



Spinnen – Spezialistinnen und Vorbilder in Sachen Kleben

Kleber werden in der Technik zur Realisierung vieler Verbindungen genutzt. Dabei stellen nicht nur die unterschiedlichsten Materialien Herausforderungen dar, die miteinander verbunden werden sollen, sondern auch die äußeren Randbedingungen, unter denen die Klebung durchgeführt bzw. stabil sein soll. Radnetzspinnen nutzen Klebstoffe, um mit ihren Fangfäden Beute zu machen. Sie verwenden wasserbasierte, bioabbaubare Klebstoffe, die unter verschiedensten klimatischen Bedingungen funktionieren müssen, wenn die Spinne ihren Nahrungserwerb sicherstellen will.

Harald Binder

Einleitung

Die Kombinationen verschiedenster Eigenschaften von Spinnenseiden rufen bei Chemikern staunende Bewunderung hervor. Spinnen sind fähig, mehrere Seiden mit unterschiedlichen Qualitätsmerkmalen zu produzieren und diese dann für unterschiedlichste Zwecke einzusetzen. Angesichts dieser faszinierenden Naturstoffe, die die achtbeinigen Seidenkünstler herstellen, versuchen Naturwissenschaftler deren molekularen Aufbau zu erfassen, um so die Zusammenhänge zwischen Struktur und Funktionalität besser zu verstehen. Dies könnte neue Ansätze zur Lösung technischer Probleme eröffnen. In jüngerer Zeit wurde in einigen Arbeiten das Adhäsionsvermögen (Klebekraft) von Spinnenseide unter verschiedenen Bedingungen untersucht. Diese Eigenschaft ist für Spinnen wichtig, wenn sie

ihre Fäden an irgendwelchen Oberflächen fixieren wollen, z. B. um sich abzuseilen oder ihre Netze aufzuspannen. Radnetzspinnen (Araneidae) müssen sicherstellen, dass die in ihren Netzen gefangene Beute so lange zurückgehalten wird, bis sie von der Spinne überwältigt werden kann. Zum Zurückhalten der Beute wenden Spinnen zwei unterschiedliche Prinzipien an (vgl. Abb. 2).

Fangfäden von Radnetzspinnen

Die cribellaten Spinnen besitzen eine siebartige Platte (Cribellum) vor den Spinnwarzen am Hinterleibsende. Im Cribellum endet eine Vielzahl von Spinnndrüsen, durch die die Spinne sehr dünne Seidenfäden (Durchmesser ca. 20 nm)¹, eine Art Kräuselwolke, produzieren kann. Diese

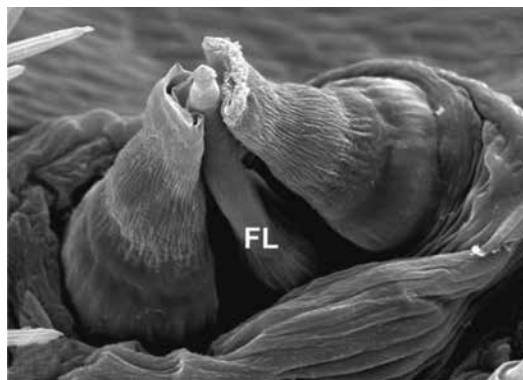
Abb. 1 Schilfradspinne (*Larinioides cornutus*) in ihrem Schlupfwinkel, einem nach unten offenen ballonartigen Gespinnst, in dem sie sich typischerweise tagsüber unmittelbar an ihrem Netz aufhält. (Foto: Winfried BORLINGHAUS, mit freundlicher Genehmigung)



