihre Produkte mit diesen Tests, z. B. Ceramkote (www.ceramic-polymer.de).

Auf dem Fachgespräch am 15. Juni 2021 sowie der Expertenanhörung am 8. September 2021 wurde von Herstellerseite angemerkt, dass die Freisetzung kritischer Stoffe als Kriterium dienen sollte und für gebundene, nicht auswaschbare Schadstoffe Ausnahmeregelungen geschaffen werden sollten. Als Beispiel wurde Bisphenol A (BPA) aus Epoxidharzen angeführt. Dieses sei fest im Produkt gebunden. Ohne BPA könnten keine Epoxidharze eingesetzt werden. Die Auswaschversuche von Bell et al. (2021) mit Coatings auf Epoxidbasis zeigten jedoch, dass relevante Mengen an Bisphenol A bzw. dessen Transformationsprodukte, insbesondere auch unter UV-A-Einfluss, freigesetzt werden. Hierzu wurden beschichtete Platten (30*22*24 cm) in Glasaquarien über 4 Wochen eluiert. Neben der substanzspezifischen chemischen Analytik wurden auch Tests auf endokrine (Yeast estrogen screen – YES) und toxische Wirkungen

(Leuchtbakterientest) durchgeführt. Hierbei erwies sich das Transformationsprodukt von BPA, 4tBP als Hauptverursacher der beobachteten endokrinen und toxischen Wirkungen.

Der Aufwand für Leachingprüfungen mit Begleitanalytik wird als sehr hoch eingeschätzt und hierbei müssten nicht nur die Zielkomponenten, sondern auch deren Transformationsprodukte erfasst werden. Eine sachgerechte Bewertung könnte nur im Einzelfall durch die Fachbehörden (Umweltbundesamt) geleistet werden. SVHC-Stoffe werden auch im Zulassungsverfahren von Biozid-Produkten reglementiert. Für Antifoulingssysteme, die mit einem Umweltlabel ausgezeichnet sind, sollten mindestens genauso strenge Kriterien an SVHC Stoffe angelegt werden, wie sie für Biozidprodukte gelten.

Hinzu kommt, dass Unterwasserbeschichtungen in regelmäßigen Abständen z. B. durch Schleifen komplett entfernt werden und die besorgniserregenden Stoffe auf diesem Wege in die Umwelt gelangen können.

Auch ein „Freitesten“ durch die ökotoxikologischen Tests erscheint nicht sinnvoll, da chronische Effekte sowie endokrine Wirkungen mit den ausgewählten Ökotoxizitätstests nicht abgebildet werden. Die Bestimmung der Ökotoxizität in den Eluaten dient somit eher als „Sicherheitsnetz“. Von daher wird nicht empfohlen, diese Option in die Vergabekriterien aufzunehmen.

5.7.4 Berücksichtigung der Gebrauchsdauer

Auf dem Fachgespräch am 15.6.2021 zum 1. Entwurf der Vergabekriterien für die Zertifizierung von Antifouling-Systemen wurde von Herstellerfirmen vorgeschlagen, zusätzlich zu den stoffbezogenen Daten auch die Gebrauchsdauer zu berücksichtigen. So macht es einen Unterschied, ob z. B. die VOC-Emissionen bei der Aufbringung eines Unterwasseranstriches jedes Jahr anfallen, der Anstrich also jedes Jahr erneuert wird oder ob die Beschichtungen 3-5 Jahre halten. Dieser Aspekt wurde dahingehend diskutiert, dass bei stoffbezogenen Grenzwerten wie VOC die Gebrauchsdauer zwar berücksichtigt werden könnte, diese aber schwer zu kontrollieren ist. Viele Hersteller empfehlen die Beschichtung zumindest teilweise jährlich auszubessern. Nachweise zur Gebrauchsdauer werden von den Herstellern meist nicht mitgeteilt, diese hängt ja auch stark vom Nutzerverhalten ab. Prinzipiell könnte für alle Produkte eine Mindestgebrauchsdauer von z. B. 3 Jahren festgelegt werden, um Produkte auszuschließen, die jedes Jahr überstrichen werden sollen. Bei der Bestimmung der Ökotoxizität in Eluaten ist eine Verknüpfung zur Gebrauchsdauer eher nicht denkbar, da die Elutionsdauer entsprechend verlängert werden müsste. Insgesamt fällt es schwer geeignete Kriterien in Bezug zur Gebrauchsdauer zu definieren, so dass vorgeschlagen wird, diesen Aspekt im Ausblick für künftige Entwicklungen der Vergabekriterien aufzuführen.

5.7.5 Wirksamkeitsnachweis und Gebrauchseigenschaften

Die Wirksamkeit und Gebrauchseigenschaften sind die zentralen Punkte im Anforderungskatalog. Grundsätzlich sollen hierbei immer die Herstellerangaben („label claim“) in Hinsicht auf Zielorganismen, Einsatzbereiche, Anwendungsbedingungen und erforderliche Vor- und Nacharbeiten (einschließlich der Wiederholung der Maßnahme) überprüft werden.

Im Laufe der Entwicklung einer Antifoulingbeschichtung gibt es zahlreiche Testverfahren zur Kontrolle der Wirksamkeit. Während der Entwicklungsphase werden vielfach zunächst einfache Laborverfahren eingesetzt, um eine Besiedlung mit Mikroorganismen zu erfassen. Solche Laborversuche sind aber als Wirksamkeitsnachweis für einen Praxiseinsatz nicht ausreichend, da positive Laborergebnisse im Feldtest oftmals nicht bestätigt werden. Als erster Schritt in Richtung des marinen Bewuchses können Labortests mit Seepockenlarven erfolgen. Diese Testverfahren eignen sich als Screening, um die erfolgversprechenden Testformulierungen von

weniger aussichtsreichen unterscheiden und weiter verbessern zu können. Als Wirksamkeitstest eines Endproduktes sind solche Kurzzeittests aber ebenfalls nicht ausreichend.

Deshalb werden nur längerfristige Freilandtests zur Bestätigung der Wirksamkeit akzeptiert. In Anlehnung an die „Guidance on the BPR: Volume II Efficacy, Assessment + Evaluation (Parts B+C)“ der [ECHA \(2018\)](#) müssen die darin vorgeschriebenen Parameter hier ebenfalls eingehalten werden, z. B. Test über eine Bewuchsperiode von mindestens sechs Monaten in einem Gewässer mit relevantem Bewuchs und in dem Bereich (marin oder limnisch), für den ihr Einsatz ausgelobt wird. Hierbei ist es von großer Bedeutung, zwischen den Einsatzgebieten zu unterscheiden. Im Süßwasser der Binnenreviere ist der Bewuchsdruck sehr viel geringer als im Meer- und Brackwasser ($\geq 18 \text{ ‰}$) der Küsten und Ästuarie. Somit müssen die Bewuchsschutzsysteme im Meer- und Brackwasser ($\geq 18 \text{ ‰}$) auch sehr viel leistungsfähiger sein als in Süßgewässern. In diesem Zusammenhang sind die Herstellerangaben zur Verwendung entscheidend. Ein Produkt, das keinen Einschränkungen unterliegt, muss auch im Meerwasser eine ausreichende Wirksamkeit für mindestens eine Bewuchssaison erzielen. Ein Produkt, das nur für das Süßwasser ausgelobt wird, muss auch nur diese Kriterien erfüllen.

Weiterhin gibt es große Unterschiede in den Ansprüchen an ein Antifoulingssystem für den Sportbootbereich, wo in der Regel nur eine Wirkung für eine Sommersaison erforderlich ist, und der Berufsschiffahrt, die eine Standzeit von bis zu 72 Monaten erfordert.

Die Auswertung des Bewuchses auf einem Antifoulingssystem erfolgt nach der CEPE- oder der ASTM-Methode im Vergleich zu einer unbehandelten Negativreferenz. In marinen Gewässern muss die Negativreferenz am Ende des Testzeitraums mindestens 75 % Bewuchsbedeckung aufweisen, damit der Test gewertet werden kann (= ASTM Fouling Rating ≤ 25). Eine Testbeschichtung gilt als wirksam, wenn diese maximal 25 % Bewuchs aufweist (= ASTM Fouling Rating ≥ 75). Diese Kriterien werden auch für umweltfreundliche Produkte des Blauen Engels angesetzt.

Im Falle der nicht-bioziden Systeme für den Blauen Engel gibt es auch Produkte, die von den Herstellern ausdrücklich nur für einen Einsatz im bewuchsschwächeren Süßwasser empfohlen werden. Dafür sind in den ECHA-Guidelines keine Grenzwerte definiert. Die Autoren der vorliegenden Studie empfehlen, dass hier eine Testbeschichtung zu maximal 5 % bewachsen sein darf (= ASTM Fouling Rating ≥ 95). Allerdings sollte im Süßwasser der Minimumwert von 75 % Makrobewuchs auf der Negativreferenz nicht angewendet werden, da dieser in vielen Süßgewässern nicht erreicht wird. Stattdessen sollte das Kriterium Auslagerungszeitraum über sechs Monate während der Saison mit einem Minimumwert von 10 % Makrobewuchs auf der Negativreferenz erfüllt werden (= ASTM Fouling Rating ≤ 90).

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Auswahl der zugelassenen Prüfinstitute. Die Untersuchungen müssen von einem unabhängigen, biologisch versierten Prüfinstitut durchgeführt werden, das nach DIN EN ISO/IEC 17025 für Methoden für Antifoulingwirksamkeitsprüfungen akkreditiert ist oder eine vergleichbare Qualifikation vorweisen kann. Akkreditierungen sind für Antifoulingprüfungen noch nicht sehr verbreitet, da es weltweit nur wenige Prüfinstitute gibt. In Deutschland ist das Institut für Antifouling und Biokorrosion der Dr. Brill + Partner GmbH im Januar 2022 als erstes Institut von der DAkkS für vier Antifoulingtestmethoden akkreditiert worden (u. a. statisch und dynamisch nach [ASTM 6990-20](#) im Meer- und Süßwasser). Es verfügt über eine Meer- und eine Süßwasserstation. Weitere akkreditierte Institute sind aktuell nicht bekannt. Das Büro bioplan ist ein weiteres bekanntes unabhängiges Prüfinstitut für Antifouling-Wirksamkeitsprüfungen, verfügt derzeit aber nicht über eine Akkreditierung. Das Fraunhofer IFAM führt ebenfalls Antifoulingversuche durch, ist allerdings nicht akkreditiert und entwickelt auch selbst Beschichtungen und ist somit

nicht ganz unabhängig. Die Qualifikation des Prüfinstitutes muss im Prüfbericht ersichtlich sein. Eine Herstellererklärung allein reicht nicht. In Tabelle 18 sind die national und international bekannten Institute aufgeführt, die unabhängig Freilandversuche von Antifoulingbeschichtungen wissenschaftlich durchführen.

Tabelle 18: Unabhängige Institute für Antifouling-Wirksamkeitsprüfungen

Institut	Nation / Testgewässer	Kontaktadresse	Webseite
Dr. Brill + Partner GmbH Institut für Antifouling und Biokorrosion	Deutschland / Nordsee, Ostsee, Lesum, Mittelmeer, Rotes Meer	Am Hafen 6, 26548 Norderney	https://brillantifouling.com/de/antifouling
bioplan	Deutschland / Ostsee	bioplan - Institut für angewandte Biologie und Landschaftsplanung GmbH Strandstraße 32a, 18211 Nienhagen	http://bioplan-online.de/
Endures	Niederlande / Nordsee	Bevesierweg 1, DC002 1781 AT, Den Helder	https://www.endures.co.uk/antifouling-and-protective-coatings/
Battelle Florida Material Research Center	USA, FL / Atlantik	4928 Sailfish Drive, Ponce Inlet, FL, 32127	https://www.battelle.org/docs/default-source/commercial-offerings/industry-solutions/battelle_florida_materials_research_facility
Poseidon Science, Sacred Heart Marine Research Centre	Indien / Pazifik	Beach Road, Tuticorin, India 628001	http://poseidonsciences.com/static_immersion.html

Eigene Untersuchungen der Herstellerfirmen sind kritisch zu sehen und werden nur akzeptiert, wenn diese auch akkreditiert sind und genormte Verfahren eingesetzt wurden, die von einem unabhängigen Fachmann nachvollzogen werden können. Eine Herstellererklärung allein reicht nicht aus. Bei bioziden Antifouling-Produkten dürfen die Hersteller auch eigene Daten für die Zulassung einreichen.

Grundsätzlich gibt es drei Feldtestmethoden, über die aussagekräftige Ergebnisse bereitgestellt werden können:

- ▶ Simulierte statische Feldtests, die bei monatlicher Inspektion über eine Saison (6 Monate) exponiert werden (ASTM 3623-78a in Verbindung mit ASTM 6990-20 oder CEPE 2012).

- ▶ Simulierte dynamische Feldtest im Drehgestell (Eigenentwicklung) oder Trommel, mit denen verschiedene Radialgeschwindigkeiten durch das Wasser erreicht werden. Damit wird sowohl die Grenzgeschwindigkeit erfasst, ab der Makrobewuchs einsetzt als auch die Bewuchsbedeckung nach ASTM 6990-20.
- ▶ Zudem können auch Ergebnisse von Praxistests auf Schiffen beigebracht werden. Das können Ganzrumpfbeschichtungen sein, Testflächen auf einem Rumpf oder auch behandelte Magnettestplatten, die an der Außenwand größerer Küstenschiffe angebracht werden. Die Bewuchsauswertung erfolgt in allen Fällen nach ASTM 6990-20.

Nachfolgend werden die gängigen Testverfahren im Kurzüberblick vorgestellt:

- ▶ ASTM D 3623-78a (2020) schreibt die Methode zur statischen Auslagerung von Testplatten vor.
- ▶ ASTM D 6990-20 schreibt die Auswertung des Bewuchses auf Testbeschichtungen vor, die simuliert statisch oder dynamisch oder auf einem Schiffsrumpf verwendet worden sein können.
- ▶ CEPE 2012 – Efficacy evaluation of antifouling products – Conduct and reporting of antifouling efficacy evaluation trials.

