

Gymnasium Leonhard Basel – Maturaarbeit

Die Spinnenseide im Radnetz

Alexander Widmer 5a

Betreuende Lehrperson: Armin Kaspar

Koreferent: Marc Schumann

Abgabe: 2019



Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	1
2	Einleitung.....	2
3	Struktur und Eigenschaften von Spinnenseide	3
3.1	Aufbau der Spinnenseide	3
3.2	Eigenschaften der Spinnenseide	4
3.3	Verwendung im Netzbau.....	5
4	Das Radnetz.....	6
4.1	Struktur des Radnetzes.....	6
4.2	Klebrigkeit des Netzes	8
4.3	Spezielle Formen des Radnetzes	10
4.3.1	Stabilimente	12
4.3.2	Dreidimensionales Radnetz.....	14
4.4	Der Bau des Radnetzes	15
4.4.1	Rahmen- und Speichenbau	15
4.4.2	Die Hilfsspirale.....	17
4.4.3	Die Fangspirale	18
4.5	Auswirkungen des Geschlechts beim Netzbau.....	19
4.6	Aufgaben und Gliederung eines Radnetzes	19
4.7	Reparatur zerstörter Spinnennetze.....	21
4.8	Wieso klebt die Spinne nicht im Netz?.....	21
4.9	Die Evolution des Radnetzes	22
5	Der Plan vom Netzbau.....	24
6	Netzbau unter Drogeneinfluss	26
7	Industrielle Spinnenseide	28
8	Eigene Forschung	29
9	Interview mit Rainer F. Foelix.....	32
10	Fazit	35
11	Schlusswort	36
12	Literaturverzeichnis.....	37
12.1	Bücher & Artikel.....	37
12.2	Internetquellen	37
13	Abbildungsverzeichnis.....	38

1 Vorwort

Schon als kleiner Junge verspürte ich eine grosse Faszination für die Tierwelt. Sehr gerne sah ich mir Dokumentarfilme über die Lebensweise und den Lebensraum verschiedenster Tierarten an. In meiner Freizeit ging ich oft mit meinen Grosseltern in den Zoo Basel und bewunderte die dort fassbare Natur und die bunte Tierwelt. Mit sieben Jahren verliess ich für drei Monate die Primarschule, um mit meiner Familie nach Australien und Neuseeland zu reisen. Dort hatte ich das Privileg, fast täglich mit exotischen, mir teilweise unbekannten Tieren in Kontakt zu treten. Ich schnorchelte über dem Korallenriff und schwamm mit den Meeresschildkröten, bewunderte einen Pottwal beim Auftauchen, fürchtete mich vor den Zähnen der Krokodile und interessierte mich für die giftigen Schlangen und Spinnen in den Terrarien. Die Attraktion der Spinnen fühlte ich erstmals in einem australischen Zoo, wo ich die tödliche Sydney-Trichternetzspinne hinter einer Glasabdeckung bestaunte. Ihre grossen Fangzähne und der athletische Körper zogen mich sogleich gruselig in ihren Bann. Nun schreibe ich eine Maturaarbeit über eines meiner Lieblingsthemen und freue mich, meine Faszination für die Spinnen und deren raffinierten Netze damit teilen zu können.

Ich bedanke mich bei Thilo Glatzel des Departement Physik der Uni Basel, der mich bei der Themenfindung unterstützte und mir ein Praktikum im Nano Imaging Lab ermöglichte. Des Weiteren bedanke ich mich herzlich bei Eva Bieler, Monica Schönenberger und Susanne Erpel, die mich während dieses Praktikums fachkundig betreuten. Auch dem berühmten Spinnenforscher und Autor Rainer F. Foelix möchte ich recht herzlich für seine Mitwirkung beim Interview zum Arbeitsthema danken. Sein umfangreiches Wissen und seine detaillierten Schilderungen in der Literatur inspirierten und begleiteten mich beim Verfassen der vorliegenden Arbeit.

2 Einleitung

Spinnenseide ist ein biologisches Wundermaterial, das sowohl eine hohe Elastizität als auch eine starke Reissfestigkeit aufweist. In meiner Arbeit gehe ich auf die spezifischen Eigenschaften von Spinnenseide sowie deren Aufbau und Anwendung in der Industrie ein. Auch befasse ich mich detailliert mit dem Radnetz, erkläre dessen Aufbau und beschreibe die Variationen in Form und Funktion. In einem weiteren Teil meiner Arbeit berichte ich über mein zweiwöchiges Schülerpraktikum am Departement Physik der Uni Basel, wo ich Spinnenseide unter dem Rasterelektronenmikroskop und dem Rasterkraftmikroskop untersucht habe und viele interessante Bilder aufnehmen konnte. Der letzte Abschnitt enthält ein Interview mit dem Spinnenforscher Rainer F. Foelix, den ich zu meinen Bildern befragen durfte.

Obwohl Spinnenseide und die daraus bestehenden Netze weit verbreitet und überall zu finden sind, kennen nur wenige Personen deren Vielfalt in Form, Funktion und Aufbau. Als kleiner Aufklärungsbeitrag möchte ich mit meiner Maturaarbeit die faszinierenden Details und Eigenschaften von Radnetzen und Spinnenfäden in ihrer gesamten Schönheit präsentieren und so die Sichtweise der Leserinnen und Leser etwas verändern beziehungsweise ein wenig bunter gestalten.

Bevor ich über Spinnenseide und Spinnennetze schreibe, werfe ich einen Blick auf deren kreative Schöpferinnen und Schöpfer. Webspinnen (*Araneae*), umgangssprachlich auch Spinnen, gehören zusammen mit Skorpionen, Milben und Weberknechten zu den Spinnentieren (*Arachnida*). Bekannt sind sie nicht nur für ihre Fäden, sondern auch für die acht Beine, den zweiseitigen Körper und die vielen Augen, deren Anzahl von Art zu Art variiert. Webspinnen werden in zwei Unterordnungen und von da aus wiederum in über hundert Familien aufgeteilt. Momentan sind rund 40'000 Arten bekannt, was laut Spezialisten nur ein Viertel aller Spinnenarten der Erde ausmacht.¹

Die grosse Artenanzahl bringt auch unzählige Netztypen mit sich. Um meine Arbeit in einer angemessenen Länge zu halten, gehe ich daher ausschliesslich auf das Radnetz und dessen verschiedene Erscheinungsformen ein. Netzformen, wie beispielsweise das Trichternetz oder unregelmässige Raumnetze, werden in meiner Arbeit nicht näher beschrieben, sondern höchstens kurz erwähnt. Des Weiteren schreibe ich meine Arbeit für die allgemeine Leserin oder den allgemeinen Leser, sprich komplexe chemische oder nanobiologische Vorgänge werden vereinfacht dargestellt und nur grob erläutert.

¹ Dalton, Stephen: Spinnen. Die erfolgreichen Jäger. Bern 2009. S. 22.

3 Struktur und Eigenschaften von Spinnenseide

3.1 Aufbau der Spinnenseide

Die Spinnenfäden entstehen aus einer Flüssigkeit in den Spinndrüsen der Webspinnen (*Araneae*). Jede Spinne besitzt mehrere dieser Drüsen, wobei die genaue Anzahl zwischen den verschiedenen Familien und Arten der Webspinnen variiert. So haben Laufspinnen beispielsweise drei bis vier Drüsen und Radnetzspinnen sogar sieben bis acht, die jeweils für die Produktion eines spezifischen Fadentyps zuständig sind (Abb. 1). Untersucht man die aus den Drüsen hervorgehenden Fäden chemisch, so lässt sich erkennen, dass sie aus Proteinen, genauer gesagt aus Fibroinen, bestehen.² Bei der gelagerten Flüssigkeit handelt es sich also um ein Proteingemisch, welches die Spinndrüsen mithilfe der sogenannten Spinnwarzen (Ausstülpungen am Hinterleib) zu einem festen, stabilen Faden umwandeln. Der Übergang der wasserlöslichen Flüssigkeit zu einem festen Faden ist noch immer ein Rätsel, das nicht vollständig gelöst ist. Offenbar werden Moleküle von einer löslichen Form in eine unlösliche umorientiert.³

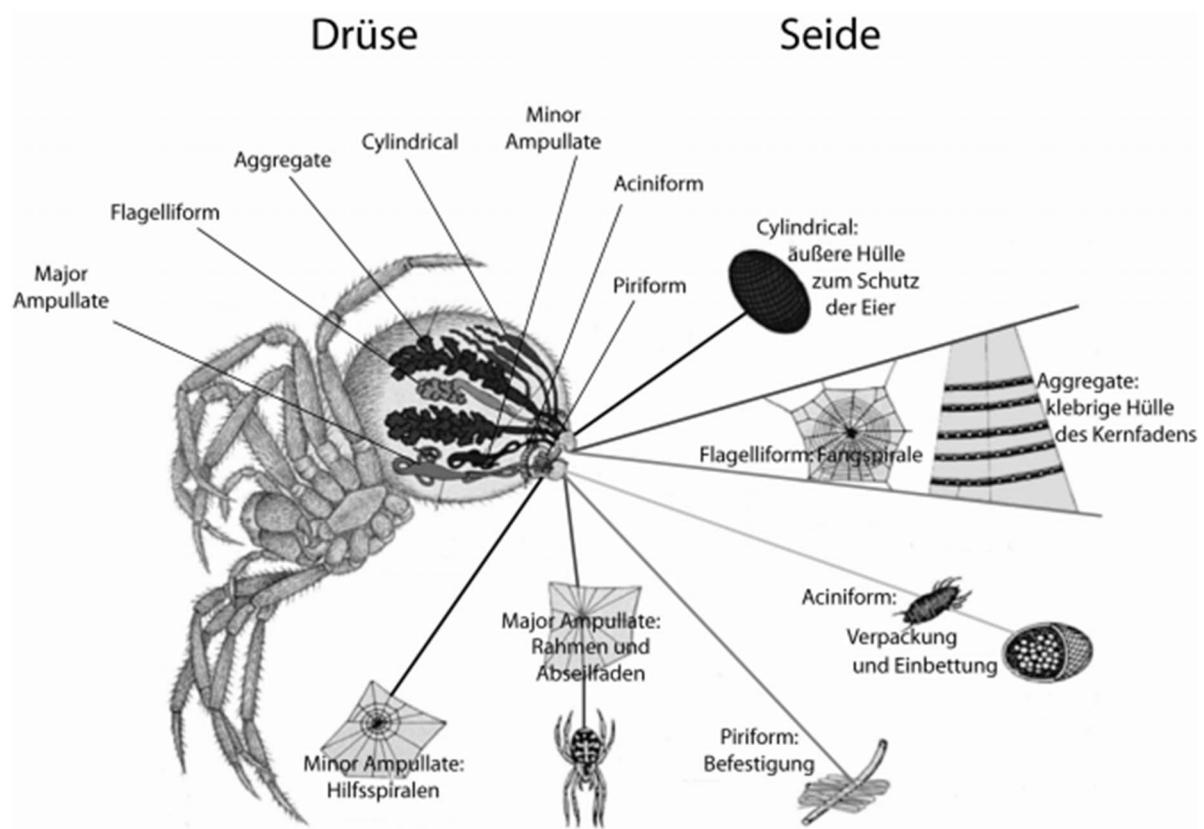


Abbildung 1: Die verschiedenen Spinndrüsen inklusive Spinnwarzen der *Araneus diadematus*. Daneben aufgelistet sind die Funktionen des jeweiligen Fadentyps.

² Koch, Markus: VUV-Laserablation von Spinnenseide. Kassel 2005. S. 17 & 26.

³ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main 2015. S. 149.

3.2 Eigenschaften der Spinnenseide

Bei genauerer Betrachtung kann man erkennen, dass ein Seidenfaden aus zwei verschiedenen Komponenten besteht, nämlich den Schlingenhaften α -Ketten und den gefalteten β -Ketten. «Die β -Ketten sind ziehharmonikaartig zu einem Proteinkristall zusammengefügt und liegen innerhalb der locker angeordneten α -Ketten.» (Foelix, 2015, S. 149.). Die Festigkeit des Fadens liefern die Proteinkristalle, während die α -Matrix für die Elastizität sorgt.⁴

Ebenfalls wichtig für die Eigenschaften eines Seidenfadens ist der Wassergehalt. Je mehr Wasser ein Faden enthält, desto elastischer präsentiert er sich. Ein trockener Faden ist zwar sehr stabil, reisst aber bei einer Ausdehnung von über 30 Prozent. Bei einem nassen Faden ist es genau umgekehrt. Er ist weich und dafür bis zu 300 Prozent seiner ursprünglichen Länge dehnbar. Die unterschiedlichen Qualitäten der Spinnfäden sind für den Netzbau essenziell. Um die Beute einfangen zu können, benötigt es eine gewisse Dehnbarkeit und gleichzeitig Reissfestigkeit, sodass die kinetische Energie des Beutetiers über die Fäden verteilt wird, ohne dass das Netz zerstört wird.⁵

Vergleicht man die Zugfestigkeit von Spinnenseide mit derjenigen von anderen natürlichen oder auch künstlichen Materialien, so stellt sie diese fast alle in den Schatten. Gummi, Sehnen, Knochen oder auch Zellulose sind dafür ein gutes Beispiel. Im direkten Vergleich mit Stahl kann Spinnenseide allerdings nur schwer mithalten, denn dieser ist ungefähr doppelt so zugfest.

Sehr spannend ist der Vergleich mit Nylon. Der Lauffaden einer Kreuzspinne (*Araneus*) besitzt ein Fadengewicht (Festigkeit) von 7.8 Denier (d.h. 7.8 Gramm pro 9 Kilometer Länge) während Nylon einen Wert von 8.7 Denier hat, also deutlich schwerer ist. Die Dehnbarkeit des Lauffadens ist mit 31 Prozent hingegen beinahe doppelt so gross, wie die von Nylon mit 16 Prozent. So würde der Lauffaden erst bei einer Länge von 80 Kilometern unter seinem eigenen Gewicht zusammenbrechen.⁶

Die Proteine der Spinnenfäden weisen eine natürliche Konservierung auf und bleiben über längere Zeit erhalten, ohne zu denaturieren. Das hat zur Folge, dass eine Spinne vor dem Bau eines neuen Netzes die alten Fäden auffrisst und mithilfe spezieller Enzyme zerlegt, bevor sie einen grossen Teil der Proteine wiederverwendet. Belegt wurde dieses Phänomen mithilfe von radioaktiven Markierungen (H^3 -Alanin). Bereits 30 Minuten nach Baubeginn des neuen Netzes betrug der Anteil gemessener radioaktiver Proteine 80 bis 90 Prozent. Daraus konnte man schliessen, dass die Spinnen den Faden nicht vollständig verdauen oder dass die Aminosäuren sehr schnell vom Spindrüsenepithel absorbiert werden.⁷ Auch wenn spätere Ergebnisse geringere Werte (15-30%) für die rezyklierten Proteine angaben, so ist die Wiederverwendung noch immer von grossem Vorteil für die Spinne. Das Wiederverenden

⁴ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 149.

⁵ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 149.

⁶ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 150.

⁷ Koch, Markus: VUV-Laserablation von Spinnenseide. Kassel 2005. S. 27.

von Proteinen lässt sich allerdings nicht bei allen Spinnen beobachten. Einige Spinnenarten werfen ihre alten Netze auch einfach weg.⁸

3.3 Verwendung im Netzbau

Generell werden Spinnen in zwei Gruppen aufgeteilt: einerseits in die wandernden Jagdspinnen und andererseits in die sesshaften Netzspinnen. Wie der Name schon verrät, benutzen nur die Netzspinnen ihre Spinnenseide für den Bau eines Fangnetzes. Form und Funktion des Netzes sind dabei je nach Spinnenfamilie anders. Die wohl bekannteste Netzform ist das Radnetz der Radnetzspinnen, welches unter anderem von den bei uns heimischen Kreuzspinnen konstruiert wird. Ausser dem Radnetz gibt es noch weitere Netztypen wie beispielsweise das Trichternetz der Trichterspinnen (*Agelenidae*). Dieses gehört zu den Decknetzen und liegt somit horizontal zum Boden.⁹ Spinnennetze müssen nicht unbedingt komplexen, regelmässigen Strukturen folgen, sondern können beispielsweise auch aus kleinen Wohnröhren mit radial verlaufenden Fangfäden vor dem Eingang bestehen.¹⁰

⁸ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 152-153.