Abb. 2 Zwei Radnetze mit unterschiedlichen Fangfäden zum Beutefang. Ein Radnetz mit klebrigen Fangfäden, das von einer cribellaten Spinne erstellt wurde (links), und zum Vergleich ein Netz mit Fangfäden, die mit einer Kräuselwolle belegt sind (rechts). Die Erbauerin dieses Netzes weist als Körpermerkmale Cribellum und Calamistrum auf. (Aus BLACKLEDGE et al. 2009; mit freundlicher Erlaubnis)

legt sie mit einer kammartigen Struktur, dem Calamistrum, das sich am zweitletzten Glied (Metatarsus) der Hinterbeine befindet, auf die spiralförmig angeordneten Fangfäden ihres Netzes. Diese filzartige Kräuselwolle behindert die Beweglichkeit der erbeuteten Tiere und schränkt damit auch deren Befreiungsversuche aus dem Netz ein; die Beute wird so lange fixiert, bis sie von der herbeieilenden Spinne überwältigt werden kann (SAHNI et al. 2011). Diese eher mechanische Fixierung der Beute im Spinnennetz kann die Erbauerin realisieren, weil sie verschiedene, sehr spezifische Körpermerkmale (Cribellum, Calamistrum) aufweist. Diese kann sie durch komplexe Koordination zum Beutefang nutzen. Ecribellate Spinnen (ohne Cribellum) beschichten die Fangfäden mit wasserhaltigen, adhäsiven* Stoffgemischen. Diese Klebefäden von Radnetzspinnen (Araneioidea) werden durch dreiteilige Spinnspulen gefertigt. Dabei befindet sich zentral der Ausgang der flagelliformen Drüse,

Abb. 3 Elektronenmikroskopische Aufnahme einer dreiteiligen Spinnspule, mit der Radnetzspinnen ihre Fangfäden erzeugen. Zentral ist die flagelliforme Drüse (FL) zu sehen, die den seidenen Fangfaden liefert. Diese wird je halbkreisförmig von zwei Drüsen umgeben, die den Faden zunächst gleichmäßig mit der wässrigen Klebstofflösung beschichten. (Aus BLACKLEDGE et al. 2009; mit freundlicher Erlaubnis)



Glossar

Adhäsion: Haftwirkung zweier Stoffe an deren Grenzfläche

Kohäsion: innerer Zusammenhalt eines Stoffes

Viskosität: Zähigkeit bzw. Fließfähigkeit von Stoffen

in der die Seide für den Tragefaden der Fangspiralen produziert wird. Dieser Drüsenausgang ist von zwei Ausgängen der zusammengesetzten („aggregate“) Drüse halbkreisförmig umgeben (Abb. 3). Daraus bringt die Spinne einen komplex zusammengesetzten Kleber hervor, mit dem der Tragefaden zunächst gleichmäßig umhüllt wird. Aufgrund der wirkenden Kapillarkräfte ist diese gleichmäßige Umhüllung jedoch instabil (Plauteau-Rayleigh-Instabilität) und wandelt sich in eine Struktur um, bei der „Perlen“ aus Klebetropfchen in einem regelmäßigen Abstand auf einem Faden aufgereiht sind (Abb. 4).

Beschichtete Spinnenseide zum Beutefang

Todd A. BLACKLEDGE (Universität von Akron, Ohio, USA) untersucht seit vielen Jahren Spinnen und ihre verschiedenen Seidenprodukte. In Zusammenarbeit mit Kollegen hat er grundlegende Beiträge zum Verständnis der Klebefäden von Radnetzspinnen veröffentlicht. Analysen des wässrigen Überzugs der Fangfäden haben ergeben, dass die daraus gebildeten Tröpfchen eine komplexe Zusammensetzung aufweisen. Die Klebewirkung wird vor allem Glykoproteinen zugeschrieben, die sich mikroskopischen Untersuchungen zufolge im Zentrum der Tröpfchen befinden, in unmittelbarer Nähe des eigentlichen Spinnfadens. Die wässrige Hülle des Klebetropfchens enthält verschiedene Komponenten mit geringem Molekulargewicht, die oft unter dem Begriff „low molecular mass components“ (LMMC) zusammengefasst werden. Darunter finden sich Aminosäuren wie Glycin, Alanin und Prolin sowie einige niedermolekulare Neurotransmitter. Viele dieser Stoffe sind hygroskopisch (gr.: *hygros* = feucht, *nass* und *skopein* = anschauen), das heißt, sie binden Feuchtigkeit aus der Umgebung.