Bei den folgenden Methoden handelt es sich um ergänzende Testverfahren in der Entwicklung von Antifoulingbeschichtungen oder für spezielle Anwendungen, die alleinig keine Aussage über die Wirksamkeit für Schiffe ermöglichen:

- ▶ ASTM D 5618-94 – zur Messung der Seepockenhaftung auf AF-Beschichtungen
- ▶ ASTM D 4938 – 89 (2002) – zur Messung der Erosionsrate von AF-Beschichtungen
- ▶ ASTM D 4939 – zur Messung des Reibungswiderstands im Meerwasser
- ▶ ASTM D 5479 – zur Messung teilweise vertauchter Testplatten

Folgende Methoden sind Screening-Labormethoden zur schnellen Erstbeurteilung neuer Formulierungsreihen und eignen sich ebenfalls nicht für die Wirksamkeitsprüfung eines Endproduktes, sondern nur für die Optimierung von Gehaltskonzentrationen etc. Foul-Release Beschichtungen werden von der Methodenreihe explizit ausgeschlossen.

- ▶ ISO/DIS 21716-1:2020-04 – Schiffe und Meerestechnik - Prüfverfahren zur Wirksamkeit von Anti-Fouling-Beschichtungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- ▶ ISO/DIS 21716-2:2020-04 - Schiffe und Meerestechnik - Prüfverfahren zur Wirksamkeit von Anti-Fouling-Beschichtungen - Teil 2: Seepocken
- ▶ ISO/DIS 21716-3:2020-04 - Schiffe und Meerestechnik - Prüfverfahren zur Wirksamkeit von Anti-Fouling-Beschichtungen - Teil 3: Muscheln

Die derzeit wichtigste Methode ASTM 6990-20 ist für diverse Produktgruppen (alle Beschichtungen) einsetzbar und lässt sich in Verbindung mit Hartanstrichen auch für Reinigungsverfahren anwenden (die Beschichtungen werden dann in regelmäßigen Abständen nach Herstellerangaben gereinigt).

Die Wirksamkeitsprüfung von Ultraschallgeräten kann durch Aufkleben der Ultraschallsender auf Testplatten oder Schiffsrümpfe und Behandlung der Platten bzw. Schiffsrümpfe entsprechend der Herstellerangaben erfolgen. Der Wirkungsbereich muss in der Praxis mindestens der halben Entfernung der in den Herstellerangaben angegebenen Abstände der Transducer entsprechen. Die Auswertung des Bewuchses erfolgt ebenfalls nach ASTM D 6990-20.

Es werden die in der „ECHA-Guidance on Efficacy Assessment“ für die Produktart 21 genannten Methoden zur Überprüfung der Wirksamkeit biozider Produkte herangezogen, auf ihre Eignung für nicht-biozide Varianten überprüft und so weit wie möglich übertragen und dabei so weit wie nötig modifiziert (ECHA 2018). Das betrifft die komplette Serie an Testmöglichkeiten von Labortests über simulierte Feldtests bis hin zu Praxistests an Schiffen. Die Evaluierung der Ergebnisse aus den Feldversuchen folgt dabei den gängigen Methoden von CEPE und ASTM.

Darüber hinaus existieren für nicht-biozide Antifoulinglösungen wie z. B. Foul-Release Beschichtungen oder Reinigungssysteme bereits zusätzliche Methoden, die den Wirkungsgrad zum Teil besser abbilden können. Als Beispiele seien hier ein Seepockenschnelltest im Feld, der ASTM-Test D 5618-94 zur Messung der Seepockenhaftung und der dynamische Prüfstand RotoMarin® genannt, der es ermöglicht, die Geschwindigkeit zu ermitteln, ab der eine Foul-Release Beschichtung auf einem Schiff einen Selbstreinigungseffekt erzielt (Daehne et al. 2018 a und b).

Bei den Wirksamkeitstests werden auch Beschädigungen der Beschichtungen sowohl bei der ASTM 6990-20 als auch bei der STG 2221 der Schiffsbau-technischen Gesellschaft erfasst. Auch Abrieb (abrasion) ist eine Art von Beschädigung, die dabei erfasst wird. Es wird auch der prozentuale Anteil der betroffenen Fläche angegeben, allerdings eignet sich dieser Wert nicht für eine quantitative Beurteilung des Abriebs.

Ältere ASTM-Teilmethoden D 660, 661, 662, 714, 772 sind inzwischen in der ASTM 6990-20 zusammengefasst.

Von der CEPE wurde ein statischer Freilandtest zur Bestimmung der Wirksamkeit von Antifoulinganstrichen entwickelt, bei dem bestrichene Plastikplatten (Gesamtfläche mindestens 100 cm²) von schwimmenden Flößen aus exponiert werden. Der Standardisierungsgrad der Methode ist jedoch gering, so dass sehr viele Variationen möglich sind. Die Variabilität der Ergebnisse in Abhängigkeit vom geographischen Standort, der Jahreszeit und der jeweiligen Position unter dem Floß wird von der CEPE selbst als sehr hoch eingeschätzt (CEPE 2012).

5.7.5.1 Wirksamkeitsnachweis bei Beschichtungen und Klebefolien

Für Anwendungen im Meer- und Brackwasser (≥ 18 ‰) sollte der Wirksamkeitstest bevorzugt als simulierter statischer Feldtest für 6 Monate während der Bewuchssaison erfolgen. Das Testgebiet sollte bevorzugt in gemäßigten, subtropischen oder tropischen Zonen von Atlantik, Indik, Pazifik oder deren bewuchsreichen Nebenmeeren wie der Nordsee liegen.

Der Test muss mit mindestens drei Replikat-Platten durchgeführt werden. Die drei Replikate müssen unterschiedlich exponiert werden. Es können unterschiedliche Standorte sein oder unterschiedliche Expositionen hinsichtlich Wassertiefe, Strömung und/oder Lichtorientierung. Abweichend von der ASTM D 3623-78a (2020) ist das Material der Prüfplatten frei wählbar. Alle Platten müssen eine geeignete Primerbeschichtung aufweisen. Als Kontrolle ist eine

Negativreferenzplatte oder -fläche ausreichend. Als Material kommen dafür unbehandeltes Plastik (PVC, PE) oder Metallplatten mit einer Primerbeschichtung in Frage.

Im Meer- und Brackwasser müssen an dem Standort Seepocken und mindestens eine Muschelart vorkommen. Die Salinität am Teststandort muss in Anlehnung an [Watermann et al. \(2014\)](#) mindestens 18 ‰ betragen.

Im Meer- und Brackwasser (≥ 18 ‰) muss die Negativkontrolle zum Testende nach frühestens sechs Monaten mindestens 75 % Makrobewuchs aufweisen, damit der Test anerkannt werden kann. Das entspricht nach der international anerkannten Auswertungsmethode [ASTM 6990-20](#) einem Fouling Rating von ≤ 25 .

Der Mittelwert der Makrobewuchsbedeckung auf den drei Testplatten muss im Meer- und Brackwasser (≥ 18 ‰) im gleichen Zeitraum unter 25 % liegen (= FR ≥ 75), um als wirksam akzeptiert zu werden.

Zwischenreinigungen sind für diese Beschichtungen und Folien nicht erlaubt. Bestandene Tests im Meerwasser werden auch für Anwendungen im Süßwasser akzeptiert. Bei Tests im Süßwasser müssen an dem Standort entweder die Zebra- oder die Quaggamuschel vorkommen. Im Süßwasser muss die Negativkontrolle zum Testende nach frühestens sechs Monaten mindestens 10 % Makrobewuchs (ASTM Fouling Rating ≤ 90) aufweisen, damit das Testergebnis anerkannt werden kann. Für die Testplatten gilt im Süßwasser: 5 % Bewuchs darf nicht überschritten werden (= FR ≥ 95).

5.7.5.2 Wirksamkeitsnachweis bei reinigungsfähigen Hartbeschichtungen

Reinigungsfähige Hartbeschichtungen müssen keinen Wirksamkeitstest im Sinne einer bewuchshemmenden bzw. -verhindernden Wirkung erbringen, da sie immer in Kombination mit Reinigungssystemen betrachtet werden müssen und diese Reinigungssysteme die Reinigungsleistung erzielen müssen (s. folgendes Kap. 5.7.5.3). Da es noch keine für diesen Zweck entwickelte Testmethode gibt, wird bis auf weiteres als alternativer Qualitätsnachweis für diese Beschichtungen ein modifizierter Taber-Abrasionstest nach ASTM D4060-19 gefordert, um einen Eintrag des Farbmateriale in die marine oder aquatische Umwelt zu verhindern. Der ASTM D4060-19 wurde angepasst auf 10 Testdurchführungen, um so den Abrieb durch 10 Reinigungsvorgänge zu simulieren.

Abweichend von der [ASTM Methode 4060-19](#) ist der Test wie folgt durchzuführen:

- ▶ Einsatz des Aufsatzes CS 10 zur Reinigung von Beschichtung
- ▶ Gewichtsbeaufschlagung von 500 g
- ▶ 10 Testdurchführungen mit 100 U/min
- ▶ Beschichtung und Scheibe unter Wasser (wet condition)
- ▶ Testdauer 15 min oder 15 x 1 min pro Testdurchführung

Die Anforderungen gelten als erfüllt, wenn der Abrieb der getesteten Unterwasserbeschichtung ≤ 50 μm ist und zum Testende mindestens 10 % der ursprünglichen Schichtdicke verbleiben.

5.7.5.3 Wirksamkeitsnachweis bei Reinigungssystemen

Ein Reinigungssystem besteht immer aus einer Kombination aus einer reinigungsfähigen Hartbeschichtung (s. Kap. 5.7.5.2) mit einem oder mehreren Reinigungsverfahren. Letztere können Reinigungsvorrichtungen am Liegeplatz, stationäre Bootswaschanlagen oder auch Tauch- und Reinigungsfirmen sein.

Die Testung muss auf einer Unterwasserbeschichtung ohne Bewuchsschutzeffekt erfolgen, die einen Taber-Abrasionstest mit den im separaten Bericht zu den Vergabekriterien (dort Kap. 3.2.4.1) definierten Anforderungen bestanden hat. In allen Fällen muss ein ausreichender Rückhalt des abgereinigten Bewuchses durch Auffang- und Filtrationssysteme erreicht werden, um eine Beeinträchtigung des Gewässers auszuschließen. Das Filtrat muss fachgerecht entsorgt werden. Darüberhinausgehende allgemeine oder lokale Regelungen sind zu beachten.

Reinigungssysteme gelten als wirksam, wenn der Bewuchs damit während der Saison im Meer- und Brackwasser (≥ 18 ‰) nach der Reinigung unterhalb des Grenzwertes von 25 % Makrobewuchs bleibt. Das dafür notwendige Reinigungsintervall ist anzugeben. Dieses Intervall ist abhängig vom Gewässer und der Jahreszeit sehr unterschiedlich, hängt aber auch von der Einsatzbereitschaft des Bootseigners ab. Auch unter den ungünstigsten Bewuchsbedingungen darf das Intervall bei einem Einsatz im Meer- und Brackwasser (≥ 18 ‰) während der Bewuchsphase (in Nord- und Ostsee von Mai bis August) nicht kleiner als zwei Wochen betragen. Die Tests können als Plattentests oder als Schiffstests erfolgen. Referenzplatten oder Rumpfbereiche ohne Reinigung gelten als Vergleichsflächen.

Für das bewuchsschwächere Süßwasser ist hier nur ein Maximalwert von 5 % Makrobewuchs auf den Testflächen zulässig. Im Süßwasser muss zwischen zwei Reinigungsschritten mindestens ein Abstand von zwei Monaten liegen

5.7.5.4 Wirksamkeitsnachweise bei Ultraschallanlagen

Der Wirksamkeitsnachweis von Ultraschallanlagen kann über simulierte Plattentests oder über reale Anlagen an Schiffsrümpfen erfolgen. Auch für diese Anlagen gilt, dass im Meer- und Brackwasser (≥ 18 ‰) eine Bewuchsbedeckung von maximal 25 Prozent und im Süßwasser maximal 5 Prozent nicht überschritten werden dürfen.

Bei Plattentests ist der Transducer der Anlage vom Hersteller oder nach Herstellerangaben auf drei korrosionsgeschützte Testplatten von mindestens 50 * 50 cm anzubringen. Die Auslagerung nach ASTM D 3623-78a (2020) sowie die Auswertung nach ASTM D 6990-20 erfolgen analog zu den Beschichtungstests im Vergleich zu einer unbehandelten Vergleichsplatte (s. Kap. 5.7.5).

Nachweise von Schiffsrümpfen können nur akzeptiert werden, wenn der Schiffsrumpf keinen Anstrich mit Bewuchsschutzeffekt oder einer Klebefolie aufweist. Da die Beibringung einer Negativreferenz in diesem Fall schwierig ist, muss zudem nachgewiesen werden, dass das Schiff während der Saison schwerpunktmäßig in einem Gewässer mit relevantem Bewuchsdruck gelegen hat. Dazu ist am Liegeplatz eine unbehandelte Negativreferenzplatte während der Saison auszubringen, die danach im Meer- und Brackwasser (≥ 18 ‰) mindestens 75 % und im Süßwasser mindestens 10 % Makrobewuchs aufweisen muss.

5.7.5.5 Wirksamkeitsnachweise bei Unterwasserplanen

Das Wirkungsprinzip dieser Planen ist in Kapitel 4.3.6 erläutert. Daraus wird deutlich, dass simulierte Feldtests mit Testplatten für Unterwasserplanen keine aussagekräftigen Ergebnisse

liefern können. Deshalb sind hierfür Daten aus einer realen Anwendung auf drei Schiffen über mindestens sechs Monaten zu erbringen. Der Einsatz der Folie erfolgt dabei nach den Herstellerempfehlungen. Eine Voraussetzung ist dabei, dass der Rumpf der entsprechenden Schiffe nicht einer Unterwasserbeschichtung mit Bewuchsschutzeffekt oder einer Klebefolie versehen ist.