⁹ Koch, Markus: VUV-Laserablation von Spinnenseide. Kassel 2005. S. 11.

¹⁰ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 167.

4 Das Radnetz

4.1 Struktur des Radnetzes

Das Radnetz ist ein zweidimensionales Konstrukt. Es besteht aus drei verschiedenen Spinnfäden mit unterschiedlichen Funktionen: erstens den Rahmenfäden, welche das Netz an mehreren Punkten mit dem Untergrund verbinden und auch als äusserste Schicht der Fangspirale für Stabilität sorgen. Zweitens den Speichenfäden, welche von der Mitte des Netzes (Nabe) in gleichmässigen Abständen radial zu den abgrenzenden Rahmenfäden verlaufen (Radialfäden), und drittens der Fangspirale, welche spiralförmig an den Speichenfäden angebracht ist (Abb. 2).

Dabei ist der Ablauf des Netzbau immer der gleiche: die Spinne baut zuerst ein Grundgerüst aus Rahmen- und Speichenfäden auf. Beide sind nicht klebrig und ermöglichen es der Spinne, die Fangspirale zu platzieren. Die besondere Elastizität des Fangfadens ist wichtig, um die Insekten beim Aufprall auszubremsen, ohne das Netz zu beschädigen. Während dieses Vorganges wird die kinetische Energie des Insekts auf die Fangspirale und die Speichenfäden verteilt und in Wärme umgewandelt. Da so ein grosser Teil der Energie das Netz verlässt, wird das Beutetier nicht zurückgeschleudert. Auch ist es wichtig, dass die Speichen- und Rahmenfäden ein wenig robuster sind, um dem Netz die nötige Stabilität zu verleihen.¹¹

Die Mitte des Netzes, wo alle Speichenfäden zusammenkommen, nennt sich Nabe. Für die meisten Spinnen dient sie als Aufenthaltsort. Es gibt aber auch Spinnen, welche die Nabe nach dem Netzbau herausbeissen. Dies nennt man eine «offene Nabe». Einige Spinnen bedecken die Nabe mit Seidengespinst, sodass eine Platte entsteht.

Meist setzt sich die Nabe aus unregelmässig miteinander verknüpften Fäden zusammen. Rund herum verläuft eine enge Spirale aus nicht-klebrigen Fäden. Diese Spirale nennt man Befestigungszone. Auf die Befestigungszone folgt dann die freie Zone. Sie besteht nur aus Speichenfäden und hilft der Spinne, sich schnell von einer Netzseite auf die andere zu

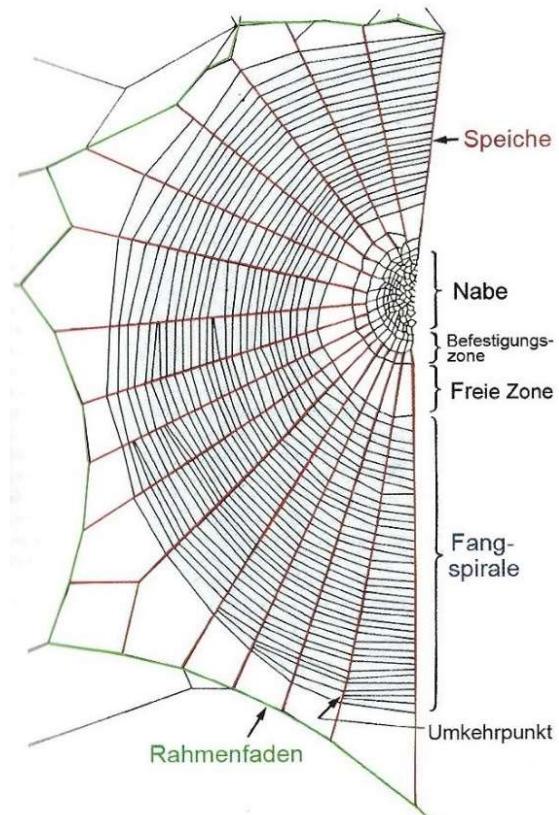


Abbildung 2: Radnetzabschnitte

¹¹ Koch, Markus: VUV-Laserablation von Spinnenseide. Kassel 2005. S. 7.

Begeben. Die äusserste und letzte Zone bestehend aus der Fangspirale, welche an den Achsenfäden befestigt ist, nennt man Fangzone.¹² Dort wird jede Überlappung von Fangspirale und Speichenfaden mit einer Substanz aus der piriformen Drüse «verschweisst» (Abb. 3).¹³

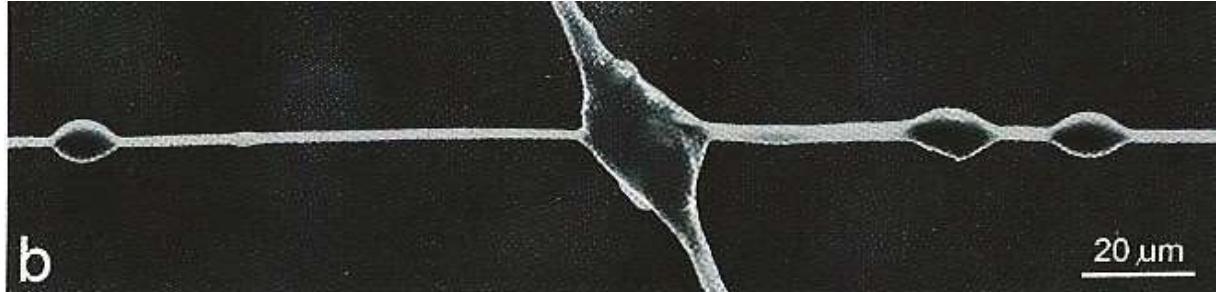


Abbildung 2: Die Verschweissungsstelle von Fang- und Speichenfaden. Dafür nutzt die Spinne eine spezielle Kittsubstanz.

Ein Kreuzspinnennetz enthält ungefähr 1000 – 1500 solcher «Schweisspunkte», von denen sich die meisten zwischen Fangspirale und Speichenfäden befinden.¹⁴ Die Anzahl an Speichenfäden in einem Netz ist je nach Gattung unterschiedlich. So ist es möglich, verschiedene Gattungen der Radnetzspinnen anhand der geometrischen Form ihres Netzes zu erkennen. Gartenkreuzspinnen (*Araneus diadematus*), deren Netze ich für meine Untersuchungen verwendete, haben beispielsweise zwischen 25 und 30 Speichenfäden mit Zwischenwinkeln von ungefähr 15° (Abb. 4).



Abbildung 3: Auf dem Bild ist die Gartenkreuzspinne (*Araneus diadematus*) zu sehen, wie sie in der Nabe ihres Netzes sitzt.

¹² Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 173.

¹³ Scheibel, Thomas: Proteinfasern. Spinnenseide – was Spiderman wissen sollte. https://www.biospektrum.de/blatt/d_bs_pdf&_id=981493 (15.8.2019). S. 23.

¹⁴ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 173.

4.2 Klebrigkeits des Netzes

Da ein Fangnetz ohne Klebstoff die Beute einfach zurückschleudern würde, versehen Spinnen ihre Fangfäden mit einer Leimschicht oder einer sogenannten «Fangwolle». Diese zwei Methoden entstanden im Laufe der Evolution, wobei der genaue Ablauf noch ungeklärt ist. Grundsätzlich lassen sich Spinnen in Cribellatae (Spinnen mit Cribellum) und Ecribellatae (Spinnen ohne Cribellum) aufteilen. Als Cribellum bezeichnet man das Zusammenwachsen der vorderen mittleren Spinnwarzen zu einer Platte. Diese ist mit tausenden feinen Spinnröhren versehen, durch die ein herausgepresstes Spinngesekret mit einem kammartigen Apparat (*Calamistrum*) des 4. Beinpaars abgekämmt wird. So entsteht eine feine Wolle, welche Spinnen an den Fangfäden anbringen, damit die Beute an diesen hängenbleibt. Cribellate Spinnen nutzen also eine «Fangwolle» um die Beute im Netz zu fangen, während ecribellate Spinnen eine Klebesubstanz (bestehend aus Glykoproteinen) dafür verwenden. Die Klebesubstanz wird aus benachbarten Spinndrüsen ausgestossen und umschliesst zwei Achsenfäden.¹⁵ Dabei verteilt sich die Klebemasse wie bei Abb. 5 nicht gleichmäßig, sondern zieht sich zu kleinen Tröpfchen zusammen. Der Faden gleicht daher einer dünnen, perlenbesetzten Schnur.¹⁶

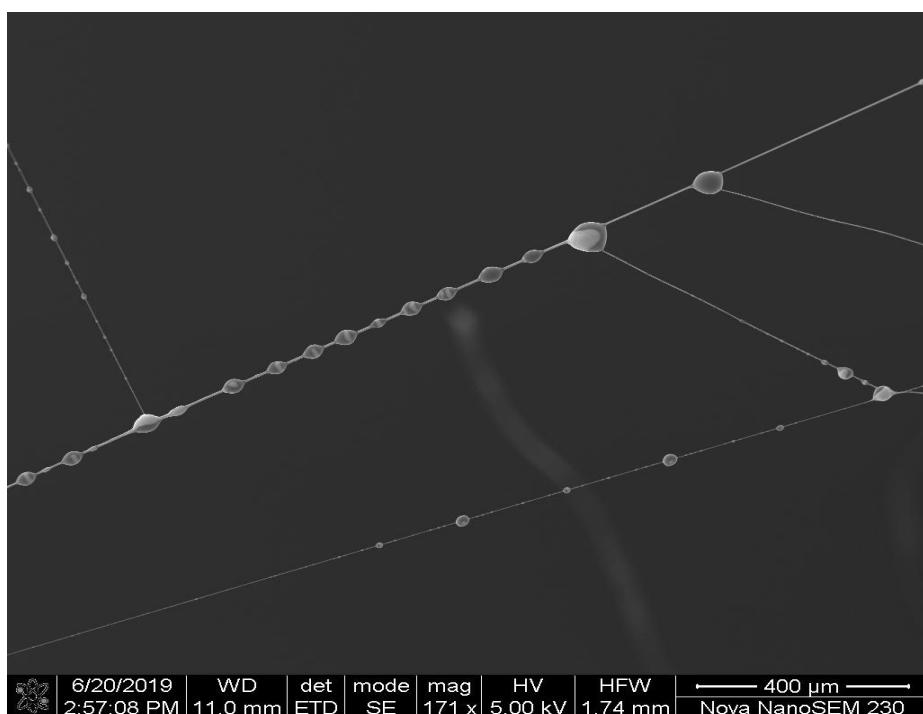


Abbildung 5: Aufnahme mehrerer Fangfäden einer *Araneus diadematus* unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM). Auf dem Bild ist zu erkennen, wie sich die Klebesubstanz tröpfchenartig auf dem Fangfaden verteilt.

Die Klebetröpfchen haben hohe Adhäsionswerte (Anhaftungswerte), welche je nach Art variieren, und halten so die Beute im Netz. Je mehr sich das Beutetier bewegt, desto mehr Klebetröpfchen werden berührt, und das Tier verfängt sich zunehmend im Fanggewebe.

¹⁵ <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/cribellatae/15711> (14.08.2019).

¹⁶ Kermer, Bruno: Das grosse Kosmos-Buch der Mikroskopie. Stuttgart ³2015. S.39.

Ausserdem ist das Verhalten dieser Klebesubstanz stark von der Geschwindigkeit der Bewegung im Falle eines Kontaktes abhängig. Ist diese sehr schnell, z.B. eine Fliege, welche ins Netz fliegt, so reagiert die Substanz wie flüssiger Leim und hält die Beute fest. Ist sie hingegen langsam, beispielsweise wenn die Fliege versucht sich aus dem Netz zu befreien, so verhält sich die Klebesubstanz wie ein elastischer Klumpen und gibt der Bewegung nach, um dann wieder zurück zu schnellen. Dies nennt sich viskoelastische Klebrigkei¹⁷.

Nebst ihrer Klebrigkei sind die Fangfäden auch um ein Vielfaches elastischer als die Rahmen- und Speichenfäden. Diese Elastizität hängt mit der Feuchtigkeit des Fadens zusammen. Die Klebesubstanz enthält Cholinchlorid und N-Acetyl-Taurin, was sie hygroskopisch (Feuchtigkeit bindend) macht. Trocknet man die Fangseide aus, so wird der Faden unelastisch und starr wie ein Speichenfaden.¹⁸

Im Innern der Klebetröpfchen werden die Achsenfäden von ringförmigen Strukturen (Granula) aus Glykoproteinen umhüllt. Wissenschaftler sind sich noch nicht sicher, welche Aufgabe diesen Strukturen zuteilwird.

Biochemische Studien konnten das giftige Alkaloid Tetrahydro-Betacarboline in den Klebetröpfchen nachweisen. Dies lässt auf eine direkte Giftwirkung der Klebetröpfchen schliessen. Man geht also davon aus, dass die Fangspirale die Beutetiere sowohl einfängt als auch vergiftet.¹⁹

Eine weitere erstaunliche Eigenschaft der Klebesubstanz zeigt sich, wenn man ein Spinnennetz über längere Zeit beobachtet. Denn selbst nach Wochen kann man keine Spuren von Schimmel oder bakterieller Zersetzung erkennen. Das liegt daran, dass die Klebesubstanz sauer reagiert (pH4). Analysiert man den Fangleim chemisch, so entdeckt man darin Nitrat (KNO_3), Phosphat (KH_2PO_4) und Pyrrolidon ($\text{C}_4\text{H}_7\text{NO}$). Von diesen Stoffen verhindert Pyrrolidon als hygroskopische Substanz (Feuchtigkeit bindend) vermutlich das Austrocknen des Fadens, während Phosphat mit Hilfe von Protonen den Achsenfaden vor dem Verfaulen schützt und Nitrat die Proteine des Achsenfadens «einsalzt», damit sie nicht ausflocken.²⁰

Früher dachten Forscher, der Vorteil der «Fangwolle» bestehe darin, dass sie im Gegensatz zur Klebesubstanz nicht austrocknen kann.²¹ Heutzutage weiss man hingegen, dass die Klebetröpfchen bis zu 10 Monate lang funktionieren.

Vergleicht man die Haftfähigkeit cribellater und ecribellater Fangfäden, so schneiden die ecribellaten Klebefäden deutlich besser ab, als die etwas primitivere «Fangwolle». Dieses Ergebnis wurde als entwicklungstechnische Überlegenheit der ecribellaten Fangfäden gegenüber der cribellaten «Fangwolle» angesehen und wiederspiegelt das Prinzip der Evolution.²²

¹⁷ Gross, Michael: Von Geckos, Garn und Goldwasser. Die Nanowelt lässt grüssen. Weinheim ¹2012. S. 133.

¹⁸ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 172.

¹⁹ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 172-173.

²⁰ Koch, Markus: VUV-Laserablation von Spinnenseide. Kassel 2005. S. 26.

²¹ Koch, Markus: VUV-Laserablation von Spinnenseide. Kassel 2005. S. 12.

²² Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 168.

4.3 Spezielle Formen des Radnetzes

Nebst der vertikalen «Grundform» des Radnetzes existieren zahlreiche Varianten mit abgeänderten oder erweiterten Netzeigenschaften. Ein Beispiel dafür sind die Netze der Streckerspinnen (*Tetragnatha*), welche oft ein horizontales Netz mit etwas weniger Speichenfäden (ca. 18) bauen. Ein Netz mit sehr vielen Speichen (50-60) errichten die kleinen Streifenkreuzspinnen (*Mangora acalypha*). Generell enthalten die Netze von Jungspinnen eine wesentlich höhere Speichenzahl als die Netze einer ausgewachsenen Spinne.