Die Zusammensetzung der LMMC unterscheidet sich bei verschiedenen Arten von Radnetzspinnen und weist einen Zusammenhang mit ihrem Lebensraum auf. Je nachdem, ob die Spinne am Waldrand, mitten im (tropischen) Wald oder auf offenem Feld lebt, ob sie tag- oder nachtaktiv ist, finden sich spezifisch unterschiedlich zusammengesetzte LMMC. Bei Laboruntersuchungen von Fangfäden kann man beobachten, dass die Klebetropfchen abhängig von der Luftfeuchtigkeit an Größe zu- oder abnehmen, d.h. bei steigender Luftfeuchtigkeit werden die Klebetropfchen aufgrund der hygroskopischen Wirkung der LMMC größer. Die komplexe chemische Zusammensetzung der wässrigen Lösung, mit der Spinnen ihre Fangfäden präparieren, ist in hohem Maße zweckdienlich: Der Wassergehalt

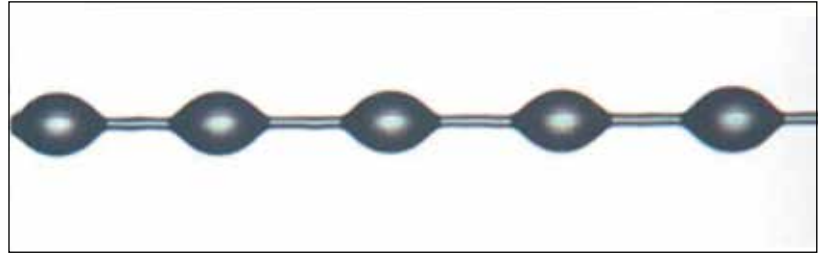
Durch den regelmäßigen Verzehr der Fangfäden stellen die Spinnen quasi nebenbei ihre Wasserversorgung sicher.

beeinflusst die Elastizität des Fangfadens und auch die Adhäsion*, Dehnbarkeit und Kohäsion* der Klebetröpfchen.

Allgemein zeigen die Untersuchungen von OPELL et al. (2018) folgende Zusammenhänge auf: Bei zunehmender Luftfeuchtigkeit nimmt die Viskosität* ab, die Verformbarkeit nimmt zu, was z.B. bedeutet, dass bei steigendem Wassergehalt die Kontaktfläche der Klebetröpfchen mit Oberflächenstrukturen einer Beute vergrößert wird. Die Klebekraft (Adhäsion) weist bei einem bestimmten Feuchtigkeitsgrad ein Maximum auf und fällt dann wieder ab. Die hygroskopischen Eigenschaften der Beschichtung der Fangfäden von cribellaten Radnetzspinnen stellen sicher, dass die Erbauerinnen zuverlässig mit Wasser versorgt werden. Wenn sie die Fangfäden regelmäßig auffressen und damit die physiologisch „teuren“ Proteine und Kohlenhydrate als Nährstoffe aufnehmen, diese verstoffwechseln und so einer Wiederverwertung zuführen, ist quasi nebenbei ihre Wasserversorgung sichergestellt.

Schwierige Beute – spezielle Lösung

DIAZ et al. (2018) haben Klebefäden von Radnetzspinnen untersucht, die sich in ihrem Beutespektrum auf Falter konzentriert haben. Schmetterlinge stellen insofern besondere Herausforderungen an die Adhäsions-Fangnetze der Jägerinnen dar, als die Schuppen der großflächigen Flügel leicht abgelöst werden können. Dies ermöglicht der zunächst gefangenen Beute das Entkommen, die Schuppen kontaminieren die Klebetröpfchen und reduzieren damit die Wirksamkeit des Fangnetzes. In der großen Familie der echten Radnetzspinnen (Araneidae) sind die Vertreter der Gattung *Cyrtarachne* auf Falter als Beute spezialisiert. Die Klebetröpfchen an ihren Fangfäden sind im Vergleich zu anderen cribellaten Spinnen auffallend groß, und die Adhäsion von *Cyrtarachne*-Fangfäden auf einer Glasoberfläche ist stärker als die von anderen Spinnen. Der entscheidende Effekt scheint jedoch nicht in der Klebekraft zu liegen. Die frisch produzierten Klebetröpfchen an den Fangfäden von *Cyrtarachne* weisen einen hohen Wasseranteil von 99,8 Vol% auf, während diejenigen anderer Radnetzspinnen einen Wassergehalt von 69 Vol% und weniger aufweisen. Der hohe Wassergehalt bewirkt eine sehr geringe Viskosität, die es erlaubt, dass das Klebetröpfchen bei Kontakt mit den schuppenbedeckten



