

# Bioinspirierte Unterwasserklebstoffe

Klebeverbindungen sind für unser alltägliches Leben heute praktisch essentiell. Ohne sie sind Dinge wie Mobiltelefone, Photovoltaikmodule oder selbst Autos kaum mehr denkbar. Für die Zukunft sagen viele Experten sogar eine Vorherrschaft des Klebens als insgesamt dominierende Füge-technik voraus. Besondere Herausforderungen gibt es heute allerdings immer noch für industrielle Klebeverbindungen in Gegenwart von Wasser bzw. Feuchtigkeit. In biologischen Systemen dagegen treten praktisch alle Haft- und Klebeverbindungen unter derartigen Umgebungsbedingungen auf und zeigen herausragende Eigenschaften. Das erklärt die Bemühungen um die Entwicklung bioinspirierter Unterwasserklebstoffe, die inzwischen auch schon zu Erfolgen geführt haben. Besonders großer Forschungsbedarf besteht hier noch im Bereich der reversiblen Klebesysteme.

Neben der Verwendung im medizinischen Bereich, beispielsweise zum Wundverschluss und zur Gewebsrekonstruktion, können bioinspirierte Unterwasserklebstoffe auch unter Wasser z. B. zum Verkleben an oder von Konstruktionen wie Bauwerken oder Schiffen sowie für Reparaturarbeiten eingesetzt werden. Zur Verbesserung von bioinspirierten Unterwasserklebstoffen muss jedoch weiterhin das Verständnis der Mechanismen von natürlichen, biologischen Unterwasserklebstoffen beständig erweitert werden, auch wenn gerade in den letzten Jahren hier bereits große Fortschritte erzielt wurden.

Aber welche besonderen Herausforderungen stellen sich bei der Entwicklung und Anwendung von bioinspirierten Unterwasserklebstoffen? Beispielsweise ist eine Vorbereitung der zu verklebenden Oberflächen unter Wasser, wie z. B. Reinigung oder Trocknung, wenn überhaupt eher schwierig umzusetzen, trotzdem muss eine robuste Grenzflächenhaftung (also zwischen Klebstoff und Material) gewährleistet werden. Auch die innere Festigkeit des Klebstoffs, die Kohäsion, muss trotz des umgebenden Wassers garantiert werden. Weitere Schwierigkeiten stellen ein zu frühes Verkleben oder zu

starkes Verdünnen des Klebstoffs in der wässrigen Umgebung dar.

Natürliche Lösungen der Unterwasserverklebung, zudem bei andauernden dynamischen und turbulenten Wasserbewegungen, wie z. B. bei den Tiden, sind sehr erfolgreiche Vorbilder, wenn es gilt diesen Herausforderungen zu begegnen. Daher werden die molekularen Mechanismen unterschiedlicher natürlicher Unterwasserklebstoffe verschiedener Organismen (wie z. B. von Muscheln, Köcherfliegenlarven, Rankenfußkrebsen und Sandburgenwürmern) untersucht, wobei sowohl wieder lösbare als auch dauerhafte hochfeste Klebeverbindungen von Interesse sind. Aktuelle bioinspirierte Forschungsansätze für Klebstoffzusammensetzungen basieren zumeist auf dem Molekül 3,4-Dihydroxy-L-phenylalanin, kurz DOPA, oder auf anderen sog. Koazervat-vermittelten Verklebungen. Koazervate sind kleine, kugelförmige Zusammenballungen von Molekülen mit membranartigen Oberflächen, die in stark verdünnten wässrigen Lösungen entstehen können.

DOPA scheint sehr häufig ein Schlüssel-molekül für die Haftung unter Wasser zu sein, wobei dennoch unterschiedliche chemische Bindungen eine Rolle spielen. Viele Forschungsansätze konzentrieren sich daher auf Proteine oder andere Polymere, die entweder DOPA oder DOPA-analoge Verbindungen enthalten. Häufig handelt es sich dabei um rein chemisch hergestellte Polymere, wie z. B. Hydrogele, die ähnliche chemische Strukturelemente beinhalten. Derzeit werden aber insbesondere auch biotechnologische Methoden verwendet, um solche Klebeproteine von Wasserlebewesen herstellen zu lassen. Solche Methoden (inkl. solchen aus der Synthetischen Biologie) erlauben zudem Modifikationen, die kleinere Strukturänderungen in den Klebeproteinen bewirken und somit das Kleben verbessern können oder zusätzliche Eigenschaften ermöglichen. Dies könnten z. B. eine höhere Toleranz der Klebeverbindung gegenüber zerstörenden Einflüssen oder selbstheilende Eigenschaften sein.

Neben den bisher genannten sind auch, wie eingangs erwähnt, reversible bioinspirierte Unterwasserklebstoffe von Interesse. Dazu können beispielsweise speziell modifizierte DOPA-Moleküle oder geckoähnliche Strukturen auf Silikonbasis verwendet werden. Die Hafteigenschaften dieser Stoffe können z. B. über Temperaturänderungen gesteuert werden, was unter anderem für ein kontrolliertes Absetzen bzw. Aufnehmen von Objekten oder eine kontrollierte Fortbewegung kleiner Roboter im Wasser genutzt werden könnte.

Insgesamt weist das Feld der bioinspirierten Unterwasserkleb- und Haftstoffe ein hohes Potenzial auf. Viele der natürlichen, in biologischen Organismen vorkommenden Proteinsequenzen der Unterwasserklebstoffe wurden mittlerweile aufgeklärt. Auch das Verständnis der Struktur-Funktionsbeziehungen dieser Moleküle sowie die Langzeitstabilität der Stoffe wurde weiter verbessert. Auch weitere Erkenntnisse in Bezug auf die Sekretionskontrolle, die ein zu frühes Verkleben oder zu starkes Verdünnen des Klebstoffs in der wässrigen Umgebung verhindern, sowie zur Langzeitstabilität konnten erlangt werden. Zukünftige Arbeiten werden weiterhin versuchen bereits erfolgreich hergestellte DOPA- und Koazervat-vermittelte Klebstoffe zu verbessern. Zudem ist es auch denkbar mit Hilfe von Methoden der Synthetischen Biologie gänzlich neue Unterwasserklebstoffe zu entwickeln, deren Haftungsprinzip auf wichtige Charakteristika solcher biologischer Adhäsive zurückzuführen ist. Im Bereich der reversiblen Unterwasserklebstoffe besteht noch weitaus größerer Forschungsbedarf und es werden noch verschiedene Prinzipien auf ihre generelle Tauglichkeit hin überprüft. Teilweise könnten auch im Trockenen funktionierende Haftmechanismen für den Einsatz unter Wasser adaptiert werden, wie beispielsweise geckoähnliche Fußstrukturen oder Formgedächtnismaterialien. Erste erfolgversprechende Ansätze konnten jedoch auch in diesem Anwendungsfeld bereits identifiziert werden.

**Dr. Diana Freudendahl**