Bei den Inspektionen sind mindestens sieben Stellen des Rumpfes zu betrachten (3 Backbord, 3 Steuerbord, 1 Heckspiegel). Der Wirksamkeitsnachweis gilt als erbracht, wenn alle sieben Testbereiche im Meerwasser jeweils nicht mehr als 25 % und im Süßwasser nicht mehr als 5 % Makrobewuchs aufweisen.

Als Negativreferenz ist parallel zu den Schiffen eine unbehandelte Vergleichsplatte auszuwerten, die während desselben Zeitraums am Liegeplatz ausgelagert war. Diese Platte muss im Meer- und Brackwasser (≥ 18 ‰) danach mindestens 75 % und im Süßwasser mindestens 10 % Makrobewuchs aufweisen.

5.7.5.6 Wirksamkeitsnachweise bei Bootshebeanlagen

Bei Bootshebeanlagen wird der komplette Bootsrumpf während der Liegezeiten aus dem Wasser gehoben. Eine Bewuchsbildung ist daher nicht möglich. Deshalb ist hierfür kein Wirksamkeitsnachweis erforderlich, da der Bewuchsschutz für den Bootsrumpf vorausgesetzt werden kann.

5.7.5.7 Wirksamkeitsnachweise bei Sonstigen Verfahren

Abhängig vom Wirkungsprinzip darf auch bei Sonstigen Verfahren im Meer- und Brackwasser (≥ 18 ‰) der Grenzwert von 25 % Makrobewuchs am Ende einer Bewuchsperiode nicht überschritten werden bei gleichzeitigem Nachweis von mindestens 75 % Makrobewuchs auf der Negativreferenz. Im Süßwasser darf die Testoberfläche maximal 5 % Bewuchs aufweisen, während die Negativreferenz mindestens 10 % Bewuchs aufweisen muss.

Zum jetzigen Zeitpunkt sind in dieser Rubrik „Sonstige Verfahren“ Luftblasensysteme und UV-C Lampen aufgelistet. Luftblasensysteme werden bislang zur Verringerung des Reibungswiderstands eingesetzt. Ein Einsatz als vollständiger Ersatz für eine Antifoulingbeschichtung ist derzeit noch nicht absehbar. Es findet allerdings ein F&E-Projekt namens AIRCOAT zu diesem Thema statt, dessen Ergebnisse beachtet werden sollten (<https://aircoat.eu>).

Anders verhält es sich bei UV-C-Systemen. Hier gibt es vielversprechende Ergebnisse aus Vorversuchen und intensive Forschungsbemühungen. Kleinflächig sind UV-C Lampen in der Lage, marinen Bewuchs zu verhindern. Hier gilt es für eine Zulassung in Wirksamkeitstests nachzuweisen, dass eine Kombination aus vielen UV-C-Lampen auch große Flächen so frei von Bewuchs halten kann, dass nach sechs Monaten weniger als 25 % der Fläche mit Makrobewuchs bedeckt sind.

5.8 Anforderungen bei Applikation, Einbau und Nutzung

5.8.1 Anforderungen bei der Applikation von Beschichtungen

Auch wenn es sich bei diesen Produkten um Beschichtungen ohne Antifoulingbiozide nach PT21 handelt, hat die Applikation nach den Herstellerangaben (Anzahl Farbschichten, Trockenpausen, Witterung) so zu erfolgen, dass die Belastung der Umwelt so gering wie möglich gehalten wird.

Dazu zählt in erster Linie ein versiegelter Untergrund, der mit einer Folie abgedeckt wird. Diese ist genau wie geöffnete Farbdosen sowie sämtliches Hilfsmaterial wie Pinsel, Rollen, aber auch Putzlappen anschließend fachgerecht zu entsorgen.

In der professionellen Schifffahrt werden Beschichtungen in der Regel im Airless-Sprühverfahren aufgetragen. Hierbei wird ein Overspray erzeugt, der zwar in Abhängigkeit von Windverhältnissen, Abhängung und Einhausung des Docks reduziert wird, laut [OECD \(2009\)](#) aber durchaus über 40 % betragen kann. Durch den Overspray können Farbpartikel als Aerosole in die Werftanlagen und in angrenzende Hafengewässer eingetragen werden.

Zum Selbstschutz sind die Schutzmaßnahmen, die auf dem Antifouling-Produkt oder beiliegenden Informationen abgedruckt sind, zu beachten. Die gegebenenfalls erforderliche persönliche Schutzausrüstung ist bei jeglichem Umgang mit dem Antifouling-Produkt erforderlich, also auch beim Anrühren und beim Reinigen der Geräte ([Setzer et al. 2019](#)).

5.8.2 Anforderungen bei Einbau und Nutzung von technischen Bewuchsschutzlösungen

5.8.2.1 Reinigungsvorrichtungen am Liegeplatz

Die Komponenten der Reinigungsgeräte müssen die in Kapitel 5.5.1 genannten grundsätzlichen stofflichen Anforderungen erfüllen.

Für die Nutzung der Geräte gelten die unter Kapitel 5.9.1 ausgeführten Details zum Auffangen und Entsorgen des abgereinigten Materials.

5.8.2.2 Tauch- und Reinigungsfirmen

Tauchfirmen verwenden verschiedene Reinigungsgeräte auf Basis von rotierenden Bürsten, Wasserhochdruck oder Kavitation zur Reinigung von geeigneten Beschichtungen ohne Biozide gemäß PT21.

Details zum Auffangen und Entsorgen des abgereinigten Materials sind ebenfalls unter Kapitel 5.9.1 ausgeführt.

5.8.2.3 Stationäre Bootwaschanlagen

Für den Einbau stationärer Anlagen gilt lediglich, dass die im Wasser liegenden Komponenten der Anlagen nicht mit bioziden Anstrichen versehen sein dürfen.

Für die Nutzung solcher Anlagen gelten die unter Kapitel 5.9.1 ausgeführten Details zum Auffangen und Entsorgen des abgereinigten Materials.

5.8.2.4 Bootshebeanlagen

Bei schwimmenden Anlagen im Meerwasser werden die Schwimmkörper zumeist noch mit bioziden Anstrichen versehen. Diese Praxis muss vom Hersteller untersagt werden, um die Vergabekriterien für einen Blauen Engel zu erfüllen, da sonst der Schadstoffeintrag nur vom Schiffsrumpf auf die Anlage verlagert wird.

Bei Anlagen am Steg in Holzbauweise ist ein Einsatz von tropischen Hölzern zu vermeiden. Auch die Imprägnierung des Holzes muss den aktuellen Umweltstandards entsprechen.

5.8.2.5 Ultraschallanlagen

Bei der Verwendung von Ultraschallanlagen ist eine Überdimensionierung zu vermeiden. Darüber hinaus gibt es keine weiteren Einschränkungen.

5.8.2.6 Unterwasserplanen

Beim Einbau der Anlagen ist das Material der Planen zu berücksichtigen. Die bekannten Unterwasserplanen bestehen aus Polyolefin oder PVC (s. Kap. 5.6.2).

Beim Einsatz ist eine Benutzung von Essigsäure oder Chlor zum Abtöten und Auflösen vorhandenen Bewuchses nicht genehmigungsfähig, da es sich dabei um Biozide handelt.

5.9 Anforderungen bei der Entsorgung

Die Entsorgung wird im Folgenden nur für Beschichtungen und Folien behandelt und nicht für die technischen Bewuchsschutzverfahren.

Eine Entsorgung von Beschichtungsresten kann während des Betriebs relevant sein, wenn die Boote bei notwendigen Zwischenreinigungen im Wasser planmäßig gereinigt und sämtliches abgereinigte Material (Bewuchs und evtl. Beschichtungsabrieb) aufgefangen werden muss oder zum Ende der Standzeit von Beschichtungen bei der planmäßigen Entschichtung an Land.

5.9.1 Entsorgung bei Reinigungsverfahren

Es werden derzeit verschiedene Ansätze zur Reinigung diskutiert. Hierzu gehört das proaktive Reinigen, bevor Makrobewuchs entsteht, und das reaktive Reinigen, wenn Makrobewuchs messbar die Performance negativ beeinflusst. Bei dem proaktiven Reinigen von Bewuchs wird dieses zunehmend als „Grooming“, also als „Pflegen“ des Schiffsrumpfes durch regelmäßiges, schonendes Reinigen in kurzen Intervallen bezeichnet ([Tribou & Swain 2010](#); [Hearin et al. 2015](#); [2016](#); [Hunsucker et al. 2018](#)). Dabei wird lediglich ein Biofilm entfernt, bevor sich makroskopischer Bewuchs gebildet hat. Das Auffangen eines gelösten Biofilms ist sehr schwierig und auch weniger notwendig, da es nicht zu einem hohen Eintrag an Biomasse kommt. Die Diskussion um eine Notwendigkeit des Auffangens ist jedoch noch nicht beendet. Bisher liegt nur eine Empfehlung des Arbeitskreises Wasser der LAWA vor, die auf Sportbooten ein Auffangen des Biofilms nicht als notwendig ansieht, sondern nur das Auffangen von Makrofouling ([Watermann et al. 2016](#)). Dagegen werden für die Berufsschiffahrt voraussichtlich nur Reinigungsfirmen mit Auffangvorrichtungen Genehmigungen in deutschen Häfen erhalten. Gleiches gilt inzwischen für die niederländischen und belgischen Häfen.

In der ersten Machbarkeitsstudie für nicht-biozide Antifoulingprodukte wurde allerdings bereits darauf hingewiesen, dass die Reinigung des Unterwasserschiffs von Booten am Liegeplatz oder im Hafengewässer nicht erlaubt ist, da mit dem Waschwasser neben dem entfernten Bewuchs auch Farbpartikel direkt in das Wasser gelangen ([Watermann et al. 2004](#)). Das UBA empfiehlt daher, bei der Reinigung keine Hochdruckreiniger zu verwenden. Eine Reinigung von Unterwasserbeschichtungen im Wasser bedarf einer wasserrechtlichen Erlaubnis. Die Bootswäsche auf befestigtem oder unbefestigtem Grund ohne Abwassersystem ist ebenfalls erlaubnispflichtig. Die Erlaubnis darf nur erteilt werden, wenn keine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit zu besorgen ist ([Setzer et al. 2019](#)). Eine wasserrechtliche Erlaubnis gewährt eine Befugnis zur Durchführung der Gewässerbenutzung. Die Erstellung einer wasserrechtlichen Erlaubnis setzt voraus, dass die Belastung des Gewässers punktuell und nicht diffus erfolgt. Die Erlaubnis wird nach pflichtgemäßem Ermessen durch die zuständige Behörde erteilt. Dies sind in der Regel die Unteren Wasserbehörden der Landkreise und Städte. Eine Reinigung ist demnach nur mit lokalen Genehmigungen möglich.

Für die Behandlung des durch die Reinigung möglicherweise mit Mikroplastik kontaminierten Waschwassers gibt es drei Wege, um diese umweltgerecht zu entsorgen: Rückführung nach Filtration in das Hafengebiet/Gewässer, Einleitung in die Kanalisation oder landseitige Entsorgung über eine Fachfirma. Für Zwischenreinigungen im Wasser erscheint nur die erste Variante praktikabel, weshalb nur diese hier näher vorgestellt wird.

Bei einer Rückleitung ins Hafenbecken wird das Waschwasser zunächst aufgefangen und durch ein Filtersystem geleitet, welches sowohl feste als auch gelöste Stoffe aus dem Wasser filtert. Genehmigungsfähig sind Filtersysteme, die dem Stand der Technik entsprechen (Def. Stand der Technik: WHG §3 Nr.11 Anlage 1), deren Filterleistung die einzuleitenden Schadstoffe auf ein dem Stand der Technik entsprechendes Niveau senken und deren Bau und Betrieb mit den Gewässereigenschaften vereinbar ist (WHG § 57 Abs. 1). Verbrauchtes Filtermaterial sowie anfallende Feststoffe müssen gesondert entsorgt werden.

Die Benutzung von Gewässern ist nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG) erlaubnispflichtig (WHG §8). Das Einbringen und Einleiten von Stoffen gilt in der Regel als Benutzung (WHG §9, Absatz 1, Unterpunkt 4). Die Länder können allerdings bei Küstengewässern bestimmen, dass eine Erlaubnis hier nicht erforderlich ist für das Einbringen und Einleiten von anderen Stoffen (...als Grund-, Quell- und Niederschlagswasser), wenn dadurch keine signifikanten nachteiligen Veränderungen seiner Eigenschaften zu erwarten sind (WHG §43). Grundsätzlich sind die Erlaubnis und Bewilligung aber zu versagen, wenn u. a. schädliche, auch durch Nebenbestimmungen nicht vermeidbare oder ausgleichbare Gewässerveränderungen zu erwarten sind (WHG§12, Absatz 1). Eine Erlaubnis für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Direkt-einleitung) darf nur erteilt werden, wenn u. a. die Menge und Schädlichkeit des Abwassers so geringgehalten wird, wie dies bei Einhaltung der jeweils in Betracht kommenden Verfahren nach dem Stand der Technik möglich ist (WHG§57, Absatz 1, Nummer 1). Als Stand der Technik wird der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren bezeichnet, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in [...], Wasser [...] oder sonst zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen auf die Umwelt zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt als insgesamt gesichert erscheinen lässt (WHG §3, Nummer 11; WHG Anlage 1). Für die Beurteilung der „Schädlichkeit des Abwassers“ können verschiedene Regelungen herangezogen (z. B. Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG) und die dort verankerten Umweltqualitätsnormen (2008/105/EG) angewandt werden. Eine Beurteilung nach WRRL setzt allerdings voraus, dass der Zustand im Gewässer bekannt ist (Konzentrationen im Gewässer). Da die Konzentrationen in den Gewässern variieren, ist auf dieser Basis keine allgemeingültige Aussage möglich. Als geeignetere Alternative könnte daher die Emissionsseite über die Abwasserverordnung (AbwV) herangezogen werden. Diese regelt die Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer. In den Anhängen werden branchenspezifische Anforderungen an das jeweilige Abwasser angegeben. Allerdings regelt keiner der Anhänge der AbwV explizit Waschwasser von Schiffen, Booten oder Werften. Hier können derzeit also lediglich über Analogien Anforderungen an das Waschwasser spezifiziert werden.