Nebst räumlicher Ausrichtung des Netzes und Anzahl der Speichenfäden gibt es noch andere Merkmale, an denen man ein Netz identifizieren, beziehungsweise die Gattung der Spinne bestimmen kann. Ein Beispiel dafür ist das Radnetz der Sektorspinne (*Zygiella*).

Die Fangspirale des Netzes besitzt einen freien Sektor, über den ein Signalfaden mit der Nabe verbunden ist. Dieser freie Sektor entsteht, indem die Spinne beim Bau der Fangspirale vor Erreichen des Signalfadens jeweils wieder umkehrt (Abb. 6).²³ Tagsüber versteckt sich die Spinne in ihrem geschützten Rückzugsort in der Nähe ihres Netzes, der sogenannten Retraite, und wartet darauf, dass ein Insekt oder ein anderes Beutetier ins Netz fliegt.

Ist das der Fall, spürt die Spinne die Erschütterungen des Signalfadens, mit dem sie ununterbrochen Beinkontakt hält. Der grosse Vorteil gegenüber Spinnen, welche sich dauerhaft in der Nabe des Netzes aufhalten besteht darin, dass die Nabe im Gegensatz zur Retraite keinen Schutz vor Feinden (z.B. Vögeln und Wespen) bietet. Spinnen mit einer Retraite müssen ihr sicheres Versteck nur für kurze Zeit verlassen, um die Beute zu ergreifen oder um das Netz zu erneuern.²⁴

Das Netz der Zwerkgkreuzspinne *Theridiosoma gemmosum* ist klein und senkrecht gelegen. Die Spinne spannt mithilfe eines Spannfadens das Netz von der Nabe her aus der Netzebene. Als lebende Brücke hält sie mit ihren Vorderbeinen den Spannfaden straff, während ihre Hinterbeine sich an den im Netzzentrum zusammenlaufenden Speichen festhalten. Fliegt nun ein Insekt ans Netz heran, lässt die Spinne den Faden augenblicklich los, sodass das Netz dem Insekt entgegenschellt und dieses mit den Klebefäden einfängt.²⁵

Sehr eigenständlich ist das stark reduzierte «Radnetz» der *Wendilgarda*, welches sich über kleine Bäche erstreckt. Die Klebefäden werden nicht in einer üblichen Fangspirale

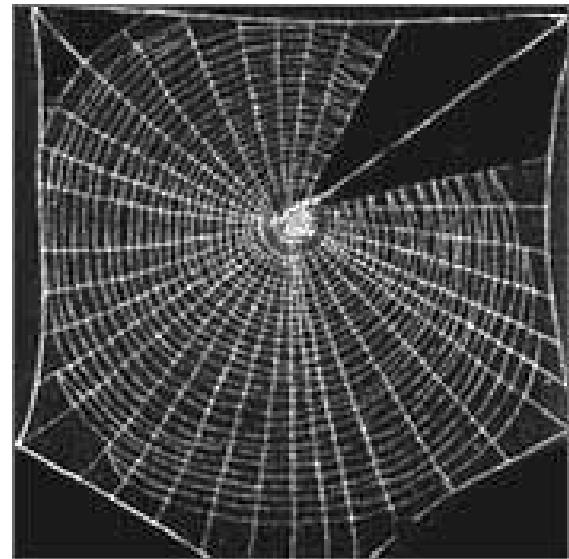


Abbildung 6: Das Netz einer Sektorspinne *Zygiella*. Oben rechts sind die zwei freien Segmente zu sehen, durch die ein Signalfaden Nabe und Retraite verbindet.

²³ Bellmann, Heiko: Der Kosmos Spinnenführer. Über 400 Arten Europas. Stuttgart ¹2010. S. 146.

²⁴ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 173-176.

²⁵ Bellmann, Heiko: Der Kosmos Spinnenführer. Über 400 Arten Europas. Stuttgart ¹2010. S. 96.

angeordnet, sondern von der Spinne direkt an der Wasseroberfläche befestigt. Dort schwebt der Faden passiv hin und her oder wird von der Spinne aktiv bewegt, um Insekten (meist Wasserläufer) auf der Wasseroberfläche einzufangen.²⁶

Solche sogenannte Schlagfallen sind auch bei einheimischen Spinnen zu finden. Die cribellate Spinne *Hyptiotes* beispielsweise baut ein Radnetz, welches auf drei Segmente reduziert ist (Abb. 7).

Es besteht aus vier Speichen, welche in einem Spannfaden Zusammenlaufen. Dieser wird ähnlich wie bei der Zwerp-Radnetzspinne *Theridiosoma* von der Spinne aktiv mit Hilfe der Vorder- und Hinterbeine gespannt. Sobald ein Insekt ins Netz gerät, verlängert die Spinne den Haltefaden, welchen sie mit den Hinterbeinen festhält, sodass das Netz an Spannung



Abbildung 7: Das stark reduzierte Radnetz einer *Hyptiotes*.

verliert und leicht zusammenfällt. Bei diesem Prozess wird das Insekt von Fangfäden eingehüllt und kann nicht mehr entkommen. Viele mögen nun denken, das Fangkonstrukt der Spinne würde nach jedem Einsatz der Schlagfalle kaputtgehen, doch dem ist nicht so. Zumindest bei kleineren Beutetieren wie Mücken kann die Spinne das gleiche Netz mehrere Male verwenden.²⁷

Als Besonderheit bei den zweidimensionalen Radnetzen möchte ich noch das Netz der neuguineischen «Leiternetzspinne» erwähnen. Ihr Netz ist vertikal gebaut und bis zu einem Meter hoch. Trotz der enormen Höhe sind sie in der Breite mit ca. 15 Zentimeter nicht von normalen Radnetzen zu unterscheiden. Die Nabe befindet sich ganz oben im Netz und die senkrechten Speichen zusammen mit den nahezu waagrechten Fangfäden verleihen dem Konstrukt ein Leiterähnliches aussehen. Genau umgekehrt aufgebaut (Die Nabe am unteren Ende) ist das Netz der *Scoloderus*, welche in Florida und Südamerika vorkommt. In einem Leiternetz verfangen sich meist kleine Nachtfalter, welche beim Kontakt mit dem Klebefaden

²⁶ Coddington, Jonathan: The Genera of the Spider Family Theridiosomatidae. Washington 1986. S. 83.

²⁷ Brunetta, Leslie/ Craig, Catherine: Spider Silk. Evolution and 400 Million Years of Spinning, Waiting, Snagging and Mating. New Haven 2010. S. 124-125.

nach unten rutschen und dabei ihre Flügelschuppen verlieren, bis sie schliesslich kleben bleiben. Würde ein Nachtfalter hingegen in ein normales Radnetz fliegen, verlöre er zwar einige seiner Flügelschuppen, könnte sich aber in den meisten Fällen aus dem Netz befreien und würde es dabei vermutlich auch zerstören. Da Leiternetze bei unterschiedlichen Familien von Radnetzspinnen vorkommen, geht man von einer unabhängigen Entwicklung aus. Zudem ist es erstaunlich, wie Jungspinnen teilweise normale Radnetze bauen, bevor sie in adultem Stadium auf ein Leiternetz umsteigen.²⁸

4.3.1 Stabilimente

Ein weiteres typisches Merkmal, welches bei verschiedenen Spinnenarten vorkommt, sind die sogenannten Stabilimente. Diese sind zickzackförmige, breite Seidenbänder, die von der Nabe des Netzes senkrecht nach oben und unten verlaufen (Abb. 8).

Einige Stabilimente haben zusätzlich noch zwei weitere Seidenbänder welcher in horizontaler Richtung verlaufen, sodass die Form einem Andreaskreuz ähnelt (Abb. 9).

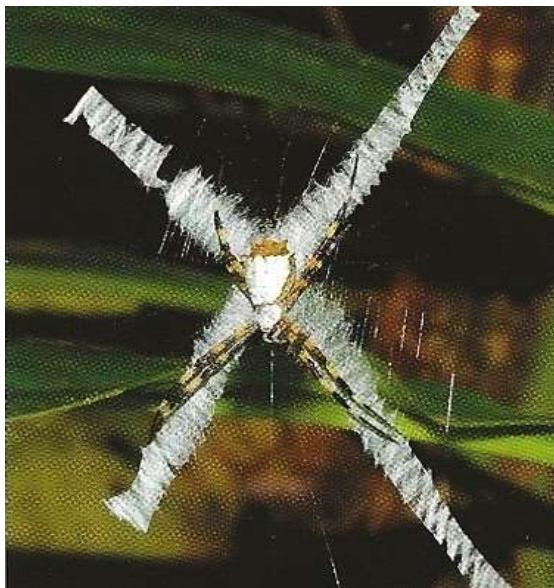


Abbildung 9: Eine tropische Spinne der Argiope-Art, die auf ihrem andreas Kreuzförmigen Stabiliment sitzt. Die Ausrichtung ihrer vier Beinpaare stimmt mit der Form des Stabilimentes überein.

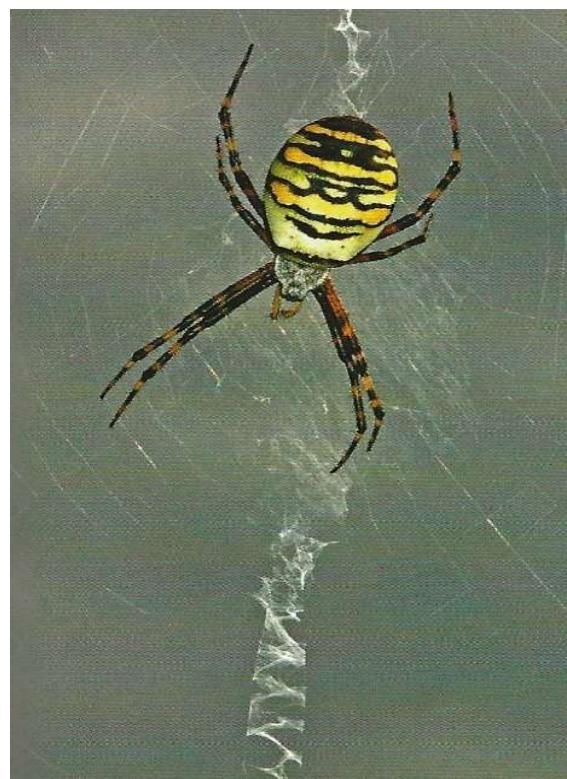


Abbildung 8: Die europäische Wespenspinne Argiope bruennichi. Das Stabiliment ist als zickzackförmiges Gespinnst unter- und oberhalb der Spinne zu erkennen.

²⁸ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 182-183.

Auch wenn der Name auf eine stabilisierende Funktion schliessen lässt, verfolgen die Stabilimente andere Zwecke. Als lockere Fadenbänder werden sie erst nach dem Bau des Netzes zwischen zwei Speichen angebracht, weshalb man im Englischen oft von «decorations» spricht.

Bei wenigen Arten und bei Jungspinnen können die Stabilimente auch scheibenförmig sein. Die Stabiliment-Fäden entstammen genau wie Beutefesselfäden aus den aciniformen Spinndrüsen und sind wesentlich dehnbarer als andere Seidenfäden, da die Seidenproteine keine kristallinen Bereiche aufweisen.

Die vielen Publikationen zur Funktion der Stabilimente bringen auch verschiedene Interpretationen mit sich. Grundsätzlich ist es anzunehmen, dass die Seidenbänder einen optischen Nutzen haben, da Spinnen mit Stabilimenten in ihren Netzen tagaktiv sind. Im Anschluss möchte ich einige interessante Theorien bezüglich der Rolle der Stabilimente erwähnen:

Das Ködern von Beute: Schon vor geraumer Zeit stellte man fest, dass die Stabiliment-Fäden UV-Licht reflektieren und somit blütensuchende Insekten anlocken können, welche den Faden mit einer Blüte verwechseln. Spätere Untersuchungen bewiesen allerdings, dass die UV-Reflexion der Stabilimente nicht stärker ist als diejenige der Spinnenseide des restlichen Netzes. Da Netze mit Stabilimenten eine höhere Fangquote (150%) als Netze der gleichen Art ohne Stabilimente erzeugten, deutet dies immer noch auf aktive Beuteanlockung hin. Das Resultat muss aber nicht zwingend mit der UV-Reflexion zusammenhängen.

Verteidigung: Bei Netzen der *Argiope* konnte man eine Verringerung des Beutefanges (-30%) bei Netzen mit Stabilimenten messen. Daher geht man davon aus, dass die Funktion bei dieser Spinnenart der Abwehr oder des Schutzes gilt. Tatsächlich kann man beobachten, wie Wespen bei der Jagd auf *Argiope* öfters Erfolg haben, wenn die Spinne kein Stabiliment in ihrem Netz hat.

Tarnung: Grundsätzlich sitzen die meisten Spinnen mit Stabilimenten in ihren Netzen ständig in der Nabe. Gerade bei vierarmigen Stabilimenten in der Form eines Andreaskreuzes scheint eine Tarnfunktion naheliegend. Dabei positionieren die Spinnen ihre vier Beinpaare ausgestreckt entlang der Arme (Abb. 8). Da viele Spinnen trotzdem eine auffällige Körperfärbung haben, ist auch diese These umstritten.

Warnung für Vögel: Spinnennetze sind grundsätzlich für den Fang von Insekten konzipiert. Entsprechend können sie bei einer Kollision mit einem Vogel, dessen Körpergewicht viel grösser ist, nicht standhalten. Da Stabilimente für unsere Augen sehr gut sichtbar sind, ist es naheliegend, dass Vögel diese ebenfalls erkennen können und einen Zusammenstoss zu vermeiden suchen.

Es ist davon auszugehen, dass Stabilimente jeweils mehrere Aufgaben besitzen. Auch wenn man in den letzten hundert Jahren mehr als 80 verschiedene Radnetzspinnen untersucht hat, konnte man keinen allgemeinen Konsens des biologischen Zwecks der Stabilimente finden.²⁹

²⁹ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 176-179.

4.3.2 Dreidimensionales Radnetz

Gewisse Radnetzspinnen stellen beim Netzbau sogar dreidimensionale Spinngewebe her. Zu ihnen gehören beispielsweise einige Arten der Gattung *Uloboridae* (tropische Kräusel-Radnetzspinnen). Ein sehr schönes horizontales Netz baut die *Uloborus bispiralis*, welche in Papua-Neuguinea anzutreffen ist. Ihr Konstrukt besteht aus zwei übereinanderliegenden «normalen» Radnetzen, wobei die Nabe des unteren Netzes trichterförmig ausgezogen wird und das zweite Netz wie ein Deckel das entstandene «Loch» verschließt. Der dadurch entstandene «Käfig» dient der Spinne als Aufenthaltsort.³⁰

Auch möchte ich noch das besonders kreative Konstrukt der Radnetzspinne *Cyrtophora* beschreiben. Diese baut ein horizontales Radnetz, dessen Nabe durch Fäden nach oben gezogen wird, sodass eine Art Zelt entsteht (Abb. 10). Vom zentralen Trichter aus werden in sehr naheliegendem Abstand ca. 200 radiale Speichen (Radialfäden) gezogen und eine nicht klebrige ebenfalls enggewundene Fangspirale angelegt. Über dem zeltförmigen Netz errichtet die Spinne ein räumliches Fanggewirr aus einer Vielzahl von Stolperfäden, an denen fliegende Insekten anschlagen und danach ins Netz fallen. Die im Trichter lauernde Spinne eilt sofort heran und umwickelt die ohne Klebstoff gefangene Beute von unten durchs Netz ein.³¹ Der Vorteil eines solchen Netzes besteht darin, dass es sehr robust und somit dauerhaft ist. Die Spinne muss die Fäden nur alle 2-3 Wochen erneuern, was ein sehr langer Zeitabschnitt ist, wenn man bedenkt, dass ein normales Radnetz meist jeden Tag erneuert wird.³²



Abbildung 10: Das komplexe Konstrukt einer *Cyrtophora*. Horizontal liegt das Decknetz, das in der Mitte zeltartig nach oben gezogen wird.