Schmetterlingsflügeln deren Oberfläche sehr schnell und großflächig benetzt, einschließlich des Raums zwischen den einzelnen Schuppen.

Erste Untersuchungen der niedermolekularen Komponenten (LMMC) in den Adhäsions-tröpfchen von *Cyrtarachne* zeigen einige Komponenten, die in den bisher untersuchten Klebetröpfchen anderer Radnetzspinnen (von 14 Arten aus 3 Familien) nicht gefunden wurden. Die Identifikation der Substanzen steht noch aus. DIAZ et al. vermuten jedoch, dass sie einen maßgeblichen Einfluss auf die besonderen Eigenschaften der Klebetröpfchen haben und damit auf die besondere Spezialisierung der *Cyrtarachne* auf Schmetterlinge als Beute.

Abb. 4 Unmittelbar nachdem der Fangfaden produziert wurde, bildet sich aus dem zunächst gleichmäßigen Überzug eine Reihe von Tröpfchen, die wie auf einem Faden aufgezogene Perlen erscheinen. (Aus BLACKLEDGE et al. 2009; mit freundlicher Erlaubnis)

Kleben unter erschwerten Bedingungen

Die Herausforderung für Klebstoffe unter sehr feuchten Bedingungen wurde in einer weiteren Veröffentlichung thematisiert. Viele synthetische Kleber verlieren ihre Wirkung, wenn die zu klebende Oberfläche ab einer kritischen Feuchtigkeit mit einem Wasserfilm bedeckt ist. Selbst bei den Klebefäden von Spinnen, die typischerweise in klimatisch vergleichsweise trockenen Lebensräumen jagen, verlieren eher die einzelnen Klebetröpfchen den Zusammenhalt (Kohäsion), als dass sich das Klebetröpfchen von der Chitinoberfläche des Beuteinsekts lösen würde (Adhäsion). Bisherige Untersuchungen hatten gezeigt, dass vor allem zwei mit Zuckern modifizierte Proteine (Glykoproteine) für die Adhäsion von Bedeutung sind. In der Abfolge der Aminosäuren des einen Glykoproteins finden sich Abschnitte (Domänen), die an Chitin binden und einen hohen Anteil an geladenen Aminosäuren aufweisen. Die zweite Glykoproteinkomponente ist der flagelliformen Spinnenseide ähnlich und für die Dehnbarkeit und die Flexibilität der Klebetröpfchen verantwortlich.

SINGLA et al. (2018) haben Fangspiralfäden der Schilfradspinne (*Larinioides cornutus*) mit speziellen spektroskopischen Methoden bei unterschiedlicher Feuchtigkeit untersucht. Der Lebensraum der Schilfradspinne sind feuchte offene Flächen im Uferbereich von Gewässern; *L. cornutus* ist eine auch in Deutschland häufig