Die Hersteller von Reinigungsanlagen sollten daher Unterlagen vorlegen, ob und wie der entfernte Bewuchs mit den Partikeln aufgefangen wird. Die Reinigungsanlage muss ein detailliertes System zur Handhabung des Abfalls beinhalten. Sie muss so konstruiert sein, dass der entfernte Bewuchs aufgefangen und aus dem Wasser transportiert und anschließend eine gesetzeskonforme Entsorgung vorgenommen werden kann ([Watermann et al. 2004](#)).

Seitdem hat es mehrere Projekte und Studien gegeben, die sich u. a. auch mit diesem Thema beschäftigt haben, z. B. das EU-Projekt CHANGE sowie COMPLETE und das BMWi-Projekt FoulProtect. Es ist zurzeit Konsens, dass bei der Unterwasserreinigung eine Vorrichtung zum Auffangen des Bewuchses vorhanden sein muss. Aktuell werden intensive Diskussionen darüber geführt, wieweit eine Filtration /Separation partikulärer Stoffe und Organismen möglich ist. Diskutiert werden Anforderungen zur Separation bis zu 5 – 10 µm. Gleichzeitig werden Verfahren zur Abtrennung der gelösten Biozide eingesetzt, welche aber bisher nicht zwingend vorgeschrieben sind.

Da bislang sowohl auf deutscher wie auch auf europäischer Behördenebene unklar ist, wie mit der Reinigung und vor allem mit dem Auffangen des Materials verfahren werden soll, kann für

den weitergehenden Schritt der Vergabe eines Blauen Engels derzeit noch keine Anforderung formuliert werden. Diese müsste mindestens diesen Standard zur Erteilung einer Einleitungserlaubnis abbilden oder darüber hinaus gehen, dürfte diese aber keinesfalls unterschreiten. In den Vergabekriterien wurde für die Reinigungstechnologien als Prüfkriterium festgelegt, dass nachweislich 95 % des Bewuchses aufgefangen werden müssen und nicht in das Gewässer gelangen dürfen.

5.9.2 Entsorgung nach Entschichtung am Ende der Standzeit

Zunächst einmal sei darauf hingewiesen, dass viele der genannten Beschichtungen am Ende der Wirksamkeitsphase nicht entschichtet werden müssen, sondern durch Neuanstriche mehrfach aufgefrischt werden können. Dies trifft in erster Linie auf die selbstpolierenden Beschichtungen zu, aber auch für einige Antihaftbeschichtungen.

Wird ein Schiff aber entschichtet, erfolgt das bei professionellen Schiffen in Werften und bei Sportbooten zunehmend auf dafür vorgesehenen Waschplätzen in den Häfen und Marinas und in den Bootshallen.

Der erste Schritt der Entschichtung ist das Hochdruckwaschen bei bis zu 250 bar auf Sportbooten und bis 500 bar bei Berufsschiffen. Der weitere Verlauf ist abhängig von der Art des Schiffes, des Rumpfmateri als und der Beschichtung.

Sportbooteigner benutzen hierfür in der Regel Abziehklingen und Trockenschleifmaschinen mit Absaugung.

Berufsschiffe werden in der Regel bei SA 2.5 gestrahlt mit Sand-, Granulat- oder Softball. Das partikelförmige Strahlgut, wie auch Farbpartikel und Schleifstaub müssen fachgerecht entsorgt werden ([Watermann & Herlyn 2020](#)).

Anders verhält es sich bei Antihaftfolien. Diese können von Hand abgezogen werden oder großflächig mit Wasserdruck abgewaschen werden. Bei letzterer Methode können kleine Folienfetzen entstehen, die schwieriger aufzufangen sind. Ein Sieb zum Auffangen dieser Folienstücke wäre hierfür eine Voraussetzung.

5.10 Anwendungsinformationen

Die Zeichennehmer müssen dem Produkt Informationen beilegen, die eine sichere Verwendung des Produktes gewährleisten und alle wesentlichen Informationen zum Betrieb bzw. der Verwendung beinhalten.

Darüber hinaus gelten systemspezifische Anforderungen gemäß der Vergabekriterien. Ein Hinweis muss auf dem Produkt angebracht sein, der darauf hinweist, dass dieses Produkt nur für Rumpfaußenbereiche zu verwenden ist. Die Antragsteller müssen dafür Sorge tragen, dass diese Informationen über die Lieferanten auch bis an die Endkunden gelangen.

Speziell für Unterwasserbeschichtungen gilt, dass die wesentlichen Bestandteile eines Beschichtungssystems auf dem Gebinde und dem technischen Merkblatt anzugeben sind. Sofern es sich um ein Mehrschichtsystem handelt, sind alle Schichten zu benennen. Zusätzlich zu den gemäß [CLP-Verordnung \(EG\) Nr. 1272/2008](#) verpflichtenden P-Sätzen ist in gut lesbarer Form Folgendes anzubringen (vergleichbare Formulierungen / P-Sätze sind zugelassen):

- ▶ „Für Kinder unzugänglich aufzubewahren“
- ▶ „Während der Verarbeitung und Trocknung für gründliche Belüftung sorgen“
- ▶ „Essen, Trinken und Rauchen während der Verarbeitung dieses Produktes ist zu vermeiden“

- ▶ „Bei Berührung mit den Augen oder der Haut sofort gründlich mit Wasser abspülen“
- ▶ „Inhalt/Behälter entsprechend den örtlichen Vorschriften der Entsorgung zuführen.“

5.11 Werbeaussagen

Die Art der Unterwasserbeschichtung bzw. der Bewuchsschutzsysteme ist im Zusammenhang mit der Produktbezeichnung an geeigneter Stelle auf dem Gebinde oder der Verpackung zu nennen.

Werbeaussagen dürfen keine die Gefahren verharmlosenden Angaben im Sinne des Artikels 25 Abs. 4 der CLP-Verordnung 2008/1272/EG, wie z. B. „Nicht giftig“, „Nicht gesundheits-schädlich“ und dergleichen aufweisen. Werbeaussagen, die Namensteile oder Bezeichnungen enthalten wie „Bio-“, „Öko“- , „Natur-“, oder „Nano-“ u. ä., sind nicht zulässig.

6 Ausblick für künftige Entwicklungen der Vergabekriterien

Das Thema und die (Weiter-)Entwicklung neuer Antifoulingssysteme ist ein sehr dynamischer Prozess, bei dem es fast wöchentlich zu neuen Publikationen kommt. Demzufolge konnten nicht alle Entwicklungen abgewartet werden. Einige Prozesse wurden identifiziert, die bei einer künftigen Überarbeitung der Vergabekriterien besonders berücksichtigt werden sollten, da es hier bis zur Überarbeitung wahrscheinlich neue Entwicklungen gegeben haben wird.

So sollte bei der nächsten Überarbeitung der Vergabekriterien das Thema Nanotechnologie nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik neu bewertet werden.

Ein weiterer Punkt sind die Nischenbereiche an Schiffsrümpfen, die bislang nicht zum Geltungsbereich gezählt werden konnten, da standardisierte Methoden zur Bewertung der Wirksamkeit von Produkten in Nischenbereichen noch fehlen. Dies sollte bei der nächsten Überarbeitung nach aktuellem Stand der Wissenschaft und Technik neu bewertet werden.

In der aktuellen Version konnten Produkte und Systeme, die auf eine Zwischenreinigung angewiesen sind, aufgrund des Fehlens standardisierter Prüfmethode nicht berücksichtigt werden. Das Thema „Wirksamkeitsnachweis bei regelmäßiger Zwischenreinigung“ sollte bei der nächsten Überarbeitung ebenfalls nach aktuellem Stand der Wissenschaft und Technik neu bewertet werden.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die Unterwasserreinigung von Booten und Schiffen in den Bundesländern nicht einheitlich geregelt. Die Anforderungen an stationäre Schiffsreinigungsanlagen und mobile Schiffsreinigungsgeräte sollte bei der nächsten Überarbeitung neu bewertet werden.

Bei der nächsten Überarbeitung der Vergabekriterien sollten auch die Anforderungen an die gefahrstoffrechtlichen Produktanforderungen (Vergabekriterien, Kap. 3.5) mit den zu diesem Zeitpunkt aktuellen Gefahrenmerkmalen der CLP-Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 abgeglichen werden.

Weiterhin sollte bei der nächsten Überarbeitung der Vergabekriterien geprüft werden, inwiefern Anforderungen an die Ultraschallemissionen von Ultraschallanlagen z. B. in Bezug auf Frequenzen, maximalen Schalldruck und Schalldauer (Exposition) gestellt werden können, um eine Lärmbelastung der Gewässerfauna zu begrenzen bzw. auszuschließen.

7 Quellenverzeichnis

- Acevedo, M. S.; Puentes, C.; Carreño, K.; León, J. G.; Stupak, M.; García, M.; Pérez, M.; Blustein, G. (2013): Antifouling paints based on marine natural products from Colombian Caribbean. In: International Biodeterioration & Biodegradation, Vol. 83, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 97-104.
- Akuzov, D.; Vladkova, T.; Zamfirova, G.; Gaydarov, V.; Nascimento M. V.; Szeglat, N.; Grunwald, I. (2017): Polydimethyl siloxane coatings with superior antibiofouling efficiency in laboratory and marine conditions. In: Progress in Organic Coatings, Vol. 103, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 126–134.
- Al-Fori, M.; Dobretsov, S.; Myint, M. T. Z.; Dutta, J. (2014): Antifouling properties of zinc oxide nanorod coatings. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, Vol. 30 (7), Taylor & Francis, London, S. 871–882.
- Almeida J. R.; Vasconcelos, V. (2015): Natural antifouling compounds - Effectiveness in preventing invertebrate settlement and adhesion - Review. In: Biotechnology Advances, Vol. 33(3-4), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 343-357.
- Amara, I.; Miled, W.; Slama, R. Ben; Ladhari, N. (2018): Antifouling processes and toxicity effects of antifouling paints on marine environment - A review. In: Environmental Toxicology and Pharmacology, Vol. 57, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 115–130.
- Anonym (2017), Washington State Antifouling Boat Paint Alternatives Assessment Report. Final report by Techlaw and Northwest Green Chemistry, October 1, 2017
https://static1.squarespace.com/static/5841d4bf2994cab7bda01dca/t/59d40515c534a598eeb6c18a/1507067168544/Washington+CuBPAA_Final_2017.pdf
- Anonym (2020): Umrechnen von Schallgrößen (Pegel). <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-schallpegel.htm> (05.05.2020)
- Anonym (2021): Leitfaden zur Erteilung einer Erlaubnis von Unterwasserreinigungen in den Bremischen Häfen. (Freie Hansestadt Bremen – Die Senatorin für Klimaschutz, Umwelt, Mobilität, Stadtentwicklung und Wohnungsbau (Hrsg.), Bremen, 9 S.
- ASTM D3623 – 78a (2020) Standard Test Method for Testing Antifouling Panels in Shallow Submergence
- ASTM D4060 - 19 (2019) Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser.
- ASTM D4938 – 89 (Reapproved 2002) Standard Test Method for Erosion Testing of Antifouling Paints Using High Velocity Water.
- ASTM D4939 – 89 (Reapproved 2020) Standard Test Method for Subjecting Marine Antifouling Coating to Biofouling and Fluid Shear Forces in Natural Seawater.
- ASTM D5479 – 94 (2020) Standard Practice for Testing Biofouling Resistance of Marine Coatings Partially Immersed.
- ASTM D5618 – 94 (Reapproved 2000) Standard Test Method for Measurement of Barnacle Adhesion Strength in Shear.
- ASTM D6442 – 06 (2012). Standard test method for determination of copper release rate from antifouling coatings in substitute ocean Water.
- ASTM D6903 – 07 (2020) Standard test method for determination of organic biocide release rate from antifouling coatings in substitute ocean water.

ASTM D6990 – 20 (2020) Standard Practice for Evaluating Biofouling Resistance and Physical Performance of Marine Coating Systems.

Atalah, J.; Brook, R.; Cahill, P.; Fletcher, L. M.; Hopkins, G. A. (2016): It's a wrap - Encapsulation as a management tool for marine biofouling. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, Vol. 32(3), Taylor & Francis, London, S. 277–286.

Azemar, F., Faÿ, F., Réhel, K., Linossier, I. (2020). Ecofriendly silicon-poly(lactic acid) hybrid antifouling coatings. Progress in Organic Coatings 148, 105841

Bandow, N.; Jürgens, F.; Schoknecht, U. (2018): Berechnete Bauteile und Bauprodukte - Entwicklung von Vergabekriterien für den Blauen Engel mit Hilfe von Auslaugtests. Abschlussbericht (FKZ 3715 37 324 0) im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-Texte 67/2018, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-08-24_texte_67-2018_auslaugung-bauprodukte.pdf

Barletta, M.; Aversa, C.; Pizzia, E.; Puopolo, M.; Vesco, S. (2018): Design, development and first validation of “biocide-free” anti-fouling coatings. In: Progress in Organic Coatings, Vol. 123, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 35–46.

Barthlott, W.; Mail, M.; Bhushan, B.; Koch, K. (2017): Plant Surfaces: Structures and Functions for Biomimetic Innovations. Nano-Micro Lett. (2017) 9:23, DOI 10.1007/s40820-016-0125-1, 40 S.