³⁰ Lubin, Yael et al.: Orb Plus Cone-Webs in Uloboridae (Araneae), With a Description of a New Genus and Four New Species. In: Psyche: A Journal of Entomology. Band 89 (1982) Heft 1-2. S. 40.

³¹ Bellmann, Heiko: Kosmos Atlas Spinnentiere Europas. Stuttgart ³2006. S. 124.

³² Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main. ³2015 S. 184.

4.4 Der Bau des Radnetzes

Bevor die Spinne mit dem eigentlichen Netzbau beginnt, verbringt sie einige Zeit damit, hin und her zu laufen und Fäden an verschiedene Stellen zu platzieren. Um mit dem Netzbau beginnen zu können, benötigt die Spinne einen waagerechten Brückenfaden. Dieser befindet sich meist zwischen zwei Ästen oder Mauern. Um diesen Faden anzubringen gibt es zwei bekannte Methoden. Davon wurde eine schon öfters in freier Wildbahn gesehen, wo die Spinne einen Faden von einem erhöhten Punkt aus schweben lässt, sodass er vom Luftzug herumgeblasen wird, bis er sich an einen anderen Gegenstand anheftet. Die zweite Methode wurde im Labor entdeckt, wo es keinen Luftzug gab. Dort plazierte die Spinne ihren Faden wieder an einem erhöhten Punkt, verliess diesen aber wieder und zog den Faden hinter sich her, bis sie auf der anderen Seite ungefähr die gleiche Höhe erreichte, um dort das zweite Ende des Fadens manuell zu befestigen.³³ Das zweite Verfahren kann in gewissen Fällen nicht angewendet werden, z.B. wenn eine Spinne ihr Netz über einem Fluss errichten möchte. Dennoch können Spinnen mit der ersten Methode einen Faden über ein Gewässer von bis zu 25 Metern Breite spannen. Der Brückenfaden besteht aus zwei Achsenfäden und vielen feinen Fäden aus den aciniformen Drüsen, welche am Ende des Fadens kleine Schlaufen bilden, die für die mechanischen Verankerung verantwortlich sind.

Der weitere Bau des Radnetzes wird in drei aufeinanderfolgende Phasen unterteilt und entspricht dem Vorgehen der meisten Radnetzspinnen:

1. Bau von Rahmen und Speichen, 2. Platzieren der Hilfsspirale, 3. Einsetzen der Fangspirale.³⁴

4.4.1 Rahmen- und Speichenbau

Die Spinne startet bei Punkt A (siehe unten Abb. 11). Dort platziert sie einen neuen Rahmenfaden, beißt den Brückenfaden durch und hält diesen mit ihren Vorderbeinen fest. Nun rollt sie den Brückenfaden, der nur als Hilfsfaden dient, langsam auf und zieht den neuen Faden hinter sich her. Bei M angekommen verknüpft sie den Brückenfaden mit dem neuen Rahmenfaden AM und seilt sich nach C ab. Diese Y-Struktur bildet das Grundgerüst für das weitere Netz, wobei M den Mittelpunkt des Netzes darstellt. Von C aus läuft die Spinne wieder zu M zurück, um dort einen weiteren Faden zu befestigen. Nun fängt die Spinne von M aus an, Radialfäden (Speichen) anzulegen. Gleichzeitig platziert sie auch einige Rahmenfäden, da zu Beginn des Netzbau beider Fadentypen alternierend beziehungsweise im selben Arbeitsschritt erstellt werden. Die Spinne zieht also von nun an immer einen Faden hinter sich her, der von dort aus startet, wo der letzte Faden befestigt wurde und

³³ Brunetta, Leslie/ Craig, Catherine: Spider Silk. Evolution and 400 Million Years of Spinning, Waiting, Snagging and Mating. New Haven 2010. S. 122.

³⁴ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 184-185.

entweder zu einem Rahmen- oder Speichenfaden wird. Eine detaillierte Beschreibung der genauen Arbeitsschritte ist im Buch Biologie der Spinnen von Rainer F. Foelix zu finden.³⁵

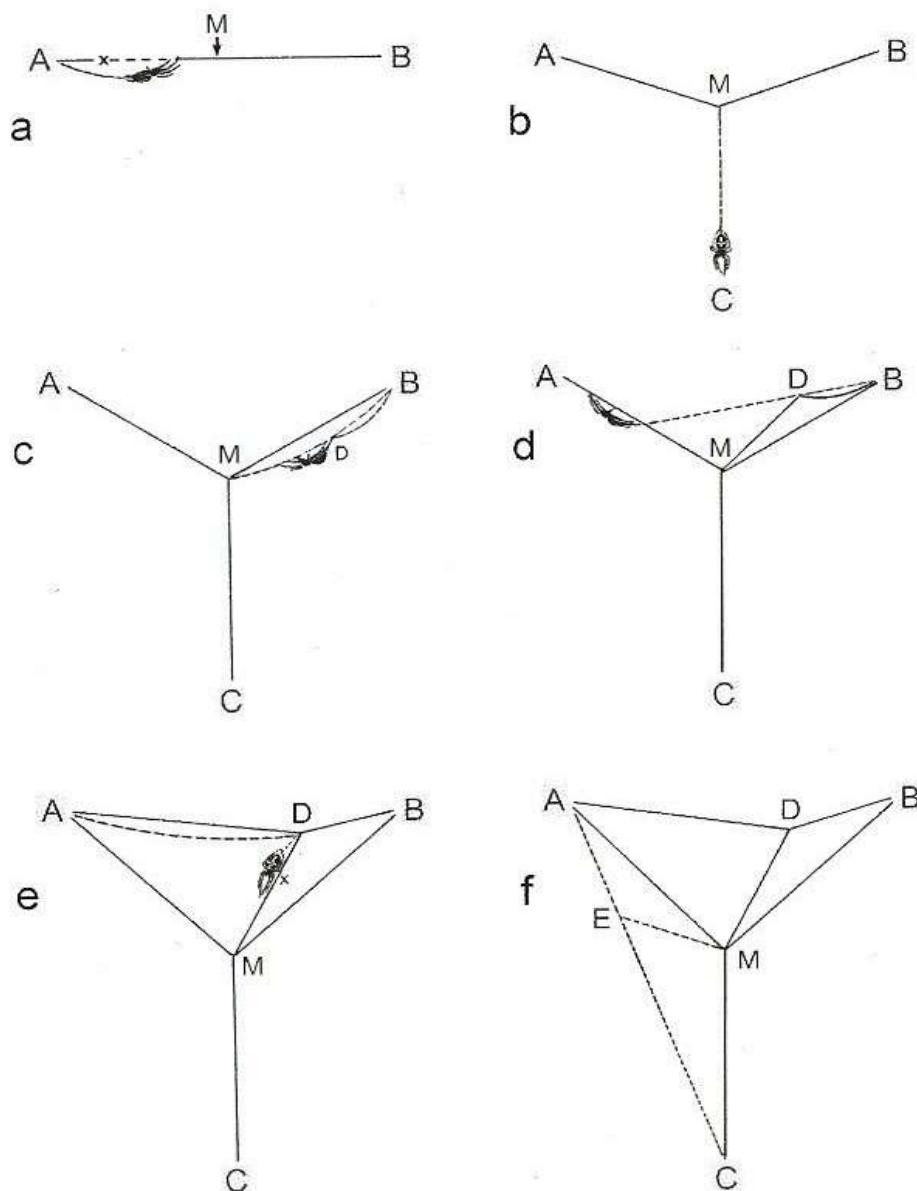


Abbildung 41: Schematischer Ablauf beim Errichten eines Radnetzes.

Sobald alle Rahmenfäden sowie einige Speichen vorhanden sind, werden die Lücken zwischen den vorhandenen Speichen mit weiteren Radialfäden ausgefüllt. Diese legt die Spinne immer «doppelt» an, da sie entlang eines schon vorhandenen Radialfadens eine provisorische Speiche zieht, diese am Rahmenfaden befestigt und erst auf dem Rückweg zu M die endgültige Speiche errichtet.

Die Abfolge, in der die Spinne diese «Füllspeichen» anbringt folgt zwei Grundprinzipien: Erstens wird die neue Speiche immer in eine andere Richtung als die vorherige gezogen, und zweitens werden die ersten «Füllspeichen» direkt unter den zu Beginn angelegten Speichen

³⁵ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S.185-187.

angebracht.³⁶ Dies lässt sich am einfachsten mit der Zahlenfolge bei Abb. 12 veranschaulichen. Wo die Spinne den nächsten Radialfaden anbringt, entscheidet sie immer vom Netzzentrum aus. Dort tastet sie mit den Vorderbeinen die vorhandenen Speichen ab und misst die Radien zwischen ihnen. Im Sektor mit dem grössten Zwischenwinkel platziert sie anschliessend die nächste Speiche. Mit Hilfe verschiedener Experimente, wie beispielsweise dem Herausbrennen einzelner Speichen während des Netzbaus, konnte man diese These teils bestätigen, doch spielen auch noch andere Aspekte (z.B. Netzspannung) eine Rolle.

Dass die Vorderbeine den Winkel zwischen den Speichen messen können, wird deutlich, wenn man das Netz einer Spinne ohne Vorderbeine anschaut. Die Winkel weisen grosse Asymmetrien auf, was bei normalen Radnetzen nicht der Fall ist.³⁷

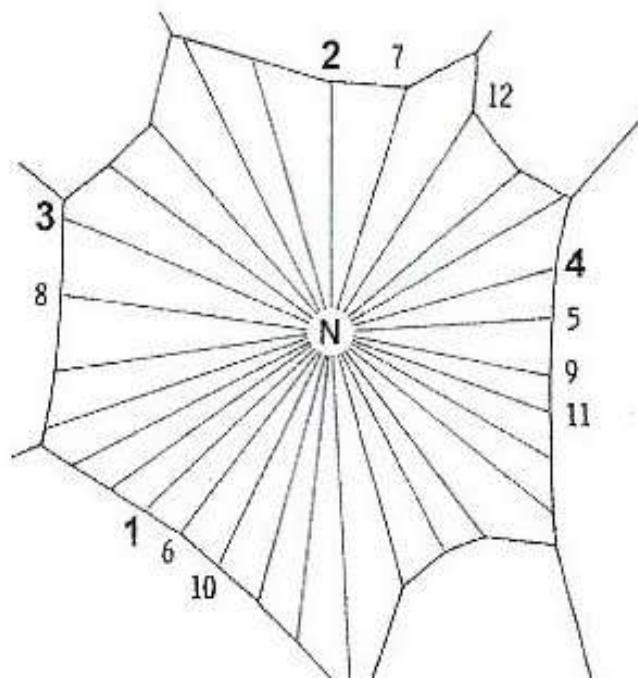


Abbildung 12: Ein Radnetz gebaut nach dem erwähnten Y-Schema. Die Zahlen geben die Reihenfolge beim Einziehen der Speichenfäden an.

4.4.2 Die Hilfsspirale

Schon während des Speichenziehens beginnt die Spinne mit kreisförmigen Umläufen im Netzzentrum, um die Radialfäden durch nahe aneinander liegende Spiralfäden zu verbinden. So entsteht die Befestigungszone rund um die Nabe (vgl. Abb. 2). Mit der gleichen Methode konstruiert die Spinne weiter aussen die sogenannte Hilfsspirale, welche als temporärer Vorgänger der Fangspirale dient. Ihre Bedeutung liegt darin, dem Netz eine gewisse Stabilität zu verleihen und später den Bau der Fangspirale zu vereinfachen, da ansonsten keine direkte Verbindung der Radialfäden bestehen würde und die Spinne vor jedem Speichen-Wechsel einen Umweg über die Nabe machen müsste.³⁸ Danach gönnt sich die Spinne eine kleine Pause bevor sie die Hilfsspirale durch die endgültige Fangspirale ersetzt.³⁹

³⁶ Zschokke, Bernhard: Web construction behaviour of the orb waving spider Araneus diadematus Cl. Basel 1994. S. 87.

³⁷ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 187.

³⁸ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 188.

³⁹ Zschokke, Bernhard: Web construction behaviour of the orb waving spider Araneus diadematus Cl. Basel 1994. S. 87-88.

4.4.3 Die Fangspirale

Die klebrige Fangspirale wird von aussen nach innen, also entgegen der Richtung der Hilfsspirale, eingezogen und an den Speichen befestigt. Dazu nutzt die Spinne wie bereits erwähnt die Fäden der Hilfsspirale, um von einer Speiche zur nächsten zu gelangen. Die Abstände zwischen den Klebefäden sind dabei sehr gering, sodass es keine grossen Lücken im Netz gibt. Für das Einziehen der Fangspirale spielen die Vorder- und Hinterbeine eine fundamentale Rolle. In Zeitlupenfilmen konnte festgestellt werden, dass die Spinne ihre Vorderbeine nutzt, um die nächste Speiche anzuvisieren. Gleichzeitig zieht sie mit ihren Hinterbeinen den Klebefaden aus der Spinnwarze und befestigt diesen an den Radialfäden. Mit dem Einziehen der Fangspirale wird die Hilfsspirale schrittweise abgebaut. Sobald das Netz fertig ist, kann man lediglich die Verknüpfungspunkte der früheren Hilfsspirale als kleine weisse Bollen ausmachen. Wie man in Abb. 2 erkennen kann, wird die Fangspirale nicht bis zur Befestigungszone gezogen, weshalb die sogenannte freie Zone entsteht, welche der Spinne beim schnellen Wechseln der Netzseiten hilft.

Auch wenn es auf den ersten Blick so aussieht, als ob die Fangspirale kontinuierlich eingezogen wurde, entspricht dieser Eindruck nicht der Tatsache. Meist liegt die Nabe ein wenig oberhalb des geometrischen Netzzentrums, was dazu führt, dass die Spinne beim Anlegen der Fangspirale im unteren Teil mehr Umgänge machen muss als im oberen Abschnitt. So kann man in einem Netz Umkehrpunkte erkennen, an denen die Spinne ihre Laufrichtung wechselte.

Für das Anbringen der Fangspirale benötigt eine Spinne etwa 30 bis 40 Minuten. Dies entspricht rund 80 Prozent des gesamten Zeitaufwandes, den eine Spinne für den Bau ihres Netzes aufbringen muss (Rahmen- und Speichenkonstruktion ca. 5 bis 10 Minuten). Wenn man nun noch die Wartezeit zwischen dem Bau der Hilfs- und Fangspirale miteinbezieht, errichtet eine Radnetzspinne ihr Netz in einer guten Stunde. Würde man nun alle Fäden, die in einem Spinnennetz integriert sind, aneinanderheften, so würde die Länge des Fadens rund 20 Meter betragen bei einem Durchmesser von eins bis zwei Mikrometer. Zudem wiegt das gesamte Radnetz nur bis zu einem Milligramm. Vergleicht man dieses geringe Gewicht mit der Masse eines ausgewachsenen Kreuzspinnenweibchens (500 Milligramm), so erhält man ein Verhältnis von 1/500, was die Komplexität der Spinnenfäden und die Ingenieurskunst der Spinne unterstreicht.⁴⁰

Im Weiteren ist es beeindruckend, dass die Konstruktion der Fangspirale ausschliesslich mithilfe des Tastsinns und ohne Nutzung des Sehvermögens erfolgt. Verbindet man also einer Radnetzspinne vor dem Netzbau die Augen, so lässt sich anschliessend kein Unterschied zu einem normal errichteten Netz erkennen. Dieses Ergebnis ist nicht besonders erstaunlich, da viele Spinnen nachaktiv sind und ihre Netze somit in der Dunkelheit bauen. Auch die Schwerkraft, so fand man 1973 heraus, ist für den Netzbau einer Radnetzspinne nicht nötig, denn die beiden Kreuzspinnen, welche sich an Board der Raumkapsel «Skylab» befanden, bauten auch in völliger Schwerelosigkeit ein makelloses Netz.⁴¹

⁴⁰ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 188-189.