Genetische Einsichten zu den Klebstoffen

Um die Klebstoffe, die Spinnen an ihren Fangfäden verwenden, und ihre genaue Funktionsweise besser zu verstehen, wäre es ein großer Fortschritt, die Struktur der beteiligten Proteine genauer zu kennen. Dem steht bisher entgegen, dass die Gene der als Spidroine bezeichneten Eiweißketten mit etablierten Sequenzierungsmethoden nicht vollständig und zuverlässig zu bestimmen sind. Das hängt damit zusammen, dass die Spidroine sehr lang und aus vielen sich wiederholenden Sequenzabschnitten zusammengesetzt sind. Dabei sind die sich wiederholenden Abschnitte länger als die Abschnitte, die typischerweise von Sequenzierungsautomaten gelesen werden. STELLWAGEN & RENBERG (2019) haben jüngst durch Kombination verschiedener Sequenzierungstechniken erstmals Spidroine (AgSp1 und AgSp2) der gebänderten Tigerspinne (*Agriope trifasciata*), einer Radnetzspinne, zuverlässig bestimmt. Dabei benutzten sie neben etablierten Sequenzierungsmethoden, mit denen sich kurze Sequenzbereiche zuverlässig bestimmen lassen, auch fehleranfälligeren Methoden, mit denen sehr lange Abschnitte gelesen werden können, und kombinierten die Resultate. STELLWAGEN & RENBERG erhielten dadurch für AgSp1 eine DNA-Sequenz aus 42 270 Basenpaaren (bp). Die daraus abgeleitete Aminosäuresequenz ergibt Bereiche mit zwei unterscheidbaren Mustern (Motive), die jeweils 40-mal wiederholt in

dem Spidroin vorkommen. Für AgSp2 ergab die Untersuchung ein Gen mit 20 526 bp, wobei ein Motiv, das einem der beiden in AgSp1 gefundenen ähnlich ist, 48-mal wiederholt wird. Die sich wiederholenden Motive sind von Abschnitten unterbrochen, die reich an Glutamin sind. Mit diesen Untersuchungen haben STELLWAGEN & RENBERG die bisher umfangreichsten Spidroin-Sequenzen bestimmt und gleichzeitig einen Zugang eröffnet, den Zusammenhang zwischen Proteinstruktur und ihren physikalischen Eigenschaften besser zu verstehen.

Erste Schritte dazu unternehmen die beiden Autorinnen, indem sie Strukturdaten der Klebproteine von Spinnen miteinander vergleichen, die mit Radnetzen Beute jagen, und solchen, die Haubennetze bauen und nutzen. STELLWAGEN & RENBERG gehen dabei davon aus, dass die Klebstoffe folgende Eigenschaften erfüllen müssen: Adhäsion, um die Beutetiere durch Kleben festzuhalten (1), Dehnbarkeit, um die sich wehrende Beute am Netz halten zu können (2), und Elastizität, um die Beute nach der ursprünglichen Dehnung am Fangfaden zu halten (3). Klebproteine von Radnetzen sollten tendenziell im Vergleich zu denen von Haubennetzen eine größere Klebkraft sowie eine höhere Dehnbarkeit aufweisen, da die Beute mit höherer Energie in das Netz fliegt als die typischerweise am Boden laufende Beute der Spinnen, die mit Haubennetz jagen.

Die unterschiedliche Dehnbarkeit wurde auch bereits in Laboruntersuchungen demonstriert, hier sollte nach molekularen Strukturdaten gesucht werden, die diese Eigenschaften verständlich machen.

Die molekularbiologischen Daten ergeben tatsächlich Hinweise darauf, dass sich die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften durch Merkmale in der Proteinstruktur nachvollziehen lassen. So könnten z. B. Unterschiede im Gehalt an den Aminosäuren Serin und Threonin den Unterschied im Ausmaß der Verknüpfung mit Zuckerketten (Glykosylierung) und damit die unterschiedliche Klebkraft erklären. Abschnitte von Aminosäuren, die in anderen Proteinen von Spinnenseiden mit deren Dehnbarkeit in Verbindung gebracht worden sind, finden sich auch in Klebproteinen und passen zu den experimentellen physikalischen Befunden. Damit haben STELLWAGEN & RENBERG (2018) einen wichtigen Impuls gegeben und Wege aufgezeigt, über die ein tieferes Verständnis über den molekularen Aufbau von Glykoproteinen in Spinnenseiden und ihren hoch spezifischen Eigenschaften zugänglich wird. Die Autorinnen äußern die Hoffnung, dass durch den Fortschritt in den Sequenzierungstechniken der Zugang zu molekularen Strukturdaten immer besser wird. Sie erhoffen sich dadurch ein wachsendes Verständnis der besonderen Eigenschaften von Spinnenseide, das vielleicht auch in eine technische Nutzung münden könnte.