Baum, C. (2002): Selbstreinigungseigenschaften der Haut des Pilotwales, *Globicephala melas*. Diss. TU Berlin, 131. S.

Baum, C.; Meyer, W.; Stelzer, R.; Fleischer L.-G.; Siebers, D. (2002): Average nanorough skin surface of the pilot whale (*Globicephala melas*, Delphinidae) - Considerations on the self-cleaning abilities based on nanoroughness. In: Marine Biology, Vol. 140(3), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 653–657.

Bell, A. M., Keltsch, N., Schweyen, P., Reifferscheid, G., Ternes, T., Buchinger, S. (2021). UV aged epoxy coatings– Ecotoxicological effects and released compounds. Water Resarch X 12, 100105

Bers, A. V.; Wahl, M. (2004): The influence of natural surface microtopographies on fouling. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, Vol. 20(1), Taylor & Francis, London, S. 43–51.

Bers, A.V., Head, R., Prendergast, G., Zürn, C., Hansson, L., (2006): A comparative study of the anti-settlement properties of mytilid shells. Biology letters. 2. 88-91. 10.1098/rsbl.2005.0389.

Bers A. V.; Diaz E. R.; da Gama, B. A. P.; Vieira-Silva, F.; Dobretsov, S.; Valdivia, N.; Thiel, M.; Scardino, A. J.; McQuaid, C. D.; Sudgen, H. E.; Thomason, J. C.; Wahl, M. (2010): Relevance of mytilid shell microtopographies for fouling defence - A global comparison. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, Vol. 26(3), Taylor & Francis, London, S. 367–377.

BfR (2019): BfR-Empfehlungen zu Materialien für den Lebensmittelkontakt: XV. Silicone. Stand vom 01.06.2019 <https://bfr.ble.de/kse/faces/DBEmpfehlung.jsp> (Zugriff am 07.09.2020)

Boguslavsky, Y.; Shemesh, M.; Friedlander, A.; Rutenberg, R.; Filossof, A. M.; Buslovich, A.; Poverenov, E. (2018): Eliminating the need for biocidal agents in anti-biofouling polymers by applying grafted nanosilica instead. In: ACS Omega, Vol. 3(10), American Chemical Society, Washington D.C., S. 12437–12445.

Braga, C., Hunsucker, L., Gardner, H., Swain, G. (2020). A novel design to investigate the impacts of UV exposure on marine biofouling. Applied Ocean Research 101, 102226

Branscombe, E. S.; Rittschof, D. (1984): An investigation of low frequency sound waves as means of inhibiting barnacle settlement. In: Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Vol. 79(2), Elsevier B.V., Amsterdam, S.149-154.

Breur, R. (2017): Finsulate – keeps fouling at a distance. 24. Internationales Flock Symposium, maritim Hotel Stuttgart, 28.-29. März 2017, Stuttgart.

- Bullard, S. H.; Shumway, S. E.; Davis, C. V. (2010): The use of aeration as a simple and environmentally sound means to prevent biofouling. In: *Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, Vol. 26(5), Taylor & Francis, London, S. 587-593.
- Cavas, L. (2013): A Letter to Editor: On the use of the term “self-polishing” for antifouling paints. *Progress in Organic Coatings* 76, S. 1697– 1698
- Callow M. E.; Jennings A. R.; Brennan A. B.; Seegert, C. A.; Gibson, A. L.; Wilson, L.; Feinberg, A.; Baney, R.; Callow, J. A. (2002): Microtopographic cues for settlement of zoospores of the green fouling alga *Enteromorpha*. In: *Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, Vol. 18(3), Taylor & Francis, London, S. 237–245.
- Carteau, D.; Vallée-Réhel, K.; Linossier, I.; Quiniou, F.; Davy, R.; Compère, C.; Faÿ, F. (2014): Development of environmentally friendly antifouling paints using biodegradable polymer and lower toxic substances. In: *Progress in Organic Coatings*, Vol. 77(2), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 485–493.
- Castro e Silva, P., Oliveira, A. C. S., Pereira, L. A. S., Valquíria, M., Carvalho, G. R., Miranda, K. W. E., Marconcini, J. M., Oliveira, J. E. (2019): Development of bionanocomposites of pectin and nanoemulsions of carnauba wax and neem oil pectin/carnauba wax/neem oil composites. *Polymer Composites*.
- CEPE (European Council of the Paint, Printing Ink and Artists’ Colours Industry) (2012): Conduct and reporting of static raft tests for antifouling efficacy. CEPE, Brüssel, 5 S.
- ChemG §12e Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen - Auskunftsstelle, Unterrichtung der Öffentlichkeit.
- Choi C. H.; Scardino, A. J.; Dylejko, P. G.; Fletcher, L. E.; Juniper, R. (2013): The effect of vibration frequency and amplitude on biofouling deterrence. In: *Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, Vol. 29 (2), Taylor & Francis, London, S. 195-202.
- Dahms, H. U. & S. Dobretsov (2017): Antifouling compounds from marine macroalgae. In: *Marine Drugs* Vol. 15 (9), MDPI-Verlag, Basel, 16 pages.
- Daehne, B. (2012): Antifouling-Wirksamkeit von Riblet-Beschichtungen in der Nordsee (Norderney), 2009 – 2011. Verbundforschungsvorhaben “Strömungsgünstige Oberflächen durch Lacksysteme (HAI-TECH)”. BMWi-PTJ Förderzeichen: 0303X196. 144 S.
- Daehne, B. & B. Watermann (2012): Shark skin morphology and hydrodynamic properties. In: *Ship & Offshore, GreenTech*, 2012, DVV MediaGroup, Hamburg, S. 48-50.
- Daehne, B.; Watermann, B.; Fürle, C.; Daehne, D.; Thomsen, A. (2014): Erprobung von Reinigungsverfahren der Unterwasserbereiche von Sportbooten und küstenoperierenden Schiffen als Bewuchsschutz-Alternative – Materialbelastung, Effektivität und Gewässerbelastung. Abschlussbericht DBU-Projekt (AZ 29523-31), LimnoMar, Hamburg, Norderney, 159 S.
- Daehne, B., Watermann, B.; Fürle, C. (2018a): Putting anti-fouling coatings to the test. *Europ. Coat. J.* 03/2018: 38-42.
- Daehne, B., Watermann, B.; Fürle, C. (2018b): Volle Fahrt voraus! *Farbe & Lack* 08/2018: 20-25.
- Daehne, B.; Wallis, J.; & Kuhn, L. (2020): BasaltFaserFlock (BaFaFlo) - Entwicklung, Fertigung und verfahrenstechnische Untersuchung einer Beflockungstechnologie für maritime Baukörper auf Basis einer Basaltflockfaser. Schlussbericht, BMWi-Projekt (Förderkennzeichen: 03SX410 A), 57 S.
- Daehne, D., Watermann, B., Hornemann, M. (2012): Reinigung als Alternative zu biozidhaltigen Antifouling-Beschichtungen. *Wasser & Abfall* 3/2012
- Daehne, D.; Fürle, C.; Thomsen, A.; Watermann, B.; Feibicke, M. (2017): Antifouling biocides in german marinas – Exposure assessment and calculation of national consumption and emission. In: *Integrated Environmental Assessment and Management*, Vol. 13(5), Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Pensacola, Brüssel, S. 892-905.

Dibke, C; Fischer, M.; Scholz-Böttcher, B.M. (2021): Microplastic Mass Concentrations and Distribution in German Bight Waters by Pyrolysis–Gas Chromatography–Mass Spectrometry/ Thermochemolysis Reveal Potential Impact of Marine Coatings: Do Ships Leave Skid Marks? Environmental Science & Technology, 01 Feb 2021, 55(4):2285-2295. DOI: 10.1021/acs.est.0c04522

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (2011): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin (Teil I Mai 2009, Teil II September 2011, Teil II Mai 2009), <https://www.umwelt-online.de/recht/bau/dibt/bodgrwprod.htm>

Deutsches Institut für Bautechnik DIBt (2008). Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Mai 2008

DE-UZ 12a Emissions- und schadstoffarme Lacke. Vergabekriterien Ausgabe Januar 2019, Version 5, 32 S.

DE-UZ 216 Betonwaren mit rezyklierten Gesteinskörnungen für Bodenbeläge im Freien. Vergabekriterien Ausgabe Januar 2021, Version 1, 13 S.

DIN CEN/TR 17105 DIN SPEC 18904 (2018-02). Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Leitfaden für die Anwendung von ökotoxikologischen Untersuchungen auf Bauprodukte.

DIN CEN/TS 16637-2 (2014-11) Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Teil 2: Horizontale dynamische Oberflächenauslaugprüfung.

DIN EN ISO 17895 (2005-06) Beschichtungsstoffe - Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen organischen Verbindungen in wasserverdünnbaren Dispersionsfarben (In-Can VOC).

DIN EN ISO 14024 (2018-06). Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltkennzeichnung Typ I - Grundsätze und Verfahren.

DIN EN ISO 15181-1 (2007-10): Bestimmung der Auswaschrates von Bioziden aus Antifouling-Beschichtungen – Teil 1: Allgemeines Verfahren zur Extraktion von Bioziden.

DIN EN ISO 16000-9 (2008-04). Innenraumluftverunreinigungen - Teil 9: Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen - Emissionsprüfkammer-Verfahren.

DIN ISO 16000-6 (2012-11). Innenraumluftverunreinigungen - Teil 6: Bestimmung von VOC in der Innenraumluft und in Prüfkammern, Probenahme auf Tenax TA®, thermische Desorption und Gaschromatographie mit MS oder MS-FID

DIN EN ISO 11890-1 (2007-09): Beschichtungsstoffe - Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC-Gehalt) - Teil 1: Differenzverfahren (ISO 11890-1:2007);

DIN EN ISO 11890-2 (2020-12): Beschichtungsstoffe - Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC-Gehalt) und des Gehaltes an schwerflüchtigen organischen Verbindungen (SVOC-Gehalt) - Teil 2: Gaschromatographisches Verfahren (ISO 11890-2:2020)

DIN EN ISO 3251 (2019-09). Beschichtungsstoffe und Kunststoffe - Bestimmung des Gehaltes an nichtflüchtigen Anteilen (ISO 3251:2019)

DIN EN ISO 17895 (2005-06) Beschichtungsstoffe - Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen organischen Verbindungen in wasserverdünnbaren Dispersionsfarben (In-can VOC) (ISO 17895:2005)

Dobretsov, S., Sathe, P., Bora, T., Barry, M., Myint, M. T. Z., Al Abri, M. (2020). Toxicity of Different Zinc Oxide Nanomaterials at 3 Trophic Levels: Implications for Development of Low-Toxicity Antifouling Agents. Environmental Toxicology and Chemistry 39(7), S. 1343–1354.

European Chemical Agency ECHA (2018): Guidance on the Biocidal Products Regulation Volume II Efficacy - Assessment and Evaluation (Parts B+C) Version 3.0. Reference: ECHA-18-G-02-EN Cat. Number: ED-02-18-533-EN-N ISBN: 978-92-9020-502-9 DoI: 10.2823/49865, 385 S.

- Eklund, B.; Eklund, D. (2014): Pleasure boatyard soils are often highly contaminated. In: *Environmental Management*, Vol. 53(5), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 930-946.
- Eklund, B; Johansson, L.; Ytreberg, E. (2014): Contamination of a boatyard for maintenance of pleasure boats. In: *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 14(5), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 955-967.
- Emde, B., Zimbelmann, S.; Heusinger v. Waldegge, T.; Stübing, D.; Baumann M. (2021): Erforschung innovativer Antifouling Systeme am Beispiel des Projektes FoulLas: Fouling Entfernung von maritimen Oberflächen mittels Laserstrahlung unter Wasser. Maritimes Cluster & EurA AG (Veranstalter): Virtueller Biofouling-Workshop – Aktuelle Branchenentwicklung, 15 Folien.
- Essel, R.; Engel, L.; Carus, M.; Ahrens, R. H. (2015): Quellen für Mikroplastik mit Relevanz für den Meeresschutz in Deutschland. Abschlussprojekt Projektnummer 31969, UBA-Texte 63/2015.
- Estévez-Calvar, N.; Gambardella, C.; Miraglia, F.; Pavanello, G.; Greco, G.; Faimali, M.; Garaventa, F. (2018): Potential use of an ultrasound antifouling technology as a ballast water treatment system. In: *Journal of sea research*, Vol. 133(1), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 115-123.
- Europäische Union (2003): Verordnung (EG) NR. 782/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. April 2003 über das Verbot zinnorganischer Verbindungen
- Europäische Union (2008): Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006. 1355 S.
- Europäische Union (2012): EU-Verordnung Nr. 528/2012 des europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Mai 2012 über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten
- Europäische Union (2014): BESCHLUSS DER KOMMISSION 2014/312/EU vom 28. Mai 2014 zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des EU-Umweltzeichens für Innen- und Außenfarben und -lacke (Bekanntgegeben unter Aktenzeichen C (2014) 3429), 73 S.
- European Commission (2016). Guidance to specify information requirements for free radicals generated in situ from ambient water or air for substance approval in the context of the BPR. 64th CA meeting, CA-May16- Doc.5.1
- European Commission (2020). Best Available Techniques (BAT) Reference Document on Surface Treatment Using Organic Solvents including Preservation of Wood and Wood Products with Chemicals. European IPPC Bureau under the Industrial Emissions Directive 2010/75/EU, Seville, Spain
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC122816>
- Faber, M., Marinković, M., de Valk, E., Waaijers-van der Loop, S. L. (2021). Paints and microplastics - Exploring recent developments to minimise the use and release of microplastics in the Dutch paint value chain. RIVM report 2021-0037
- Faÿ, F.; Gouessan, M.; Linossier, I.; & Réhel, K. (2019): Additives for efficient biodegradable antifouling paints. In: *International Journal of Molecular Science*, Vol. 20(2), 361, MDPI-Verlag, Basel, 12 S.
- Feng, K.; Ni, C.; Yu, L.; Zhou, W.; Li, X. (2019): Synthesis and antifouling evaluation of indole derivatives. In: *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 182, 109423 (March 2019), Elsevier B.V., Amsterdam
- Ferreira, O.; Rijo, P.; Gomes, J. F.; Santos, R.; Monteiro, S.; Vilas-Boas, C.; Correia-da-Silva, M.; Almada, S.; Alves, L. G.; Bordado, J. C.; Silva, E. R. (2020): Biofouling inhibition with grafted econea biocide - Toward a nonreleasing eco-friendly multiresistant antifouling coating. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* Vol.8(1), S. 12–17.
- Foeth, E.-J. (2010): The efficacy of air-bubble lubrication for decreasing friction resistance. In: *The Naval Architect*, April 2011, The Royal Institution of Naval Architects, London, S. 44-46.