⁴¹ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 189.

4.5 Auswirkungen des Geschlechts beim Netzbau

Alle die hier erwähnten Spinnennetze beziehen sich auf weibliche Spinnen. Männliche Spinnen können zwar ebenfalls Netze konstruieren, doch nur bis zur Geschlechtsreife, danach machen sie sich auf die Suche nach einem Weibchen, weshalb sie keine Zeit für den Netzbau mehr aufwenden können. Falls sie dennoch ein Netz errichten, ist dies meist vergleichsweise klein und verkümmert. Dies hängt damit zusammen, dass männliche Spinnen die sogenannten Triaden auf den hinteren Spinnwarzen, welche für die Produktion des Klebefadens zuständig sind, bei der Reifehäutung verlieren. Demgemäß fehlen in ihren Netzen auch klebrige Fangfäden. Als Folge davon können Männchen im erwachsenen Stadium auch kaum mehr Beute fangen, was allerdings nicht allzu schlimm ist, da sie nach der Reifehäutung sowieso nur noch etwa eine Woche zu leben haben.⁴²

4.6 Aufgaben und Gliederung eines Radnetzes

Die Kernfunktion des Radnetzes ist wie bei allen Netztypen der Beutefang. Dieser wird dank der geometrischen Eigenschaften besonders effizient und ökonomisch ausgeführt. Mit dem einigermaßen kleinen Zeitaufwand von rund 60 Minuten und der Produktion von etwa einem Milligramm Faden kann die Spinne ein Fanggewebe erstellen, welches ihr das Wirken in einem erweiterten Aktionsbereich ermöglicht. Über die fest gespannten Radialfäden kann die Spinne von der Nabe ausgehend jeden Winkel ihres Netzes in wenigen Sekunden erreichen. Zudem versetzen Erschütterungen, welche beispielsweise bei einer Kollision von Netz und Fliege stattfinden, die Speichen in Schwingungen, welche die Spinne sofort spürt und zur Lokalisierung der Beute nutzt. Übrigens werden hochfrequente Schwingungen besser als Schwingungen niederer Frequenzen weitergeleitet. Fliegt nun ein Beutetier ins Netz, zieht die Spinne mit ihren Vorderbeinen mehrmals an den Speichen, um das Tier zu orten. Danach bewegt sie sich über die Speichen möglichst direkt auf die gefangene Mahlzeit zu. Eine weitere Funktion der Speichen kommt während der Balz (werbendes Vorspiel der Begattung) zum Vorschein. Dort dienen die Speichen als Signalfäden für die Kommunikation zwischen Männchen und Weibchen, wobei das Männchen in bestimmten Impulsen am Signalfaden «zupft», damit das Weibchen erkennt, dass es sich nicht um ein Beutetier handelt.⁴³

Im Radnetz sind die Spannungen je nach Abschnitt unterschiedlich stark. So findet man am Rand des Netzes eine hohe Spannung, welche zur Mitte hin abnimmt. Dabei sind auch die Kräfte ungleich, welche auf die Netzfäden wirken. Das Verhältnis zwischen Verankerungsfäden, Rahmenfäden und Radialfäden liegt bei 10:7:1. Entsprechend diesen Proportionen bemisst die Spinne auch die Fadendicke. So sind die Verankerungs- und Rahmenfäden mit einem Durchmesser von ca. sechs Mikrometern doppelt so breit wie die zwei bis drei Mikrometer dicken Speichenfäden. Dies gleicht die effektive Belastung

⁴² Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 190.

⁴³ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 191-192.

innerhalb des Netzgewebes ein wenig aus. Damit das Netz bei unterschiedlichen Umweltbedingungen standhält, misst die Spinne die Spannungszustände ihrer Fäden und passt diese den Verhältnissen an.⁴⁴

Die Fangspirale ist deutlich weniger gespannt und enthält die dünnsten Fäden eines Radnetzes. Dafür weist sie eine enorme Elastizität auf und kann auf eine mehrfache Länge gedehnt werden, was vor allem beim Fangen zappelnder Beute essenziell ist. Das Zentrum des Netzes (Nabe) liegt exzentrisch nach oben verschoben, weil die Spinne schneller nach unten als nach oben laufen kann. Dadurch ist es ihr möglich, schneller zu ihrer Beute zu gelangen.⁴⁵

Da die Spinnenseide im Radnetz sehr dünn ist, gehen die meisten Menschen davon aus, dass es den Insekten mit ihren Facettenaugen nicht möglich ist, das Spinnennetz zu sehen. Dieser Eindruck stimmt aber nur teilweise, denn Insekten können genauso wie wir Menschen die Lichtreflexionen der Fäden erkennen und den Kontakt mit dem Netz verhindern. Dies ist aber nur bei guten Lichtverhältnissen und wenig Wind möglich, denn sobald das Netz schnell hin und her schwingt wird es, wie auch in der Dunkelheit, so gut wie unsichtbar.⁴⁶

Radnetze stehen meist nicht ganz senkrecht im Raum, sondern sind leicht diagonal zur Erde ausgerichtet. Dabei sitzen die Spinnen stets kopfunter auf der bodennäheren Seite, sodass sie sich bei Gefahr sofort an einem Sicherheitsfaden abseilen und in Sicherheit begeben können. Dieses Verhaltensmuster kann mit wenigen Ausnahmen bei den meisten Radnetzspinnen beobachtet werden. Die vertikale Lage ist vor allem für den Fang von grösseren, fliegenden Insekten (Wespen, Fliegen etc.) praktisch, während die horizontalen Radnetze der *Uloboridae* und *Tetragnathidae* auf den Fang von kleinerer, leichtgewichtigen Beute (Mücken, Blattläuse) zielt.⁴⁷

Anhand der geometrischen Struktur eines Radnetzes ist es möglich, die Art der Spinne zu bestimmen. Umso erstaunlicher ist es, dass sich Spinnen unterschiedlicher Arten auch in fremden Netzen zurechtfinden können. Dies wurde schon von dem französischen Entomologen J. H. Fabre im 19. Jahrhundert beobachtet, als er eine Wespenspinne (*Argiope bruennichi*) im Netz einer *Argiope lobata* absetzte. Genauso ist es für die in der Schweiz verbreitete Gartenkreuzspinne (*Araneus diadematus*) ein Leichtes, ihre Beute im Netz einer *Argiope aurantia* zu fangen. Natürlich ist dies nicht bei allen Spinnen der Fall. So versucht beispielsweise die Sektorspinne (*Zygiella*) im Netz einer Kreuzspinne (*Araneus*) stets den Rahmenfaden zu erreichen, um sich von dort aus fallen zu lassen.⁴⁸

⁴⁴ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 191-192.

⁴⁵ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 192.

⁴⁶ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 192.

⁴⁷ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 192.

⁴⁸ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 193.

4.7 Reparatur zerstörter Spinnennetze

Da es in der Natur oft zu Unwettern kommt, werden Spinnennetze gelegentlich durch Regen und Wind, aber auch durch Tau beschädigt. Dementsprechend baut eine Radnetzspinne fast jeden Tag ein neues Netz, wobei gewisse Arten die Rahmenfäden des alten Netzes übernehmen. Für den Abbau des Netzes gehen Radnetzspinnen sehr strukturiert vor. Sie zerstören blockweise drei bis fünf Speichen samt der dazugehörigen Fangspirale, bis nur noch wenige Speichen übrig sind. So wird das Netz innert einer Stunde Sektor für Sektor abgebaut. Danach beginnen die Spinnen den Neubau, wobei sie die übrigen Speichen als Hilfsmittel nutzen.

Da diese Methode darauf zielt, nur die Speichen und die Fangspirale zu erneuern, ist sie für Spinnen, welche ein ganz neues Netz (inkl. Rahmenfäden) errichten nicht geeignet. Diese nutzen eine wesentlich schnellere Vorgehensweise, bei der sie die seitlichen Rahmenfäden durchbeissen, sodass das gesamte Netz gegen den horizontalen Brückenfaden kollabiert. Danach bauen sie ihr Netz wie gewohnt nach dem Y-Schema.

Die Spinnenfäden des alten Netzes werden verschiedenen genutzt. Einige Spinnen fressen sie auf, um sie später wieder zu verwenden, andere Spinnen nutzen die Fäden für das Einwickeln des Eikokons und wieder andere werfen das Material einfach weg. Dies ist je nach Spinnenart unterschiedlich. Bei leichten Beschädigungen des Netzes (beispielsweise durch den Beutefang) können Spinnen den entstandenen Schaden mit einem einfachen «Flickwerk» reparieren, um die mechanische Stabilität des Netzes zu gewährleisten.⁴⁹

4.8 Wieso klebt die Spinne nicht im Netz?

Der zuvor erwähnte französische Insektenforscher J. H. Fabre stellte zu diesem Thema schon 1905 die These auf, dass Spinnen eine Fett- oder Ölschicht auf ihrer Körperoberfläche haben. Diese solle ihnen als Schutz vor der klebrigen Fangspirale dienen. Um diese Annahme zu testen, machte er einen Vergleich zwischen einem normalen und einem in Fettlösungsmitittel (CS_2) gewaschenen Kreuzspinnenbein. Dabei konnte er beobachten, wie das gewaschene Bein wesentlich stärker festklebte als das normale. Leider blieben Fabres Erkenntnisse über 100 Jahre lang unbeachtet und wurden als «Anekdote» beiseitegelegt. Vor ein paar Jahren hat man die entsprechenden Versuche wieder aufgegriffen und konnte seine These betätigen.

Trotzdem bleibt offen, ob nicht noch weitere Faktoren eine Rolle spielen. Beispielsweise gibt es die Behauptung, Spinnen liegen nur auf den nicht klebrigen Speichen. Dies mag zwar bei langsamen Bewegungen stimmen, doch sobald sich Beute in Netz befindet oder die Spinne ihr Netz abbaut ist der Kontakt mit den Klebefäden unvermeidlich.

Eine weitere Studie geht davon aus, es sei ein Zusammenspiel diverser Aspekte. Nebst der Ölschicht sollen sowohl das Laufverhalten als auch tarsale Haare an den Spinnenfüßen,

⁴⁹ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 193.

welche die Berührung mit den Klebefäden auf ein Minimum begrenzen, einen Beitrag an die Kleberesistenz der Spinne leisten.⁵⁰

4.9 Die Evolution des Radnetzes

Für viele Spezialisten gilt das Radnetz als die am besten entwickelte Netzform, die die Evolution mit sich brachte. Spannend dabei ist der Fakt, dass sich die komplexe Struktur des Radnetzes aus zwei verschiedenen Ursprungsgruppen (Cribellatae und Ecribellatae) entwickelte. Man fragt sich daher, welche Gruppe zuerst war und ob eine jeweilige Gruppe die Struktur unabhängig von der anderen kreirte oder nicht. Da die Fangspirale bei beiden Gruppen unterschiedlich aufgebaut ist, erscheint eine parallele Entwicklung sogar plausibel, denn ein solcher Unterschied bildet sich meist aus einer früheren Entwicklungsstufe (vor der Entstehung der komplexen Radnetz-Struktur) heraus. So entstand rund um 1930 die Hypothese, dass das Radnetz aus einfacheren Vorstufen zweimal unbeeinflusst voneinander hervorgebracht wurde (Abb. 13).

Anfangs bauen die Cribellatae und die Ecribellatae ein einfaches Konstrukt bestehend aus einem Schlupfwinkel und ein paar Radialfäden (I), wobei die cribellaten Spinnen schon ihre Fangwolle nutzen und die ecribellaten Spinnen einfache Stolperfäden ziehen. Die zweite Entwicklungsstufe (II) zeigt die Entstehung vom zweidimensionalen Fangbereich auf, wobei die ecribellaten Spinnen sogar dreidimensionale Gewebe errichten. Im hypothetischen dritten Schritt (III) gibt die Spinne ihren Schlupfwinkel auf, oder verschiebt ihn an den Netzrand, beziehungsweise in die nähere Umgebung des Netzes. Bei einzelnen ecribellaten Spinnen (*Linyphiidae*, *Theridiidae*) entwickelt sich in diesem Schritt auch der klebrige Fangfaden, sprich es können nun fliegende Beutetiere gefangen werden. In der vierten, vorletzten Stufe (IV) erhält das Netz seine zentrische Form, wobei sich die Spinne im Mittelpunkt aufhält.

Die letzte Stufe ist dann bereits das uns

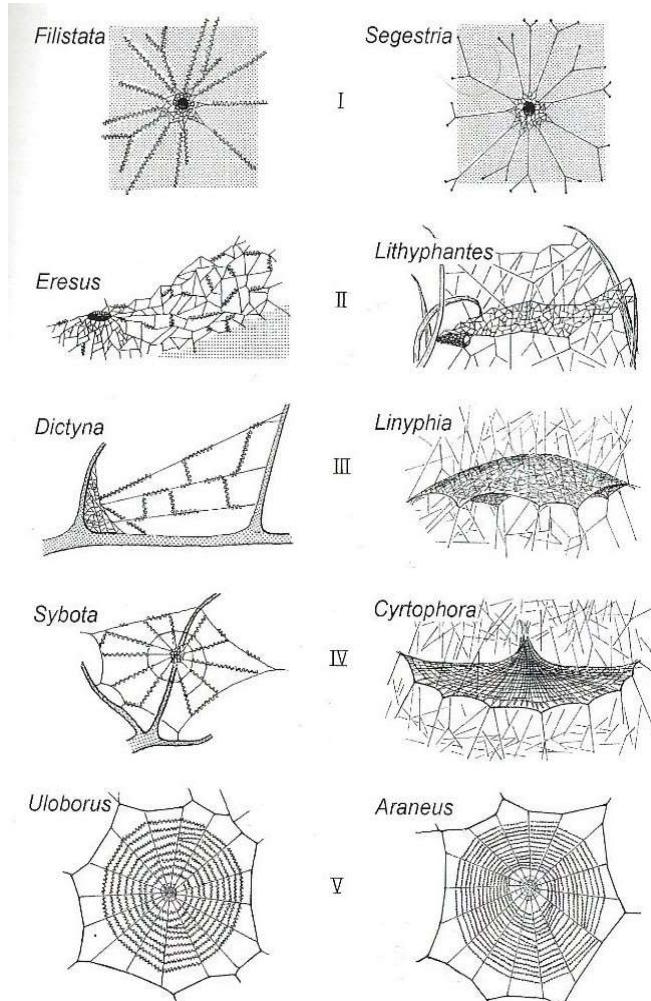


Abbildung 13: Der hypothetische Evolutionsablauf des Radnetzes unterteilt in zwei Gruppen. Links die Netze cribellater Radnetzspinnen und rechts die Netze ecribellater Radnetzspinnen.

⁵⁰ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 193-194.

allen bekannte Radnetz, wobei sich das Netz der beiden Gruppen lediglich im Fangfaden der Fangspirale unterscheidet.