vorkommende Spinne (Abb. 1). Die Autoren wählten die Fangfäden dieser Spinne, weil die daran befindlichen Klebetröpfchen bei mittlerer Feuchtigkeit maximale Klebkraft (Adhäsion) zeigen. Bei hoher Feuchtigkeit jedoch reißen die Tröpfchen unter Beanspruchung, d. h. die Kohäsion ist nicht ausreichend. Für die Untersuchungen wurden Fangfäden auf eine Saphiroberfläche gelegt und für spektroskopische Untersuchungen so montiert, dass die Feuchtigkeit verändert werden konnte. In den spektroskopischen Untersuchungen wurden natürliche Fangfäden mit solchen verglichen, die gründlich mit Wasser gewaschen worden waren. Durch den Waschprozess werden die niedermolekularen Komponenten (LMMC) entfernt, die für die Anziehung von Feuchtigkeit bzw. ihrer Verteilung im Seidenmaterial verantwortlich sind.

Zunächst bestätigten die Messungen, dass an der Kontaktfläche Fangfaden/Saphir die Glykoproteine vorliegen, welche die Adhäsion bewirken. Überraschenderweise konnten SINGLA et al. aber auch bei hoher Feuchtigkeit spektroskopisch kein freies Wasser an der Kontaktfläche Fangfaden/Saphir nachweisen. Bei zunehmender Feuchtigkeit steigt der Wassergehalt im Innern der Klebetröpfchen, aber freies

Wasser findet sich nicht an der Grenzfläche. Mit wechselndem Wassergehalt geht eine reversible Veränderung der Proteinstruktur (α -Helix und β -Faltblattstrukturen) einher. SINGLA et al. (2018) bestätigen also mit ihrer Untersuchung, dass die Adhäsion vor allem durch Glykoproteine verursacht wird. Darüber hinaus zeigen sie, dass die LMMC nicht nur für genügend Wasser sorgen, um die Glykoproteine mobil und flexibel zu halten, sondern auch dazu beizutragen scheinen, dass Wasser ins Innere des Klebetröpfchens verlagert wird und nicht an der Klebefläche die Wirkung des Fangfadens beeinträchtigt. Bei einer relativen Feuchtigkeit von 90 % beträgt der Wassergehalt der Klebetröpfchen zwar 50 %, aber an der Kontaktfläche, also der Klebefläche, ist Wasser nicht nachweisbar. Wäre Wasser an der zu klebenden Oberfläche gebunden, würde das die Adhäsion der Klebetröpfchen reduzieren, d. h. die Klebkraft der Fangfäden geht verloren und die Beute der Spinne wäre wieder frei; das wird aber nicht beobachtet. Die LMMC stellen also sicher, dass die Klebetröpfchen der Fangfäden von Spinnen auch unter feuchten Bedingungen an der Chitinoberfläche der Beuteinsekten kleben und diese Wirkung nicht durch freies Wasser zunichte gemacht wird. Das

Durch die chemische Zusammensetzung der Spinnenseide wird das den Klebevorgang störende Wasser im Inneren der Klebtröpfchen verteilt, so dass es beim Kleben nicht stört.

Wasser wird von der Oberfläche entfernt und im Innern des Tröpfchens verteilt. Somit scheint die komplexe Zusammensetzung der Fangfäden von Spinnen sehr spezifisch und für die Lösung von Klebproblemen bei wechselnder Feuchtigkeit nahezu optimiert zu sein. Möglicherweise ist sie sogar jeweils an die verschiedenen Lebensräume angepasst, was allerdings durch weitere Studien noch konkret nachzuweisen ist.