- Gaylarde, C., Neto, J. A. B., Monteiro da Fonseca, E. (2021). Paint fragments as polluting microplastics: A brief review. *Marine Pollution Bulletin* 162, 111847
- Gartiser, S.; Heisterkamp, I.; Schoknecht, U.; Burkhardt, M.; Ratte, M. (2016): Empfehlungen für eine Testbatterie zur ökotoxikologischen Bewertung der Umweltverträglichkeit von Bauprodukten. Abschlussbericht (FKZ 3712 95 309) im Auftrag des Umweltbundesamtes, April 2016. UBA-Texte 74/2016. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-21_abschlussbericht_testbatterie-bauprodukte_final.pdf
- Gartiser, S., Heisterkamp, I., Schoknecht, U., Burkhardt, M., Ratte, M., Ilvonen, O. (2017). Recommendation for a test battery for the ecotoxicological evaluation of the environmental safety of construction products. *Chemosphere* 171, S. 580-587
- Gartiser, S.; Petersen, E.; Smolka, S. (2018): Reduzierung der Verwendung von Bioziden - Prüfung von Alternativen zum Biozid-Einsatz. Abschlussbericht FKZ 3714 67 403 0 im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Gnass, K., Watermann, B., Neumann, B., Kohl, A., Doose, J. (2009). Auswirkungen der VOC-Richtlinie. *Schiff & Hafen* 2009 (4), S. 64-67
- Gittens, J. E.; Smith, T. J.; Suleiman, R.; Akid, R. (2013): Current and emerging environmentally-friendly systems for fouling control in the marine environment. In: *Biotechnology Advances*, Vol. 31(8), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 1738-1753.
- Grabitz, E., Olsson, O., Amsel, A.-K., Rummel, B., Mitzel, N. W., Kümmerer, K. (2020). Abiotic and biotic degradation of five aromatic organosilicon compounds in aqueous media—Structure degradability relationships. *Journal of Hazardous Materials* 39, 122429.
- Guo, S. F.; Lee, H. P.; Chaw, K. C.; Jason, M.; Ming, T. S. L.; Dickinson, G. H.; Birch, W. R.; Khoo, B. C. (2011): Effect of ultrasound on cyprids and juvenile barnacles. In: *Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, Vol. 27 (2), S. 185-192.
- Guo S. F.; Lee H. P.; Teo S. L. M.; Khoo B. C. (2012): Inhibition of barnacle cyprid settlement using low frequency and intensity ultrasound. In: *Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, Vol. 28 (2), S. 131-141.
- Guezennec J.; Herry, J. M.; Kouzayha, A.; Bachere, E.; Mittelman, M. W.; Fontaine, M. N. B. (2012): Exopolysaccharides from unusual marine environments inhibit early stages of biofouling. In: *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 66(1), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 1-7.
- Han, X., Wu, J., Zhang, X., Shi, J., Wei, J., Yang, Y., Wu, B., Feng, Y. (2021). Special issue on advanced corrosion-resistance materials and emerging applications. The progress on antifouling organic coating: From biocide to biomimetic surface. *Journal of Materials Science & Technology* 61, S. 46–62.
- Hearin, J.; Hunsucker, K. Z.; Swain, G.; Stephens, A.; Gardner, H.; Lieberman, K.; Harper, M. (2015): Analysis of long-term mechanical grooming on large-scale test panels coated with an antifouling and a fouling-release coating. In: *Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, Vol. 31(8), Taylor & Francis, London, S. 625-638.
- Hearin, J.; Hunsucker, K. Z.; Swain, G.; Gardner, H.; Stephens, A.; Lieberman, K. (2016): Analysis of mechanical grooming at various frequencies on a large scale test panel coated with a fouling-release coating. In: *Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, Vol. 32(5), Taylor & Francis, London, S. 561-569
- Heine, L., Nestler, A. (2019). Promising Practices for Alternatives Assessment: Lessons from a Case Study of Copper-Free Antifouling Coatings. *Integrated Environmental Assessment and Management* 15 (6), S. 867-879.
- Hijnen, N.; Jongerius, M. (2018): UV-C Keeping Ship Hulls Free from Biofouling. <https://www.marinelink.com/news/uv-c-keeping-ship-hulls-free-biofouling-443251> (06.05.2020).

- Holm, E. R.; Stamper, D. A.; Brizzolara, R. A.; Barnes, L.; Deamer, N.; Burkholder, A. M. (2008): Sonication of bacteria, phytoplankton and zooplankton - Application to treatment of ballast water. In: Marine Pollution Bulletin, Vol. 56(6), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 1201-1208.
- Hornemann, M.; Watermann, B.; Gropius, M.; Haase, M.; Begler, W.; Gollmer, K.-P. (1999): Untersuchung von Verfahren zur Außenreinigung von Sportbooten als Alternative zu biozidhaltigen Unterwasseranstrichen (Teilvorhaben II). Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben (FKZ 297 67 147/02) im Auftrag des Umweltbundesamtes, Fraunhofer IPA, Stuttgart, 159 S.
- Hu, P., Xie, Q., Ma, C., Zhang, G. (2020) Silicone-Based Fouling-Release Coatings for Marine Antifouling. Langmuir 2020, 36, 2170–2183.
- Hunsucker, K. Z.; Braga, C.; Erdogan, C.; Gardner, H.; Hearin, J.; Ralston, E.; Swain, G.; Tribou, M.; Wassick, A. (2018): The advantages of proactive in-water hull grooming from a biologist's perspective - Abstract. 3rd Hull Performance & Insight Conference (HullPIC), 12.-14. März 2018, Redworth (GB)
- Hunsucker, K. Z.; Braga, C.; Gardner, H.; Jongerius, M.; Hietbrink, R.; Salters, B.; Swain, G. (2019): Using ultraviolet light for improved antifouling performance on ship hull coatings. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, Vol. 35(6), Taylor & Francis, London, S. 658-668.
- ISO 21716-1:2020 Ships and marine technology — Bioassay methods for screening anti-fouling paints — Part 1: General requirements.
- ISO 21716-2:2020 Ships and marine technology — Bioassay methods for screening anti-fouling paints — Part 2: Barnacles.
- ISO 21716-3:2020 Ships and marine technology — Bioassay methods for screening anti-fouling paints — Part 3: Mussels.
- Jotun 2021: Safety Data Sheet - SeaLion Resilient Wintergrade Comp B, 16 S.
- Jotun 2021: Safety Data Sheet - SeaLion Resilient Comp B, 16 S.
- Kamjunke, N., Spohn, U., Morig, C., Wagner, G., Neu, T. R. (2020): A Test device for microalgal antifouling using fluctuating pH values on conductive paints. Water 12, 1597
- Karlsson, J.; Eklund, B. (2004): New biocide-free anti-fouling paints are toxic. In: Marine Pollution Bulletin, Vol. 49(5–6), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 456–464.
- Karlsson, J.; Ytreberg, E.; Eklund, B. (2010): Toxicity of anti-fouling paints for use on ships and leisure boats to non-target organisms representing three trophic levels. In: Environmental Pollution, Vol. 158(3), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 681–687.
- Kastelein, R. A.; Helder-Hoek, L.; Van de Vorde, S. (2017): Hearing thresholds of a male and a female harbor porpoise (*Phocoena phocoena*, Gewöhnlicher Schweinswal). In: The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 142, The Acoustical Society of America, Melville, S. 1006-1010.
- Kato, H.; Kodama, Y. (2003): Microbubbles as a skin friction reduction device – A midterm review of the research. 4th Symposium on Smart Control of Turbulence, 2.-4. März 2003, Tokio, 9 S.
- Kawabuchi, M.; Kawakita, C.; Mizokami, S.; Higasa, S.; Kodan, Y.; Takano, S. (2003): CFD predictions of bubbly-flow around an energy-saving ship with Mitsubishi Air Lubrication System. In: Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 48(1), Mitsubishi Heavy Industries, Chiyoda, 5 S.
- Kirschner, C. M.; Brennan, A. B. (2012): Bio-inspired antifouling strategies. In: Annual Review of Materials Research, Vol. 42, Annual Reviews-Verlag, Palo Alto, S. 211–229.
- Legg, M.; Yücel, M. K.; Garcia de Carellan, I.; Kappatos, V.; Selcuk, C.; Gan, T. H. (2015): Acoustic methods for biofouling control - A review. In: Ocean Engineering, Vol. 103, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 237–247.

- Leonardi, A. K.; Ober, C. K. (2019): Polymer-based marine antifouling and fouling release surfaces - Strategies for synthesis and modification. In: Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, Vol. 10(1), Annual Reviews-Verlag, Palo Alto, S. 241–264.
- Leisewitz, A., Schwarz, W. (1997). Stoffströme wichtiger endokrin wirksamer Industriechemikalien (Bisphenol A; Dibutylphthalat/Benzylbutylphthalat; Nonylphenol/Alkylphenoethoxylate). Abschlussbericht FKZ 106 01 076, Öko-Recherche GmbH, Frankfurt/Main
<https://www.oekorecherche.de/sites/default/files/publikationen/vollendokrin.pdf>
- Lewis, J. A. (2016): Project 16214 – Assessment of preventative biofouling management measures, MPI Technical Paper 2016/69. Ministry for primary industries, Wellington, September 2016, 126 S.
- Li, Y.; Ning, C. (2019): Latest research progress of marine microbiological corrosion and bio-fouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling. In: Bioactive Materials, Vol. 4, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 189–195.
- Löschau, M.; Krätke, R. (2005): Efficacy and toxicity of self-polishing biocide-free antifouling paints. In: Environmental Pollution, Vol. 138(2), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 260–267.
- Lompe, D.; Schubert, C. (2013): Umweltfreundliche Waschanlage für Sportboote mit Biozid-freien Beschichtungen. Abschlussbericht (Az 29437-31) der DBU, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, Bremerhaven, 94 S.
- Lürling, M.; Tolman, Y. (2014): Effects of commercially available ultrasound on the zooplankton grazer *Daphnia* and consequent water greening in laboratory experiments. In: Water, Vol. 6(11), MDPI-Verlag, Basel, S. 3247-3263.
- Martins, S. E.; Fillmann, G.; Lillicrap, A.; Thomas, K. V. (2018): Review - Ecotoxicity of organic and organo-metallic antifouling co-biocides and implications for environmental hazard and risk assessments in aquatic ecosystems. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, Vol. 34(1), Taylor & Francis, London, S. 34–52.
- Menesses, M., Belden, J., Dickenson, N., Bird, J. (2017). Measuring a critical stress for continuous prevention of marine biofouling accumulation with aeration. Biofouling, 2017
- Milner, S. Z. (1991): Polymer brushes. In: Science Vol. 251, American Association for the Advancement of Science, Washington D.C., S. 905–914.
- Mongeon, P.; Paul-Hus, A. (2016): The journal coverage of web of science and scopus: A comparative analysis. In: Scientometrics, Vol. 106(1), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 213-228.
- Morrisey, D.; Woods, C. (2015): In-water cleaning technologies - Review of information, MPI Technical Paper 2015/38. Ministry for Primary Industries, Wellington, November 2015, 53 S.
- Murosaki, T., Ahmed, N., 2 and Jian Ping Gong, J. P. (2011): Antifouling properties of hydrogels. Sci. Technol. Adv. Mater. 12, 064706 (7 S.)
- Nendza, M. (2007): Prüfung der Auswirkungen von in Antifouling-/Foul-Release-Produkten eingesetzten Siliconölen (Polydimethylsiloxanen) auf die marine Umwelt. Abschlussbericht (FKZ 360 04 015) im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau, UBA-Texte 15/2007, 84 S.
- Neves, A. R., Almeida, J. R., Carvalhal, F., Câmara, A., Pereira, S., Antunes, J., Vasconcelos, V., Pinto, M., Silva, E. R., Sousa, E., Correia-da-Silva, M. (2020). Overcoming environmental problems of biocides: Synthetic bile acid derivatives as a sustainable alternative. Ecotoxicology and Environmental Safety 187, 109812
- OECD (2009): Environmental Health and Safety Publications Series on Emission Scenario Documents No. 22, Emission scenario document on coating industry (paints, lacquers and varnishes). Environment Directorate, ENV/JM/MONO (2009) 24, 201 S.