Sieht man sich die Bilder auf Abb. 13 an, so scheint die Evolution der cribellaten Spinnen halbwegs einsichtig, die der ecribellaten Spinnen jedoch eher unverständlich. Deshalb wird das Netz von *Cyrtophora* nicht als Vorstufe, sondern zusammen mit den Decknetzen der Baldachspinnen (*Linyphiidae*) als Ableitung des Radnetzes eingestuft. Somit wäre für diese Spinnenfamilien das Radnetz die ursprüngliche Form und die Reihenfolge in Abb. 13 müsste auf der Seite der ecribellaten Spinnen dementsprechend umgedreht werden.⁵¹

Um 1980 herrschte in der Wissenschaft die Auffassung, das Radnetz wäre eine relativ ursprüngliche Form, welche sich im Verlauf der Evolution nur einmal bildete. Diese These ist unvollständig, da sie nicht klärt, welche Vorstufen der Entwicklung des ursprünglichen Radnetzes vorangingen. 1990 wurde deshalb eine Studie durchgeführt, in welcher typische Merkmale bei verschiedenen Familien der Radnetzspinnen kladistisch (verwandtschaftlich) verglich, um zu beweisen, dass die paläozoischen Vorgänger der Radnetzspinnen alle cribellat waren, und sich die ecribellaten Spinnen von den cribellaten Spinnen abtrennten. Die Resultate zeigten eine höhere Wahrscheinlichkeit für eine einmalige Entstehung (*Monophylie*) der Radnetzspinnen als für eine parallele (konvergente). Neuere Studien kommen wiederum zum Schluss, dass eine Monophylie eher unwahrscheinlich ist. Angeblich soll das Radnetz entweder viel älter als vermutet oder wirklich parallel entstanden sein. Neue archäologische Funde von Spinnen aus der Jura- und Kreidezeit belegen, dass das Radnetz schon über 100 Millionen Jahre alt sein muss. Es stellt somit keineswegs das Endstadium einer Entwicklung dar, sondern dient vielmehr als Vorlage für eine voranschreitende Evolution, denn sowohl bei cribellaten als auch ecribellaten Spinnen kann man deutliche Anpassungsscheinungen, wie z.B. den freien Sektor im Netz der Sektorspinne *Zygiella*, erkennen.⁵²

Sehr kreativ in der Vielfalt existierender Abwandlungen vom Radnetzbau erscheinen die Fangmethoden folgender Radnetzspinnen: Die Bolaspinnen (*Mastophora* in Amerika, *Dicrostichus* und *Cladomelea* in Australien) haben eine Fangtechnik entwickelt, bei der sie lediglich einen Faden inklusive Leimtropfen am unteren Ende von einem Querfaden aus baumeln lassen und ihn aktiv mithilfe eines Vorderbeins nach vorbeifliegenden Beutetieren schleudern.⁵³ Die in Australien lebende *Caelenia* nutzt eine sehr ähnliche Technik, die auch auf einem aktiven Beutefang basiert. Dabei verwendet sie jedoch keinen Klebefaden, sondern sitzt am Ende eines kurzen «Hängefadens», um selbst die Beute zu ergreifen.⁵⁴

⁵¹ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 198-200.

⁵² Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 200.

⁵³ Herberstein, Marie: Spider Behaviour. Flexibility and Versatility. Cambridge 2011. S.62.

⁵⁴ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 200-201.

5 Der Plan vom Netzbau

Beim Betrachten eines Radnetzes erkennt man sofort dessen Schönheit und Komplexität in der Struktur. Damit einhergehend kommt die Frage auf, ob dieser Netzbau nun über längere Zeit erlernt oder genetisch programmiert wurde. Um dies zu beantworten, reicht der Blick auf das Netz eines Jungtieres, welches die gleiche Regelmässigkeit in der Form aufweist und eine genetische Programmierung belegt. Bei genauen Messungen konnte man sogar feststellen, dass das Radnetz einer Jungspinne zwar kleiner, aber dafür noch regelmässiger als das eines ausgewachsenen Exemplars ist. Die Winkel zwischen den Radialfäden sowie die Regelmässigkeit in den Abständen der Fangspirale nehmen mit zunehmendem Alter der Spinne ein wenig ab. Dabei spielen die gemachten Erfahrungen des Individuums beim Netzbau keine Rolle. Selbst wenn man ein Jungtier in den ersten Monaten seines Lebens im Labor aufzieht, wo es keine Netze konstruieren kann, erkennt man nach der Freilassung keine Unterschiede zu den Netzen normal aufgewachsener Spinnen derselben Art.⁵⁵

Trotzdem ist der Netzbau keine fix programmierte Abfolge. Nimmt man beispielsweise einen heißen Draht und brennt damit eine Speiche während des Netzbau heraus, so ersetzt die Spinne diese sofort. Erst wenn man diesen Prozess über 20-mal wiederholt, gibt die Spinne auf und geht zum nächsten Schritt, dem Bau der Fangspirale, über. Dies beweist, dass die Spinne nicht immer einem Schema folgt, sondern sehr wohl auch dazu in der Lage ist, sich mit Hilfe ihrer Sensorik aktiv anzupassen und zu reagieren. So wird der Einfluss von schon vorhandenen Strukturen auf die weitere Konstruktion des Netzes veranschaulicht. Ähnliche Ergebnisse erhält man bei dem Versuch, eine Spinne während des Netzbau in ein anderes Netz zu versetzen, welches sich in einem früheren Stadium befindet. Dabei werden bereits absolvierte Phasen, wie z.B. das einziehen der Hilfsspirale, von der netzfremden Spinne wiederholt. Es kommt aber auch vor, dass eine Spinne den Bau der Hilfsspirale einfach überspringt und sich sofort an den «planmässigen» Bau der Fangspirale macht.

Im ersten Fall orientiert sich die Spinne an der schon vorhandenen Struktur des Netzes, während sie sich im zweiten Fall an den im zentralen Nervensystem (ZNS) programmierten Ablauf hält. Natürlich ist dies eine vereinfachte Darstellung, da noch weitere Faktoren eine Rolle spielen könnten, wie z.B. der begrenzte Vorrat an Spinnseide.⁵⁶

Nach dem Verlassen des Kokons dauert es meistens ungefähr zwei Wochen, bis Jungspinnen ihre ersten Radnetze konstruieren, trotz angeborener Spinnfähigkeit. Zuvor leben sie zusammen mit ihren Geschwistern in einem unregelmässigen Gespinst. Um dies zu ergründen, hat man Jungspinnen schon frühzeitig aus ihren Kokons befreit und an einen isolierten Holzrahmen abgesetzt, wo die Tiere anfänglich keine Netze bauten. Dafür zogen sie Leitfäden und errichteten manchmal einen Schlupfwinkel. Nach ein paar Tagen begannen sie dann mit dem Netzbau, der anfangs noch unregelmässig war und sich erst mit der Zeit verbesserte. Diese Entwicklung hängt jedoch nicht mit dem Lernprozess der Spinne zusammen, sondern liegt daran, dass es eine Weile dauert, bis das ZNS voll ausgebildet ist.

⁵⁵ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 196.

⁵⁶ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 196-197.

Jungspinnen sind demnach erst nach ein paar Wochen fähig, ein Netz herzustellen.⁵⁷ Wie so oft, gibt es auch hier Ausnahmen. Ein gutes Beispiel dafür ist die cribellate Radnetzpinne *Uloborus*, deren Jungtiere gleich nach dem Schlüpfen Netze bauen, welche sich in einigen Aspekten von den Netzen eines adulten Tieres unterscheiden:

1. die Fangspirale fehlt, 2. die Hilfsspirale ist nicht temporär und 3. werden als Ersatz der Fangspirale viele zusätzliche Radialfäden zwischen den eigentlichen 15 bis 20 Speichen angebracht. Der Grund für diese Abweichungen liegt darin, dass Jungspinnen der Gattung *Uloborus* weder über ein Cribellum noch über ein Calamistrum (Kammähnliche Borsten, welche beim Produzieren der «Fangwolle» notwendig sind) verfügt und somit keine Fangfäden produzieren kann. Dieser Zustand dauert bis zur nächsten Häutung, wo die Spinne sowohl Cribellum als auch Calamistrum erhält. Danach sehen die Netze wie bei den ausgewachsenen *Uloboridae* aus.⁵⁸

Im Allgemeinen bauen Jungspinnen ein etwas anderes Netz, als ausgewachsene Spinnen. Es gibt auch Gattungen der Radnetzspinnen (Zygiella, Nephilia, Eustala), welche schon als Jungtiere versuchen, die Netzstruktur des ursprünglichen Radnetzes beizubehalten. Der Prozess des Netzbau wird also nie wirklich erlernt, sondern ist schon von Geburt an gegeben, auch wenn nicht immer in endgültiger Form. Eine solche Tendenz kann man auch bei anderen Spinnenfamilien beobachten. Ein Beispiel dafür wären die Haubennetzspinnen (*Theridiidae*), die vermutlich von den Radnetzspinnen abstammen.⁵⁹

⁵⁷ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 197.

⁵⁸ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 197-198.

⁵⁹ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 197-198.

6 Netzbau unter Drogeneinfluss

Der Tübinger Zoologe Hans Peters wollte 1948 den Netzbau der Kreuzspinne auf Band aufnehmen. Dies erwies sich als schwierig, da seine Spinnen ihre Konstrukte schon in den frühen Morgenstunden erbaute. Folglich musste Peters einen Weg finden, wie er die Spinnen dazu bringen konnte, ihre Netze zu einem von ihm bestimmten Zeitpunkt zu errichten. Die naheliegendste Lösung für dieses Problem war es, ein Anregungsmittel für die Baumotivation der Tiere zu finden. Dazu wendete er sich an seinen Kollegen Peter Witt von der Pharmakologie. Der erste Stoff, den man den Spinnen verabreichte, war Amphetamin. Dieses hatte leider keine Wirkung in Bezug auf den Zeitpunkt des Netzbau. Dafür konnte man einige Unregelmässigkeiten in der Struktur des Netzes beobachten, bei denen sowohl die Radialfäden als auch die Fangspirale eine willkürliche Anordnung aufwiesen. Während den nächsten Jahren testete Witt unzählige Pharmaka (z.B. Koffein, Mescalin, Strychnin usw.) an Radnetzspinnen und dokumentierte systematisch die Auswirkungen auf den Netzbau. Bei diesem Vorgehen wurde klar, dass einige Drogen einen gezielten Effekt auf die Netzstruktur haben. Ein gutes Beispiel dafür ist das «Koffeinnetz» (Abb. 14), welches bei der Verabreichung einer bestimmten Menge an Koffein entsteht. Die Abweichungen betreffen unter anderem folgende Parameter: Netzform, Netzgrösse, Regelmässigkeit der Speichenwinkel, Anzahl Speichen, Spiralumgänge und Maschenweite. Natürlich spielt auch die Dosierung der Droge eine Rolle. Vergleicht man z.B. das Netz einer Spinne, der 10 Mikrogramm Koffein verabreicht wurden, mit dem einer Spinne, der 100 Mikrogramm verabreicht wurden, sind Unterschiede wie Tag und Nacht zu erkennen. Bei einer geringeren Dosierung (10 µg/Tier) ist das Netz ein wenig kleiner und breiter, die Winkel zwischen den Speichen oft übergross und die Fangspirale unverändert. Erhöht man nun die Dosis auf 100 µg/Tier, so sind die Abweichungen wesentlich grösser, sofern man überhaupt noch von einem Radnetz sprechen kann.⁶⁰ Grundlegend hat fast jede Droge eine negative Auswirkung auf die Regelmässigkeit im Netzbau der Spinne. Eine Ausnahme ist die Droge LSD (d-

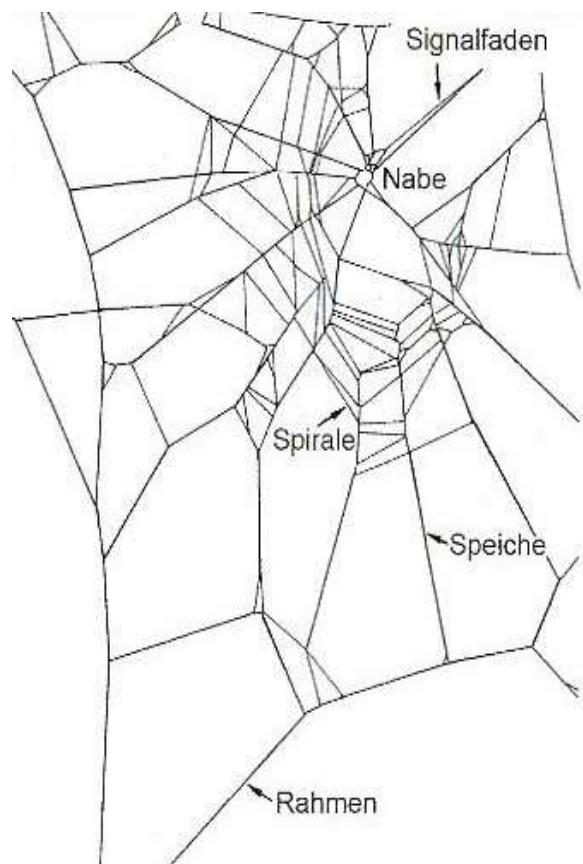


Abbildung 54: Die Netzform eines Koffeinnetzes. Der Spinne wurde eine hohe Dosis Koffein verabreicht.

⁶⁰ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 195-196.

Lysergsäurediethylamid), unter deren Einfluss die Regelmässigkeit der Zwischenwinkel und die der Abstände der Fangfäden sogar gesteigert werden. Bei einer erhöhten Dosis (0.1-0.3 µg/Tier) sinkt die Regelmässigkeit wiederum zunehmend.

Die Drogentests an Spinnen sind in der Praxis relativ einfach umzusetzen. Anstatt sich wie bei den meisten Tieren einer Spritze zu bedienen, kann man bei Spinnen die gewünschte Substanz lediglich mit Zuckerwasser vermischen (bestimmte Drogenkonzentration, bestimmtes Volumen) und anschliessend der Spinne an die Mundöffnung hängen. Diese saugt die Flüssigkeit dann nach wenigen Augenblicken ein.

Da die Unterschiede zwischen einem Drogennetz und einem normalen oftmals sehr gering sind, gibt es für die Auswertung spezielle Programme, welche auch die kleinsten Abweichungen, die man von blossem Auge gar nicht erkennen kann, herausarbeitet.

Anfangs hatte man die Hoffnung, die Drogennetz-Forschung könnte eine Anwendung in der klinischen Medizin finden, da man beispielsweise beim Testen von Medikamenten ein sofortiges «Feedback» im Netz der Spinne sehen sollte. Diese Erwartung wurde allerdings nicht erfüllt. Dementsprechend wurde auch im Labor von Peter Witt, dem Vater der Drogennetze, die Forschung nach ungefähr 20 Jahren auf Eis gelegt. Seitdem wurden die Drogennetze vereinzelt für Versuche herangezogen, waren wissenschaftlich aber nie genügend aussagekräftig.⁶¹

⁶¹ Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 196.