Zusammenfassung und Fazit

Die hier vorgestellten Untersuchungen an Fangfäden von Spinnen ermöglichen Einblicke in den Zusammenhang zwischen den chemisch komplexen Stoffgemischen und der Klebewirkung, die die Seidenkünstlerinnen nutzen, um ihre Beute im Spinnennetz ausreichend lange festzuhalten. Dabei muss die Klebewirkung (Adhäsion) an Oberflächenstrukturen der Beute unter wechselnden Wetterbedingungen sichergestellt sein. Gleichzeitig muss der innere Zusammenhalt (Kohäsion) der Klebermasse in Kombination mit dem Fangfaden gewährleistet sein, da sonst die Beutetiere bei ihren Befreiungsversuchen erfolgreich sind und wieder entkommen. Bei alledem muss das gesamte System eine Elastizität aufweisen, die den heftigen Bewegungen der Beute standhält und diese am Netz zunehmend fixieren. Es muss also eine ganze Reihe von Faktoren berücksichtigt werden und diese müssen aufeinander abgestimmt sein.

Das Klebesystem von Radnetzspinnen ist so attraktiv, dass große Anstrengungen unternommen werden, es zunehmend besser zu verstehen und durch Nachahmung Lösungen für anspruchsvolle technische Klebprobleme zu finden. Dabei nutzen die Spinnen wasserbasierten und bioabbaubaren Kleber.

Im Blick auf die bisherigen Erkenntnisse über die komplexe Zusammensetzung der

Spinnenkleber stellen sich Fragen nach dem Ursprung, der Abstimmung und der Optimierung ihrer Rezeptur. Befunde, die eine einfache Rohversion repräsentieren könnten, sind bisher unbekannt; ganz abgesehen davon, dass eine solche für den Bestand der Spinnen bedrohlich wäre. Festzuhalten bleibt beim derzeitigen Kenntnisstand, dass ein natürlicher Ursprung der Kleberrezeptur nicht erkennbar ist. Bemerkenswert ist, dass die Komposition der Bestandteile des Spinnenklebers in den unterschiedlichen Lebensräumen die Hoffnung nährt, dass weitere Einsichten zur Verbesserung von Klebern für technische Anwendungen führen könnten. Das würde auch zu Vorstellungen passen, dass die Zusammensetzung der Kleber an den Fangfäden von Spinnen hinsichtlich ihrer Funktion beabsichtigt ist.

Anmerkung

- ¹ Das ist eine erstaunliche „technische“ Leistung, wenn man sich daran erinnert, dass der DNA-Doppelstrang eine Breite von 2 nm aufweist; diese Seidenfäden sind also nur um Faktor 10 breiter als dieses Biopolymer.

Literatur

- BLACKLEDGE TA, SCHARFF N, CODDINGTON J, SZÜTS T, WENZEL JW, HAYASHI CY & AGNARSSON I (2009) Spider web evolution and diversification. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 106, 5229–5234.
- DIAZ C, TANIKAWA A, MIYASHITA T, AMARPURI G, JAIN D, DHINOJWALA A & BLACKLEDGE TA (2018) Supersaturation with water explains the unusual adhesion of aggregate glue in the webs of the moth-specialist spider *Cyrtarachne airai*. *R. Soc. Open sci.* 5, 181296; <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.181296>
- OPELL BD, JAIN D, DHINOJWALA & BLACKLEDGE TA (2018) Tuning orb spider glycoprotein glue performance to humidity. *J. Biol. Exp.* 221; doi:10.1242/jeb.161539
- SAHNI V, BLACKLEDGE TA & DHINOJWALA A (2011) A review on spider silk adhesion. *J. Adhesion* 87, 595–614.
- SINGLA S, AMARPURI G, DHOPATKAR N, BLACKLEDGE TA & DHINOJWALA A (2018) Hygroscopic compounds in a spider aggregate glue remove interfacial water to maintain adhesion in humid conditions. *Nature Commun.* DOI: 10.1038/s41467-018-04263-z
- STELLWAGEN SD & RENBERG RL (2019) Towards spider glue: long read scaffolding for extreme length and repetitive silk family genes AgSp1 and AgSp2 with insights into functional adaptations. *G3-Genes Genomes Genetics* 9, 1909–1919.