- Oliveira, I. B.; Groh, K. J.; Schönenberger, R.; Barroso, C.; Thomas, K. V.; Suter, M. J. F. (2017): Toxicity of emerging antifouling biocides to non-target freshwater organisms from three trophic levels. In: *Aquatic Toxicology*, Vol. 191, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 164–174.
- Oliveira, D. R., Granhag, L. (2020). Ship hull in-water cleaning and its effects on fouling-control coatings, *Biofouling*, 36(3), S. 332-350
- Olsen, S. M., Mikolajczak, M., Sørensen, K. F., Larsen, P. B., Christiansen, H., Donau, S. S., Jepsen, L. H. (2019). Substitution of tin catalyst in antifouling paint. Danish Environmental Protection Agency, Environmental Project No. 2099, August 2019 <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2019/08/978-87-7038-101-7.pdf>
- Park, J.; Church, J.; Son, Y.; Kim, K.-T.; Lee, W. H. (2017a): Recent advances in ultrasonic treatment - Challenges and field applications for controlling harmful algal blooms (HABs). In: *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 38, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 326–334.
- Park, J. S.; Lee, J.-H. (2017b): Sea-trial verification of ultrasonic antifouling control. In: *Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, Vol. 34(1), Taylor & Francis, London, S. 98-110.
- Peres, R. S.; Armelin, E.; Alemán, C.; Ferreira, C. A. (2015): Modified tannin extracted from black wattle tree as an environmentally friendly antifouling pigment. In: *Industrial Crops and Products*, Vol. 65, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 506-514.
- Persoone, G., Castritsi-Catharios, J. (1989). A simple bioassay with *Artemia* larvae to determine the acute toxicity of antifouling paints. *Water Research* 23(7), S. 893-897
- Piazza, V.; Gambardella, C.; Garaventa, F.; Massanisso, P.; Chiavarini, S.; Faimali, M. (2018): A new approach to testing potential leaching toxicity of fouling release coatings (FRCs). In: *Marine Environmental Research*, Vol. 141, Elsevier, B.V., Amsterdam, S. 305–312.
- Polcher, A., Potrykus, A., Schöpel, M., Weißenbacher, J., Zotz, F. et al. (2020). Sachstand über die Schadstoffe in Kunststoffen und ihre Auswirkungen auf die Entsorgung. Abschlussbericht FKZ UM19 34 5080 im Auftrag des BMU, April 2020
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_um19_34_5080_schadstoffe_kunststoffe_bf.pdf
- Redeker, M.; Rissel, R.; Schwandt, D.; Meermann, B. (2020): Minimierung von Umweltkrisen der Antifouling-Schiffsanstriche in Deutschland – Entwicklung von Handlungsoptionen im Rahmen der Produktzulassung. Abschlussbericht (FKZ 3715 6740 40) im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau, UBA-Texte 35/2020, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-02-26_texte_35-2020_antifouling-schiffsanstriche.pdf
- Roche, R. C.; Monnington, J. M.; Newstead, R. G.; Sambrook, K.; Griffith, K.; Holt, R. H. F.; Jenkins, S. R. (2015): Recreational vessels as a vector for marine non-natives - Developing biosecurity measures and managing risk through an in-water encapsulation system. In: *Hydrobiologia*, Vol. 750(1), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 187–199.
- Rossini, P.; Napolano, L.; Matteucci, G. (2019): Biototoxicity and life cycle assessment of two commercial antifouling coatings in marine systems. In: *Chemosphere*, Vol. 237, Elsevier B.V., Amsterdam, 124475.
- Rüdel, H., Körner, W., Letzel, T., Neumann, M., Nödler, C., Reemtsma, T. (2020). Persistent, mobile and toxic substances in the environment: a spotlight on current research and regulatory activities. Rüdel et al. *Environ Sci Eur* 32(5), 11 p.
- Rühl, R. (2017). Neueinstufung für Hautverhinderer in Bautenlacken. *BauPortal* 5/2017
- Satheesh, S.; Ba-akdah, M. A.; Al-Sofyani, A. A. (2016): Natural antifouling compound production by microbes associated with marine macroorganisms — A review. In: *Electronic Journal of Biotechnology*, Vol. 21, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 26–35.

- Scardino, A. J.; De Nys, R.; Ison, O.; O’Conner, W.; Steinberg, P. (2003): Microtopography and antifouling properties of the shell surface of the bivalve molluscs *Mytilus galloprovincialis* and *Pinctada imbricata*. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, Vol. 19 (1), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 221–230.
- Scardino, A.J.; Hudleston, D.; Peng, Z.; Paul, N. A.; de Nys, R. (2009): Biomimetic characterisation of key surface parameters for the development of fouling resistant materials. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, 25(1), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 83–93.
- Schiffbautechnische Gesellschaft e.V. (1992): STG-Richtlinie Nr. 2221, Korrosionsschutz für Seeschiffe und Seebauwerke, Teil III: Instandhaltung von Korrosionsschutz-Systemen. Fachausschuss „Werkstoffe und Korrosion“, Hamburg, 36 S.
- Schmidt, V.; Dubbers, E. (2014): Regelungen der Bundesländer auf dem Gebiet der umweltfreundlichen Beschaffung. Abschlussbericht (FKZ 3711 95 303) im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau, UBA Texte 44/2014.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_44_2014_regelungen_der_bundeslaender_beschaffung_korr.pdf
- Schultz, M. P. (2004): Frictional resistance of antifouling coating systems. In: Journal of Fluids Engineering, Vol. 126(6), The American Society of Mechanical Engineers, New York, S. 1039-1047.
- Schultz, M. P. (2007): Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, Vol. 23(5), Taylor & Francis, London, S. 331-341.
- Scianni, C.; Georgiades, E. (2019): Vessel in-water cleaning or treatment - Identification of environmental risks and science needs for evidence-based decision making. In: Frontiers in Marine Science, Vol. 6, Frontiers Media, Lausanne, Article 467, 12 S.
- Selim, M. S.; Elmarakbi, A.; Azzam, A. M.; Shenashen, M. A.; EL-Saeed, A. M.; El-Safty S. A. (2018): Eco-friendly design of superhydrophobic nano-magnetite/silicone composites for marine foul-release paints. In: Progress in Organic Coatings, Vol. 116, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 21-34.
- Setzer, S.; Schwanemann, T.; Oosterwoud, M.; Rissel, R.; Nöh, I.; Redeker, M.; Meermann, B. (2019): Antifouling im Wassersport – Was ist das Beste für Mensch, Umwelt und Ihr Boot? Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 60 S.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/190514_uba_lf_antifouling_bf.pdf
- Silva, E. R.; Ferreira, O.; Ramalho, P. A.; Azevedo, N. F.; Bayón, R.; Igartua, A.; Bordado, J. C.; Calhorda, M. J. (2019): Eco-friendly non-biocide-release coatings for marine biofouling prevention. In: Science of the Total Environment, Vol. 650(2), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 2499–2511.
- Soroldoni, S.; Abreu, F.; Braga Castro, I.; Duarte, F. A.; Lopes Leaes Pinho, G. (2017): Are antifouling paint particles a continuous source of toxic chemicals to the marine environment? In: Journal of Hazardous Materials, Vol. 330, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 76–82.
- Soroldoni, S.; Braga Castro, I.; Abreu, F.; Duarte, F. A.; Choueri, R. B.; Möller jr., O. O.; Fillmann, G.; Lopes Leaes Pinho, G. (2018): Antifouling paint particles - Sources, occurrence, composition and dynamics. In: Water Research, Vol. 137, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 47-56.
- Southall, B. L.; Bowles, A. E.; Ellison, W. T.; Finneran, J. J.; Gentry, R. L.; Greene, C. R.; Kastak, D.; Ketten, D. R.; Miller, J. H.; Nachtigall, P. E.; Richardson, W. J.; Thomas, J. A.; Tyack, P. L. (2008). Marine mammal noise-exposure criteria - Initial scientific recommendations. In: Bioacoustics, Vol. 17, Taylor & Francis, London, S. 273–275.
- Strand, H.; Solér, C.; Dahlström, M. (Editors) (2019): Changing leisure boat antifouling practices in the Baltic Sea - Results from the BONUS CHANGE project. <https://www.ri.se/sites/default/files/2019-03/Changing%20leisure%20boats%20antifouling%20practices%20in%20the%20Baltic%20sea%20->

%20Book_0.pdf <https://www.ri.se/en/what-we-do/projects/changing-antifouling-practices-leisure-boats-baltic-sea>(3.3.2020).

Swain, G.; Anil, A. C.; Baier, R. E.; Chia, F.-S.; Conte, E.; Cook, A.; Hadfield, M.; Haslbeck, E.; Holm, E.; Kavanagh, C.; Kohrs, D.; Kovach, B.; Lee, C.; Mazzella, L.; Meyer, A. E.; Qian, P.-Y.; Sawant, S. S.; Schultz, M. P.; Sigurdsson, J.; Smith, C.; Soo, L.; Terlizzi, A.; Wagh, A.; Zimmerman, R.; Zupo, V. (2000): Biofouling and barnacle adhesion data for fouling-release coatings subjected to static immersion at seven marine sites. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, Vol.16(2-4), Taylor & Francis, London, S. 331-344

Swain, G.; Kavanagh, C.; Kovach, B.; Quinn, R. (2001): The antifouling performance of non-toxic silicone fouling-release coatings. Symposium on Pollution Prevention from Ships and Shipyards, Oceanology International 2001 Conference, 4.-5. April 2001, Miami (USA)

Swain, G.; Schultz, M. P. (1996): The testing and evaluation of non-toxic antifouling coatings. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, Vol. 10(1-3), Taylor & Francis, London, S. 187-197.

Torres, F. G., De-la-Torre, G. E. (2021). Environmental pollution with antifouling paint particles: Distribution, ecotoxicology, and sustainable alternatives. Marine Pollution Bulletin 169, 112529

TRGS 905 (März 2016): Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe, letzte Änderung 13.03.2020, BAuA (Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin), Dortmund, 20 S. https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-905.pdf?__blob=publicationFile (07.05.2020).

Tribou, M.; Swain, G. (2010): The use of proactive in-water grooming to improve the performance of ship hull antifouling coatings. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, Vol. 26(1), Taylor & Francis, London, S. 47-56.

Umweltbundesamt (2007). Phthalate - Die nützlichen Weichmacher mit den unerwünschten Eigenschaften. Hintergrund, Stand: Februar 2007

Umweltbundesamt (2012): Leitfaden zur umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung von elastischen Bodenbelägen, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 13 S. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/515/dokumente/leitfaden_elastische_fussbodenbelaege.pdf (07.05.2020).

Umweltbundesamt (2020): Bewuchs-Atlas - Erfahrungen mit Alternativen. <https://www.umweltbundesamt.de/bewuchstlas-erfahrungen-biozidfreien-alternativen> (3.3.2020).

UNEP (2016): Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, 274 S.

VdL-Richtlinie 01 (2019-05). Deklaration Beschichtungsstoffe, Stand Mai 2019 (7. Revision)

Wahl, M.; Kröger, K.; Lenz, M. (1998): Non-toxic protection against epibiosis. In: Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, Vol. 12(1-3), Taylor & Francis, London, S. 205-236.

Wallström, E.; Jespersen, H. T.; Schaumburg, K. (2011): A new concept for anti-fouling paint for Yachts. In: Progress in Organic Coatings, Vol. 72(1–2), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 109–114.

Wang, J.; Shi, T.; Yang, X.; Han, W.; Zhou, Y. (2014): Environmental risk assessment on capsaicin used as active substance for antifouling system on ships. In: Chemosphere, Vol. 104, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 85-90.

Watermann, B.; Gropius M.; Volz, H., Hornemann, M. (1996): Untersuchung von Verfahren zur Außenreinigung von Sportbooten als Alternative zu biozidhaltigen Unterwasseranstrichen Teilvorhaben I. Endbericht (Forschungsvorhaben Nr. 180238) im Auftrag des Umweltbundesamtes, Fraunhofer IPA, Stuttgart, 130 S.

Watermann, B., H.-D. Berger, H. Sönnichsen & P. Willemsen (1997): Performance and Effectiveness of Non-Stick Coatings in Seawater. Biofouling: 101-118.

Watermann, B.; Daehne, B.; Wiegemann, M.; Lindeskog, M.; Sievers, S. (2003): Performance of biocide-free antifouling paints - Trials on deep-sea going vessels. Vol III. Inspections and new applications of 2002 and 2003 and synoptical evaluation of results (1998 - 2003). LimnoMar, Hamburg / Norderney, 125 S.

Watermann, B.; Weaver, L.; Hass, K. (2004): Machbarkeitsstudie für neue Umweltzeichen nach DIN EN ISO 14024 zu ausgewählten Produktgruppen, Teilvorhaben 3: Biozidfreie Antifouling (AF)-Produkte. Forschungsbericht 201 95 311/03 im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-Texte 45/04, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 115 S.
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2829.pdf>

Watermann, B.; Daehne, B.; Sievers, S.; Dannenberg, R.; Overbeke, J. C.; Klijnstra, J. W.; Heemken, O. (2005): Bioassays and selected chemical analysis of biocide-free antifouling coatings. In: Chemosphere, Vol. 60(11), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 1530–1541.

Watermann, B.T.; Daehne, D.; Fürle, C. (2010): Einsatz von Nanomaterialien als Alternative zu biozidhaltigen Antifouling-Anstrichen und deren Umweltauswirkungen. Texte UBA, 20-2010, 137 S.

Watermann, B., D. Daehne, C. Fürle, A. Thomsen (2014): Sicherung der Verlässlichkeit der Antifouling-Expositionsschätzung im Rahmen des EU-Biozid-Zulassungsverfahrens auf Basis der aktuellen Situation in deutschen Binnengewässern für die Verwendungsphase im Bereich Sportboothäfen.

Watermann, B., Daehne, D., Fürle, C., Thomsen, A. (2015): Sicherung der Verlässlichkeit der Antifouling-Expositionsschätzung im Rahmen des EU-Biozid-Zulassungsverfahrens auf Basis der aktuellen Situation in den deutschen Binnengewässern für die Verwendungsphase im Bereich Sportboothäfen, UFOPLAN 2011, FKZ 3711 67 432, UBA- TEXTE 68/2015

Watermann, B.; Wohler, B.; Daehne, B.; Daehne, D.; Thomsen, A.; Janson, P.; Fürle, C. (2016): Erprobung von Reinigungsverfahren für biozidfreie Unterwasserbeschichtungen an Sportbooten in Modellregionen – Unterweser, Dümmer, Ratzeburger See, Zeuthener See. Abschlussbericht DBU-Projekt (AZ 32413/01-31), LimnoMar, Hamburg, Norderney, 99 S.