7 Industrielle Spinnenseide

Schon seit Jahrhunderten wird Spinnenseide in der Volksmedizin beim Verschliessen offener Wunden benutzt. Dies hängt damit zusammen, dass Spinnenseide unzählige vorteilhafte Eigenschaften hat (biokompatibel, löst keine Entzündungen oder allergische Reaktionen aus, biologisch abbaubar). In den letzten Jahrzehnten wurden viele neue medizinische Möglichkeiten in der Anwendung von Spinnenseide entdeckt. Beispielsweise arbeitet man an der Medizinischen Hochschule in Hannover seit geraumer Zeit mit der Radnetzspinne *Nephilia*. Deren Spinnenfäden versucht man bei der Nervenregeneration als Leitstrukturen und bei der Züchtung künstlicher Haut als Matrix zu verwenden. Ausserdem kann Spinnenseide auch bei der Regeneration von Knochen und Knorpel behilflich sein. Verflechtet man Spinnenfäden zöpfchenartig wie bei einer Schnur, so kann man sie auch sehr gut als Nähfaden für Operationen verwenden. Sogar funktionstüchtige Violinsaiten konnten mithilfe des Verflechtens von tausenden von Spinnfäden hergestellt werden.⁶²

Die grosse Herausforderung bei der industriellen Verwendung von Spinnenseide ist deren benötigte Menge. Es wurde versucht, Spinnen zu züchten, um sie in Massen zu melken. Die Spinnenzucht scheitert aber am Kannibalismus der Spinnen sowie an ihrem stark ausgeprägtem Territorialverhalten. Lässt man mehrere Spinnen über eine längere Zeit im gleichen Raum, so kann man sich glücklich schätzen, wenn zumindest eine überlebt.⁶³ Da man die Gene, welche die Seidenproteine codieren, analysiert hat, versucht man nun eine biotechnologische Herstellungsmethode zu entwickeln, bei der man diese Gene im Erbgut eines anderen Lebewesens einsetzt. Dazu hat der Biochemiker Prof. Dr. Thomas Scheibel eine gute Lösung gefunden, denn er implantiert die Gene direkt in das Erbgut von Darmbakterien, sodass diese die Seidenproteine produzieren, aus denen man später einen Spinnenfaden herstellen kann. Dafür nutzte er übrigens die Gene der Gartenkreuzspinne (*Araneus diadematus*). Das Gewinnen des Seidenproteins war dabei wesentlich einfacher, als die Herstellung des späteren Fadens. Um genau zu sein, dauerte es beim Forschungsteam von Scheibel über zehn Jahre, den genauen Spinnprozess von Spinnen zu analysieren und mechanisch zu reproduzieren. Mittlerweile stellt die Firma von Dr. Scheibel (AMSilk) massenhaft Spinnenseide her, welche sie Biosteel nennen. Diese ist noch elastischer und stabiler als normale Spinnenseide, da die Gene, welche für die Herstellung der Seidenproteine zuständig sind, etwas optimiert wurden. Mittlerweile verarbeitet die Firma den Biosteel in verschiedene Materialien und Güter, wie z.B. Sportschuhe oder Kosmetikartikel. Natürlich leistet sie auch ihren Anteil an der Medizin und stellt z.B. Beschichtungen für Brustimplantate und Verpackungen für Wirkstoffe her, welche dadurch im Körper gelagert werden können und sich erst nach einer gewissen Zeit freisetzen.⁶⁴

⁶² Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 152.

⁶³ https://www.epo.org/learning-events/european-inventor/finalists/2018/scheibel_de.html (18.8.2019).

⁶⁴ https://www.youtube.com/watch?v=KCZF_05fPzo (18.8.2019).

8 Eigene Forschung

Im Zusammenhang mit meiner Maturaarbeit habe ich ein zweiwöchiges Schülerpraktikum am Departement Physik der Uni Basel, genauer gesagt im Nano Imaging Lab (NI Lab) absolviert. Dort konnte ich Spinnenseide, die ich in meinem Garten gesammelt habe, unter dem Rasterelektronenmikroskop REM (NOVA NanoSEM) und dem Rasterkraftmikroskop AFM (NanoWizard4) untersuchen und fotografieren. Bei dieser Forschung unterstützen mich drei Teammitglieder des NI Labs. Die Forschung mit der Spinnenseide kann grob in drei Schritte unterteilt werden: sammeln, untersuchen (fotografieren) und zum Schluss mithilfe der Literatur die Bilder auswerten. Im Folgenden möchte ich auf diese drei Schritte eingehen und meinen Arbeitsablauf und meine Vorgehensweise erläutern.

Zunächst befasste ich mich mit den Fragen, wie sich die Spinnenfäden am besten einsammeln und aufbewahren liessen und wie ich die Spinnenfäden präparieren könnte, sodass ein gutes REM Bild entsteht. Als Methode für das Präparieren der Spinnenfäden hatten meinen Betreuungspersonen des NI Labs die Idee, eine Schraubenmutter mit einem klebrigen, runden Kohlenstoffplättchen zu überziehen, welches in der Mitte hohl ist. Die Spinnenfäden konnte ich anschliessend mithilfe dieser Kohlenstoffplättchen direkt dem Spinnennetz entnehmen, was mir einiges an Arbeit ersparte, denn zuvor habe ich das gesamte Spinnennetz in einem Plastikbehälter eingesammelt um die Spinnenfäden mit einer Pinzette über den Hohlraum der Schraubenmutter zu Spannen.

Um unerwartete Probleme während meines Praktikums zu minimieren, durfte ich schon im Voraus einen Tag im NI Lab vorbeischauen und einen Probefaden untersuchen. Dort erklärten mir die Mitarbeitenden auch die Funktionsweise der beiden Mikroskope REM und AFM. Im REM wird das Objekt von einem aus Primärelektronen bestehenden Elektronenstrahl getroffen, sodass Sekundärelektronen herausgeschlagen werden. Diese Sekundärelektronen gelangen zu einem Detektor, der die Daten auf einen Computer überträgt, welcher daraus ein Bildsegment macht. Um ein vollständiges Bild der Oberfläche des Präparates zu erhalten, wird der Elektronenstrahl rasterartig über das Objekt bewegt. Das AFM fährt das Objekt auch rasterartig ab, nutzt dafür aber einen sogenannten Cantilever (dünne Nadel), um die Oberfläche abzutasten beziehungsweise um die atomaren Kräfte zwischen Nadelspitze und Oberfläche zu messen. Beim Kontakt mit der Probe verbiegt sich der Cantilever ein wenig und ein Sensor leitet die Werte an den Computer weiter, der daraus wiederum ein Bild anfertigt. Das AFM kann zwischen diversen Modi wechseln, welche für das Messen unterschiedlicher Parameter zuständig sind wie beispielsweise Höhe, Adhäsion oder Festigkeit.

Bei besagtem Probedurchlauf wurde mir bewusst, dass ich aufgrund der verschiedenen Scanmethoden beider Mikroskope meine Präparate anpassen musste. Für das AFM legte ich den Spinnenfaden auf die Klebefläche eines Post-it, da der Cantilever ansonsten am sehr stark klebrigen Kohlenstoffplättchen hängengeblieben wäre. Die Schraubenmutter-Präparate eigneten sich gut für die Untersuchungen unter dem REM, allerdings musste das Präparat zuvor noch mit einer dünnen Goldschicht überzogen werden (diesen Vorgang nennt man Sputtern). Das Sputtern verfolgt dabei zwei Ziele: zum einen würde sich ein

nichtleitendes Objekt durch die Elektronen des Elektronenstrahls aufladen, was den Scanprozess stören könnte, und zum anderen geben Metalle wie Gold oder Palladium ein besseres Signal an den Detektor, da sie mehr Sekundärelektronen abgeben. Wichtig beim Sputtern und auch beim REM und AFM ist ein dauerhaftes Vakuum, denn überall werden Elektronen, Ionen oder andere kleine Teilchen durch den Raum geschossen, die auf keinen Fall mit fremden Partikeln in Kontakt kommen dürfen. Geschähe dies trotzdem, so würden beispielsweise die Elektronen des Elektronenstrahls im REM abgelenkt, und es entstünden Ungenauigkeiten beim Scannen.⁶⁵

Mit all diesen Informationen und Erkenntnissen konnte ich direkt am ersten Tag meines Schülerpraktikums mit dem Mikroskopieren meiner Spinnenfäden starten.

Für meine Untersuchungen nutzte ich die Spinnenfäden der Gartenkreuzspinne (*Araneus diadematus*) und die der Spaltenkreuzspinne (*Nuctenea umbratica*) (Abb. 15 & 16).



Abbildung 15: Die Radnetzspinne *Nuctenea umbratica*. Aufgenommen im Garten an der Maiengasse Basel.



Abbildung 6: Die sehr bekannte Gartenkreuzspinne (*Araneus diadematus*). Aufgenommen im Garten an der Maiengasse Basel.

Beide dieser Spinnen sind bei mir im Garten heimisch, was das Einsammeln ihrer Fäden vereinfachte und mir einige Zeit des Suchens ersparte. Um all meine Proben zu untersuchen verbrachte ich täglich mehrere Stunden am REM oder AFM. Da ich mir vor dem Praktikum ein gewisses Knowhow über Spinnenseide aneignete, wusste ich auch, wonach ich unter dem REM Ausschau halten musste und konnte einige schöne Bilder aufnehmen. Am meisten beschäftigte ich mich mit den Leimklumpen der Fangfäden und deren Eigenschaften. Beispielsweise konnte ich mit dem AFM die Adhäsion eines solchen Klumpens ermitteln (Abb. 17), und als ich mit dem REM eine starke Vergrösserung (13'000x) einstellte, verformte sich die Leimsubstanz, was darauf hindeutete, dass es sich beim untersuchten Klumpen um eine Flüssigkeit handeln muss (Abb. 18). Sehr eindrücklich sind auch die AFM Bilder, auf denen die beiden Achsenfäden des Fangfadens zu sehen sind. Da ich zu diesem Zeitpunkt den genauen Aufbau eines ecribellaten Fangfadens noch nicht kannte, war dies für mich eine neue Entdeckung und bereitete mir grosse Freude. Spannend ist dabei auch, dass die

⁶⁵ Für eine präzisere Beschreibung dieser drei Vorgänge empfehle ich Ihnen folgenden Artikel zu lesen: Kassianidou, Elena et al.: Deciphering structural and functional properties of mammalian cells. Departement Physik der Uni Basel (Block Course HS 2019 – Structural Biology and Biophysics). 2019.

Achsenfäden sowohl bei der Adhäsions- als auch bei der Festigkeitsmessung zu sehen waren (Abb. 17 & 19). Bei der Festigkeitsmessung ist dies nur logisch, denn der Cantilever drückt aktiv auf die Probe und misst den Widerstand, wobei ein Achsenfaden natürlich mehr Widerstand leistet als die Leimflüssigkeit. Bei der Adhäsionsmessung gehe ich davon aus, dass die Sichtbarkeit des Achsenfadens mit der Menge an berührter Klebesubstanz in Verbindung steht. Drückt der Cantilever auf eine Stelle, wo sich nur Klebesubstanz befindet, so taucht er in diese ein und klebt stärker fest, als wenn er mit der dünnen Schicht rund um die Achsenfäden in Berührung kommt.

In der zweiten Woche meines Praktikums startete der etwas «mühsamere» Teil, in dem ich meine Bilder mithilfe verschiedener Bücher auswertete. Auch wenn diese Arbeit etwas weniger aufregend war, da sie eher meinem Schulalltag entsprach, so hatte ich trotzdem meinen Spass und lernte viel über Spinnen und deren Seide. Eine sehr umfangreiche Quelle war das Buch «Biologie der Spinnen» von Rainer F. Foelix, der in der Schweiz lebt und mir das Privileg erwies, ein Interview für meine Maturaarbeit zu geben. Dieses Interview half mir dabei, einige Unklarheiten bezüglich meiner REM Bilder zu klären und gleichzeitig etwas über das Leben eines grossen Spinnenforschers in Erfahrung zu bringen.

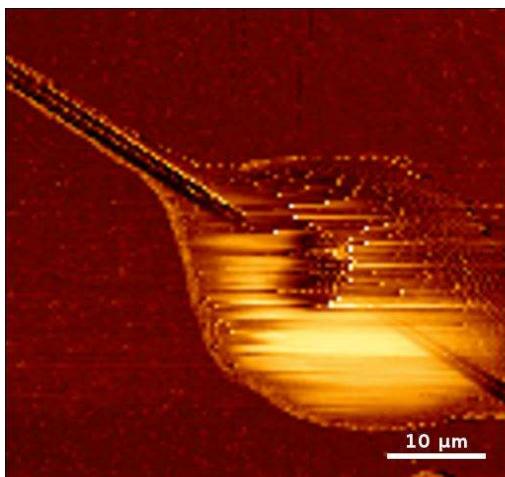


Abbildung 77: Die Adhäsion eines Klebetropfens des Fangfadens einer *Araneus diadematus*, betrachtet unter dem Rasterkraftmikroskop (AFM). Anhand der beiden schwarzen Linien sind die zwei Achsenfäden zu erkennen.

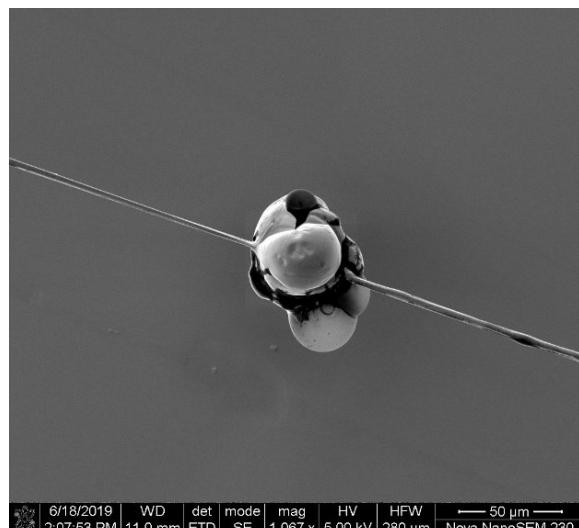


Abbildung 88: Das Bild eines Leimtropfens des Fangfadens einer *Araneus diadematus*, abgebildet mithilfe des Rasterelektronenmikroskop (REM). Das Foto wurde gemacht, nachdem der Klebetropfen von einem starken Elektronenstrahl bestrahlt wurde.

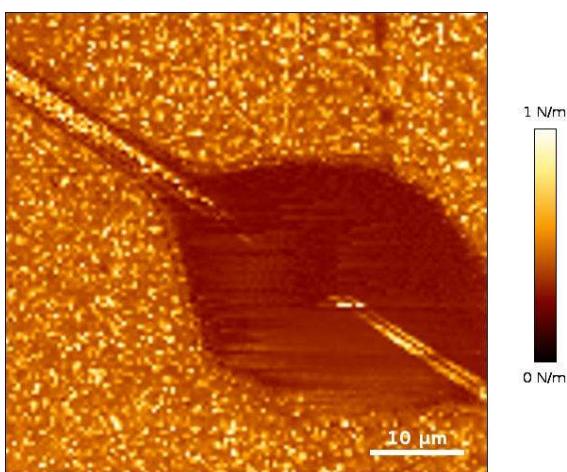


Abbildung 19: Das Härteprofil eines Klebetropfens, aufgenommen mit dem AFM. Auch hier sind die Achsenfäden (weisse Linien) sichtbar.

9 Interview mit Rainer F. Foelix

Rainer F. Foelix ist Professor für Zoologie und ein berühmter Spinnenforscher. Er arbeitete als Wissenschaftler in den USA, in Deutschland und in der Schweiz, wo er heute zuhause ist. Sein Werk «Biologie der Spinnen» erschien erstmals 1979 beim Thieme-Verlag und wurde anschliessend auch auf Englisch veröffentlicht. Es zählt weltweit zu den führenden Fachbüchern über Spinnen.

Abb. 20: Der Gerüstfaden einer *Araneus diadematus*.

AW: Auf dem Bild ist zu erkennen, dass der Gerüstfaden aus mehreren kleinen Fäden besteht. Wie entsteht dieser Aufbau aus parallelen Einzelfäden?

RF: Das Bild zeigt durchwegs Mehrfach-Fäden, d.h. vermutlich ist die Spinne am Rahmen mehrfach entlanggelaufen, dann können natürlich 4 oder auch 8 Stränge zusammenkommen.

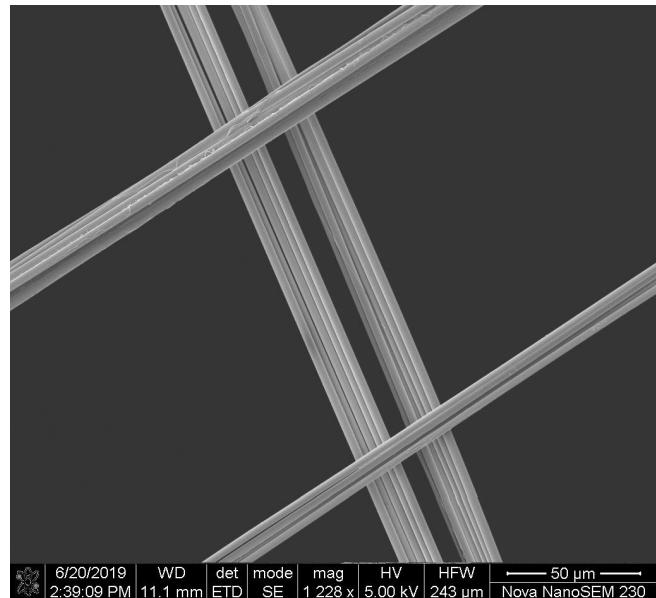


Abbildung 20

Abb. 21: Netzausschnitt des Radnetzes einer *Araneus diadematus*.