Watermann, B.; Eklund, B. (2019): Can the input of biocides and polymeric substances from antifouling paints into the sea be reduced by the use of non-toxic hard coatings? In: Marine Pollution Bulletin, Vol. 144, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 146–151.

Watermann, B.; Garrick D.L. (2019): Bewuchsfreiheit durch proaktive Reinigung auf abriebfesten, biozidfreien Beschichtungen für die Berufsschifffahrt - Erprobung und Genehmigungsanforderungen.
<http://www.limnomar.de/index.php?&modul=gruppe&grp=2&pid=46> (07.05.2020)

Watermann, B. und Herlyn, M. (2020). Beschichtungspartikel- und Polymer-einträge aus Unterwasserbeschichtungen von Schiffen und Booten. Wasser und Abfall Heft 3/2020, S. 43-49

Wezenbeek, M.; Moermond, C. T. A.; Smit, C. E. (2018): Antifouling systems for pleasure boats - Overview of current systems and exploration of safer alternatives. RIVM Report 2018-0086, National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, 92 S., <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2018-0086.html> (3.3.2020)

Wirth, O., Jepsen, D. (2020). 124/2020 Umweltzeichen Blauer Engel für Produkte aus Recycling-Kunststoffen - Hintergrundbericht zur Überarbeitung der Vergabekriterien DE-UZ 30a, Ausgabe Januar 2019. UBA-Texte 124/2020

Worms, A. (2013): Roboter soll Antifouling ersetzen.
https://www.yacht.de/ausruistung/neue_ausruestung/roboter-soll-antifouling-ersetzen/a77661.html

Yang, W. J.; Neoh, K. G.; Kang, E. T.; Teo, S. L. M.; Rittschof, D. (2014): Polymer brush coatings for combating marine biofouling. In: Progress in Polymer Science, Vol. 39(5), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 1017–1042.

Yebra, D. M.; Kiil, S.; Dam-Johansen, K. (2004): Antifouling technology - Past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. In: Progress in Organic Coatings, Vol. 50(2), Elsevier B.V., Amsterdam, S. 75–104.

Ytreberg, E., Karlsson, J., Eklund, B. (2010). Comparison of toxicity and release rates of Cu and Zn from anti-fouling paints leached in natural and artificial brackish seawater. Science of the Total Environment 408, S. 2459–2466

Zecher, K.; Aitha, V. P.; Heuer, K.; Ahlers, H.; Roland, K.; Fiedel, M.; Philipp, B. (2018): A multi-step approach for testing non-toxic amphiphilic antifouling coatings against marine microfouling at different levels of biological complexity. In: Journal of Microbiological Methods, Vol. 146, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 104–114.

Ziembowicz, S.; Kida, M.; Koszelnik, P. (2018): Sonochemical formation of hydrogen peroxide. 2nd International Electronic Conference on Water Sciences (ECWS-2), 16.-30. November 2017, 10 S.

<https://sciforum.net/manuscripts/4957/manuscript.pdf>

Zschätzsch, J.; Daehne, B.; Günther, M.; Dietsch, S.; Heinemann, K.; Blum, T.; Kunz, T. (2018): Basalt fibre flock as a novel environmentally friendly antifoulant. Poster, 19. ICMCF (The International Congress on Marine Corrosion and Fouling), 24.-29. Juni 2018, Melbourne/Florida

A Anhang

A.1 Steckbrief

Abbildung 2: Seite 1 des Steckbriefformulars für Beschichtungen

Brill+ Partner GmbH Marktrecherche zu FKZ 3719654150 Stand 30.01.20
 Hydrotox GmbH **Vergabekriterien Blauer Engel für biozidfreie Antifouling-Systeme** Seite 1

1 Beschichtungen

Hersteller:

Name des Produktes:

Welchem Beschichtungstyp ist die Alternative zuzurechnen?

- Antihaftbeschichtungen
- Antihaftfolien
- Selbstpolierende und erodierende Beschichtungen
- Faserbeschichtungen und –folien
- Reinigungsfähige Hartbeschichtungen oder -materialien
- Sonstige (bitte beschreiben)

Tabelle 1: Beschichtungen

Sofern vorhanden bitte zusätzliche Informationen/Untersuchungen beilegen

Kriterien	Antwort	Veröffentlichbar?
Beschreibung der Alternative		
Anbieter	Firma: Adresse: Kontaktdaten: Ansprechpartner:	
Wirkungsweise der Alternative		
Geeignet für... (Sportboot, Seekästen, Bojen, Schrauben,...)		
Einsatzbereich (Meer-, Süß, Brackwasser, Bewuchsdruck)		
Standzeit		
Nachweis der Wirksamkeit	Unabhängige Prüfstelle: Ort und Zeitraum d. Auslagerung: Anströmung:	
Auswertungsmethode Wirksamkeitsnachweis		
Anwendung	Vorbereitung der Fläche: Voranstrich: Anzahl der Anstriche: Selbstklebende Schicht: Kleber: Sonstiges:	

Quelle: eigene Darstellung, Dr. Brill + Partner

Abbildung 3: Seite 2 des Steckbriefformulars für Beschichtungen

Brill+ Partner GmbH Marktrecherche zu FKZ 3719654150 Stand 30.01.20
 Hydrotox GmbH **Vergabekriterien Blauer Engel für biozidfreie Antifouling-Systeme** Seite 2

Kriterien	Antwort	Veröffentlichbar?
Pflege und Wiederholung der Anwendung	Pflege:	
Erfahrungsberichte Bootseigner		
Verwendete Materialien und Stoffe <i>Hinweis: Im Idealfall alle Stoffe mit Gehalten > 1% sowie <u>alle</u> besorgniserregenden Stoffe (z.B. SVHC-Liste nach REACH, Gefährlich nach CLP-Verordnung, ...) nennen</i>	(siehe Liste unten)	
Einsatz von Bioziden (möglichst mit Konzentrationsangabe)	Topfkonservierungsmittel (PA 6): Filmkonservierungsmittel (PA 7): Antifoulingmittel (PA 21):	
Human- und Umwelteinstufung des Produktes		
Ökologie und Umweltschutz	Auswaschung gefährlicher Stoffe: Freisetzung von Nanopartikeln: Freisetzung von Mikroplastik: Bioakkumulationspotential: Sonstiges:	
Gesundheitsschutz (bei der Anwendung)	Entfernung Voranstrich: Lösemittelfreisetzung (VOC):	
Praktikabilität und Gebrauchstauglichkeit	Materialvoraussetzungen (geeignet für GFK, Stahl-Rümpfe etc. Anforderungen an Altanstriche etc.): Trocknungszeit (alle Anstriche): Wärme und Kältebeständigkeit: UV-Beständigkeit: Mechanische Beständigkeit: Verhalten bei Wasser/Trockenwechsel (Tide): Aufwand für Anwendung: Benötigte Maschinen/Hilfsmittel: DIY-Anwendung möglich? Aufwand für Folgearbeiten: - Auffrischung: - Entschichtung:	
Standards für Gebrauchstauglichkeit	Sofern vorhanden:	
Wirtschaftlichkeit	Materialkosten je Fläche in EUR/m ² : Ungefäherer Arbeitsaufwand je Fläche in h/m ² : Folgekosten (u.a. für Pflege):	

Quelle: eigene Darstellung, Dr. Brill + Partner

Abbildung 4: Seite 3 des Steckbriefformulars für Beschichtungen

Brill+ Partner GmbH Marktrecherche zu FKZ 3719654150 Stand 30.01.20
Hydrotox GmbH **Vergabekriterien Blauer Engel für biozidfreie Antifouling-Systeme** Seite 3

Kriterien	Antwort	Veröffentlichbar?
Entsorgung	Abfallschlüssel	
Verfügbarkeit (Wo kann das Produkt erworben werden?)		

Quelle: eigene Darstellung, Dr. Brill + Partner

Abbildung 5: Seite 1 des Steckbriefformulars für Antifouling-Strategien außer Beschichtungen

Brill+ Partner GmbH Marktrecherche zu FKZ 3719654150 Stand 30.01.20
 Hydrotox GmbH **Vergabekriterien Blauer Engel für biozidfreie Antifouling-Systeme** Seite 4

2 Antifouling-Strategien außer Beschichtungen

Hersteller:

Name des Produktes:

Welcher Technik ist die Alternative zuzurechnen?

- Reinigungsvorrichtungen am Liegeplatz
- Bootswaschanlagen
- Bootshebeanlagen
- Ultraschallanlagen
- Sonstige (bitte beschreiben)

Tabelle 2: Antifoulingstrategie (außer Beschichtungen)

Sofern vorhanden bitte zusätzliche Informationen/Untersuchungen beilegen

Kriterien	Antwort	Veröffentlichbar?
Beschreibung der Alternative		
Anbieter	Firma: Adresse: Kontakt Daten: Ansprechpartner:	
Wirkungsweise der Alternative		
Geeignet für... (Sportboot, Rumpfform, Seekästen,...)		
Einsatzbereich (Meer-, Süß, Brackwasser, Bewuchsdruck)		
Nachweis der Wirksamkeit	Unabhängige Prüfstelle: Ort und Zeitraum d. Auslagerung: Anströmung:	
Auswertungsmethode Wirksamkeitsnachweis		
Anwendung	Vorbereitung: Handhabung: Sonstiges:	

Quelle: eigene Darstellung, Dr. Brill + Partner

Abbildung 6: Seite 2 des Steckbriefformulars für Antifouling-Strategien außer Beschichtungen

Brill+ Partner GmbH Marktrecherche zu FKZ 3719654150 Stand 30.01.20
 Hydrotox GmbH **Vergabekriterien Blauer Engel für biozidfreie Antifouling-Systeme** Seite 5

Kriterien	Antwort	Veröffentlichbar?
Pflege und Wiederholung der Anwendung	Pflege:	
Erfahrungsberichte Bootseigner		
Verwendete Materialien und Stoffe <i>Hinweis: Im Idealfall alle Stoffe mit Gehalten > 1% sowie alle besorgniserregenden Stoffe (z.B. SVHC-Liste nach REACH, Gefährlich nach CLP-Verordnung,...) nennen</i>	(siehe Liste unten)	
Einsatz von Bioziden	Topfkonservierungsmittel (PA 6): Filmkonservierungsmittel (PA 7): Antifoulingmittel (PA 21):	
Ökologie und Umweltschutz	Abrasion bzw. Auswaschung gefährlicher Stoffe: Freisetzung von Nanopartikeln: Freisetzung von Mikroplastik: Bioakkumulationspotential: Sonstiges:	
Gesundheitsschutz (bei der Anwendung)		
Tierschutz (nur Ultraschall?)		
Praktikabilität und Gebrauchstauglichkeit		
Wirtschaftlichkeit	Kosten für Anschaffung: Betriebskosten: Folgekosten:	
Abwasserbehandlung und Entsorgung	Auffanganlage und Abwasserbehandlung Reinigungsanlage Abfallschlüssel:	
Verfügbarkeit (Wo kann das Produkt erworben werden?)		

Abbildung 7: Seite 1 der Tabelle 3: Materialliste

Brill+ Partner GmbH Marktrecherche zu FKZ 3719654150 Stand 30.01.20
 Hydrotox GmbH **Vergabekriterien Blauer Engel für biozidfreie Antifouling-Systeme** Seite 6

Tabelle 3: Materialliste (bitte ankreuzen)

Sofern vorhanden bitte zusätzliche Informationen wie Sicherheitsdatenblätter beilegen

Organische Polymere	X	Konservierungsmittel	X	Lösemittel (Lacke, Kleber)	X
PA: Polyamid		BIT: Benzisothiazolinon		Aceton	
PE: Polyethylen		CIT: Chlormethylisothiazolinon		Ethylacetat	
PES: Polyester		MIT: Methylisothiazolinon		Butylacetat	
PP: Polypropylen		Formaldehyd/-abspalter		Ethanol	
PUR: Polyurethan		IPBC: 3-Jod-2-propinyl-butylcarbammat		Formaldehyd	
PVC: Polyvinylchlorid		Silberchlorid		Isopropanol	
Epoxidharze		BNPD: 2-Brom-2-nitropropan-1,3-diol		Isopropylacetat	
PTFE: Polytetrafluorethylen		NaP: Natriumpyrithion		Spezialbenzin (Kohlenwasserstoffe)	
Silikone/ Polysiloxane		ZMP: Zinkpyrithion		Toluol	
				Xylol	
Sonstige:		Sonstige:		Sonstige:	
PS: Polystyrol MF: Melamin-Formaldehyd-Harz					

Füllstoff und anorganische Komponenten	X	Hilfsstoffe (Weichmacher, Pigmente, Sikkative, Katalysatoren u.a.)	X	Sonstige Materialien	X
Kolophonium (hergestellt aus Baumharz)		Alkylphenoethoxylate		Aluminium	
Anorganische Fasern (u.a. Basalt)		Oxime (Derivate von Aldehyden oder Ketonen mit C=N-OH Struktur)		Edelstahl	
		PFC: Per- und polyfluorierte Chemikalien		Nanopartikel	
		Titandioxid		Stoffe der „SVHC-Liste“ nach REACH-Verordnung: LINK	
		Zinkoxid			

Quelle: eigene Darstellung, Hydrotox

Abbildung 8: Seite 2 der Tabelle 3: Materialliste

Brill+ Partner GmbH Marktrecherche zu FKZ 3719654150 Stand 30.01.20
 Hydrotex GmbH **Vergabekriterien Blauer Engel für biozidfreie Antifouling-Systeme** Seite 7

Füllstoff und anorganische Komponenten	X	Hilfsstoffe (Weichmacher, Pigmente, Sikkative, Katalysatoren u.a.)	X	Sonstige Materialien	X
Sonstige:		Organozinnverbindungen			
		Sonstige:			

Quelle: eigene Darstellung, Hydrotex