AW: Wie entstehen die regelmässigen Leimbollen und wieso sind sie abwechselnd grösser und kleiner?

RF: Der Achsenfaden des Fangfadens wird zusätzlich mit Klebstoff bedeckt, der sich anschliessend zu kleinen Kugeln zusammenzieht; weshalb sich meist grössere und kleinere Leimkugeln abwechseln, ist meines Wissens nicht bekannt.

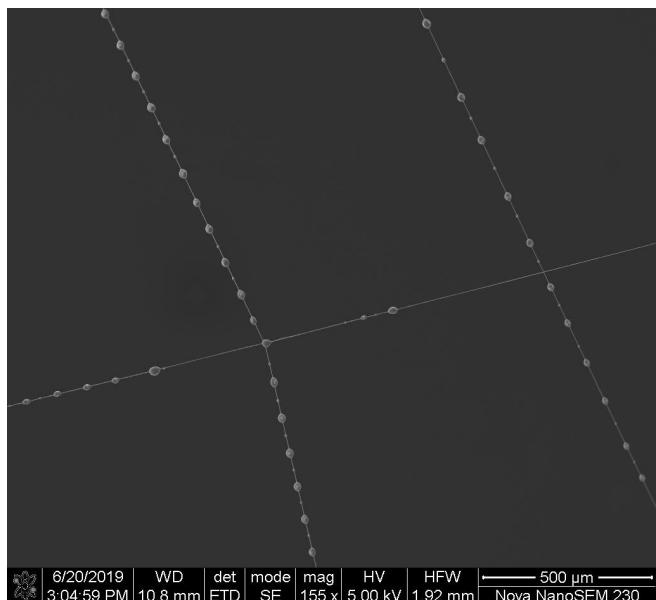


Abbildung 21

Abb. 22 & Abb. 23: Ein Fadengewirr am Gerüstfaden einer Gartenkreuzspinne.

AW: Hat dieser Knäuel eine spezielle Funktion oder ist er nur per Zufall entstanden?

RF: Aufgewickeltes Fadengewirr: Relativ dünne Fäden, die von einem Haftpunkt stammen könnten (piriforme Drüsen).

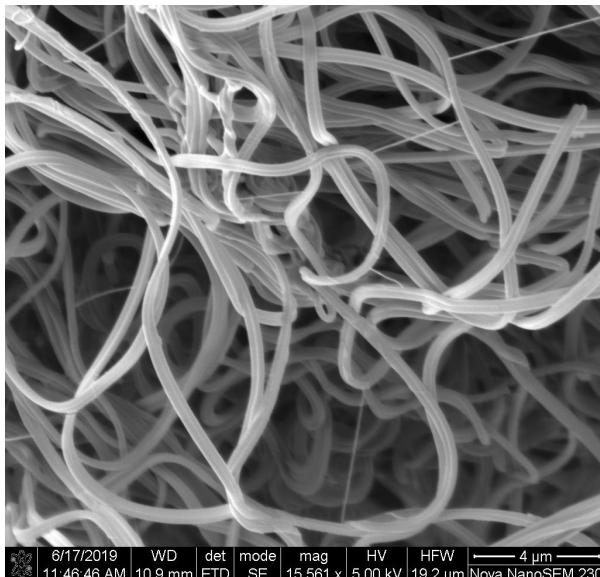


Abbildung 22

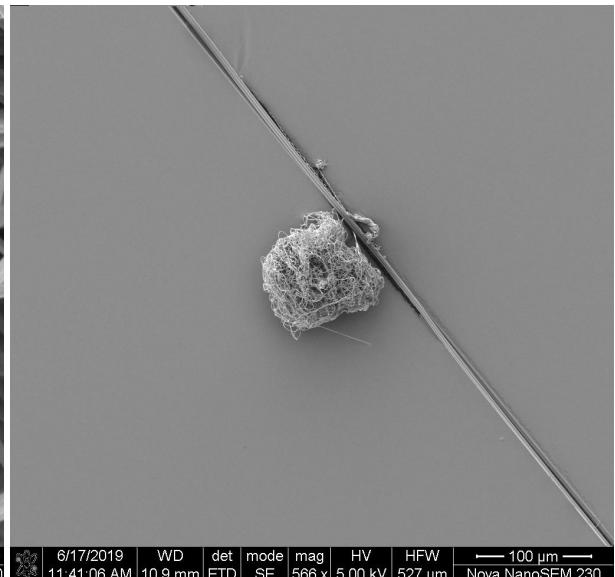


Abbildung 23

Abb. 24: Ein Insekten- oder Spinnenbein im Netz einer Gartenkreuzspinne.

AW: Wie kommt es zu diesem riesigen Klumpen? Benutzt die Spinne beim Sicherstellen der Beute eine grössere Menge Leim?

RF: Insektenbein mit grosser Leimkugel. Dieser dürfte aus vielen kleinen abgestreiften Leimtröpfchen entstanden sein.

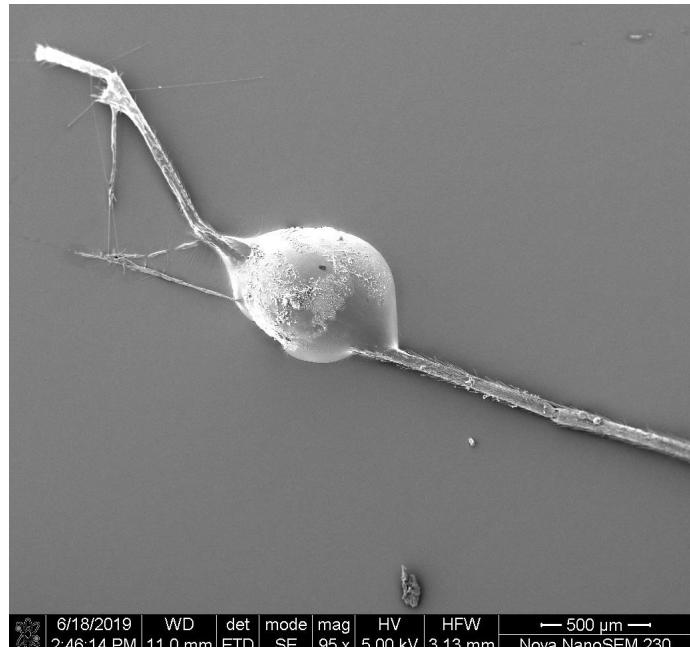


Abbildung 24

AW: Wie entstand Ihr Interesse an den Spinnen? Woher kam die Faszination?

RF: Mein Interesse an Spinnen geht auf drei Vorkommnisse zurück:

- in der Schule hörte ich von Versuchen mit Medikamenten (Drogen) an Spinnen, bzw. deren Einfluss auf das Netzmuster. Später gab es in der Hauszeitung von CIBA ("Image", 1966) einen wissenschaftlichen Artikel über Drogenversuche an Radnetzspinnen, der mich stark beeinflusst hat.
- Als junger Student stiess ich auf ein Buch von John Crompton "Die Spinne", das mich sehr faszinierte (obwohl vieles darin falsch war).
- ein junger Dozent an der Uni war Arachnologe und hielt eine Spinnen-Vorlesung, die ich sehr spannend fand.

AW: Gab es einen Höhepunkt in ihrer Forscherkarriere?

RF: Höhepunkte in meiner Forscher-Karriere:

- In meiner ersten wissenschaftlichen Arbeit an Spinnen in den USA konnte ich mit dem REM aufklären, wie sich eine Spinne im Netz festhält.
- In einer weiteren Arbeit entdeckte ich, dass Spinnen auf ihren Beinen Geschmackshaare besitzen, ganz ähnlich wie Insekten. Das war neu.
- Viel später habe ich an exotischen Geiselspinnen (*Amblypygi*) gearbeitet und bei diesen Riesen-Neuronen und ein Riesenfasersystem entdeckt. Beide waren durch viele synaptische Kontakte verbunden. Nach gängiger Theorie hätte das nicht sein dürfen, denn Synapsen sollten nur im ZNS (Ganglien) vorkommen, aber nicht im peripheren Nervensystem. Das mag für Insekten stimmen, aber nicht für Spinnentiere.

AW: Haben Sie eine Lieblingsspinne/ Spinnenart? Gibt es etwas an den Spinnen, was Ihnen besonders gefällt?

RF: Eine "Lieblingsspinne" habe ich eigentlich nicht. Aber Springspinnen sind sicher am attraktivsten - sie können den Betrachter anschauen und entsprechend reagieren. Besonders spannend sind natürlich die vielen cleveren Lösungen, welche Spinnen jeweils gefunden haben, um z. B. gewisse Probleme zu lösen:

- Wie kann man an glatten senkrechten Flächen (Glas) laufen?
- Wie kann man im trockenen Wüstensand eine Wohnröhre bauen?
- Wie entsteht ein Spinnennetz?

10 Fazit

Spinnenseide ist ein sehr dünnes biologisches Material, das aus Fibroinen (Faserproteinen) besteht. Sie weist eine hohe Elastizität und Reissfestigkeit auf und enthält zudem die drei Stoffe Nitrat, Phosphat und Pyrrolidon, die für ein steriles und hygroskopisches (Feuchtigkeit bindendes) Verhalten sorgen. Dank diesen spezifischen Qualitäten wird die Spinnenseide schon seit Jahrhunderten in der Humanmedizin verwendet. Auch ist Spinnenseide für den modernen industriellen Einsatz gefragt. Ihre Zugfestigkeit übersteigt diejenige von Gummi, Sehnen, Knochen oder auch Zellulose, und im Vergleich zu Nylon ist der Spinnenfaden leichter, fester und etwa doppelt so dehnbar.

Für den Bau ausgeklügelter Netze, entwickelten die Spinnen verschiedene Spinndrüsen, die jeweils unterschiedliche Fadentypen mit spezifischen Eigenschaften und Aufgaben produzieren. Dies geschieht entweder mithilfe einer Veränderung des Verhältnisses der Proteinsequenzen oder durch das Verändern des Wassergehalts. Je feuchter der Faden, desto elastischer wird er. Für den optimalen Beutefang besteht das Netz der Spinnen, das sowohl dehnbar als auch klebrig und stabil ist, entsprechend aus unterschiedlichen Fadentypen. Die Klebrigkeit eines Spinnennetzes röhrt von einer Klebesubstanz auf den Fangfäden her. Diese zieht sich zu kleinen Klumpen zusammen und ist viskoelastisch, sprich bei Kontakt mit langsam Bewegungen ähneln ihre Eigenschaften denen eines elastischen Klumpens, während sie bei schnellen Bewegungen denen von Leim gleichen. Spinnennetze haben sich im Laufe der Evolution an das Verhalten der Beutetiere sowie an die Bedürfnisse der Spinnen angepasst (Bsp. Leiternetz). Ein interessanter Vertreter ist das Netz der Radnetzspinnen (*Araneidae*) mit seinen unterschiedlichen Ausprägungen. Das Radnetz geht in der Entstehungsforschung auf zwei Spinnengruppen zurück: die Cribellatae und die Ecribellatae. Die Forschung ist sich dabei uneinig, ob es sich um eine Monophylie oder um eine parallele Entstehung handelt.

Die Grundform des Radnetzes besteht aus drei wesentlichen Elementen: den Rahmen- und Gerüstfäden an der Außenkante, den zum Netzzentrum (Nabe) zusammenlaufenden Speichenfäden sowie den klebrigen Fangfäden der Fangspirale. Die Stabilität liegt dabei nicht nur im Faden selbst, sondern auch im geometrischen Aufbau des Netzes, der es ermöglicht, die kinetische Energie des Beutetiers auf das ganze Konstrukt zu verteilen und anschliessend in Wärme umzuwandeln. Beim Errichten des Netzes geht die Spinne nach dem sogenannten Y-Schema vor. Das heisst, sie legt zuerst einen Brückenfaden an, von dem aus sie sich nach unten abseilt und dadurch eine Y-Form entstehen lässt. Danach zieht sie weitere Radialfäden, um später die Hilfs- und Fangspirale einzuziehen, wobei die nicht klebrige Hilfsspirale als provisorischer Entwurf der klebrigen Fangspirale dient. Da Radnetzspinnen je nach Art schon nach wenigen Tagen ein vollständiges Netz bauen können, ist es naheliegend, dass der Netzbau im zentralen Nervensystem (ZNS) einprogrammiert ist und somit nicht erlernt wird. Nichtsdestotrotz sind Spinnen in der Lage, sich beim Netzbau an unvorhersehbare Komplikationen, wie beispielsweise das Entfernen mehrerer Speichenfäden, anzupassen und nicht nur instinktiv nach Plan vorzugehen.

11 Schlusswort

Rückblickend freue ich mich, diese vielseitige Arbeit geschrieben zu haben. Ich konnte meinen Horizont in verschiedenen Bereichen erweitern, sei es in Bezug auf Spinnenseide, den Netzbau oder auch auf die Benützung eines Elektronenmikroskops.

Anfangs tat ich mich eher schwer, ein Thema für meine Arbeit zu finden. Dabei mangelte es mir keineswegs an Ideen. Im Gegenteil, das Problem lag mehr darin, mich für ein Themengebiet festzulegen. Meine Interessen erstrecken sich über eine grosse Bandbreite und dementsprechend boten sich mir auch einige spannende Themen an, die sich für eine Maturaarbeit geeignet hätten. So kam mir noch während des Arbeitsprozesses hin und wieder der Gedanke, ob ich denn die richtige Wahl getroffen habe. Im Nachhinein bin ich aber überzeugt davon, dass diese Zweifel weniger mit dem Thema zu tun hatten, als mit dem Respekt vor den komplexen Inhalten.

Die wohl wichtigste Erfahrung, die ich dank meiner Maturaarbeit machen durfte, ist das Schülerpraktikum im Nano Imaging Lab des Departement Physik der Uni Basel. Nicht nur erhielt ich einen Einblick in die Arbeitswelt der Forschung, ich durfte vielmehr selbstständig verschiedene Mikroskope für meine eigene Forschung benutzen. Dabei genoss ich ein sehr fürsorgliches und angenehmes Arbeitsklima, das mir ungemein zusprach.

Zum Schluss möchte ich meinem betreuenden Lehrer Armin Kaspar und meinem Koreferenten Marc Schumann herzlich für ihre Unterstützung danken.

12 Literaturverzeichnis

12.1 Bücher & Artikel

- Bellmann, Heiko: Der Kosmos Spinnenführer. Über 400 Arten Europas. Stuttgart ¹2010.
- Bellmann, Heiko: Kosmos Atlas Spinnentiere Europas. Stuttgart ³2006.
- Brunetta, Leslie/ Craig, Catherine: Spider Silk. Evolution and 400 Million Years of Spinning, Waiting, Snagging and Mating. New Haven 2010.
- Coddington, Jonathan: The Genera of the Spider Family Theridiosomatidae. Washington 1986.
- Dalton, Stephen: Spinnen. Die erfolgreichen Jäger. Bern 2009.
- Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015.
- Gross, Michael: Von Geckos, Garn und Goldwasser. Die Nanowelt lässt grüßen. Weinheim ¹2012.
- Herberstein, Marie: Spider Behaviour. Flexibility and Versatility. Cambridge 2011.
- Kassianidou, Elena et al.: Deciphering structural and functional properties of mammalian cells. Departement Physik der Uni Basel (Block Course HS 2019 – Structural Biology and Biophysics). 2019.
- Kermer, Bruno: Das grosse Kosmos-Buch der Mikroskopie. Stuttgart ³2015.
- Koch, Markus: VUV-Laserablation von Spinnenseide. Kassel 2005.
- Lubin, Yael et al.: Orb Plus Cone-Webs in Uloboridae (Araneae), With a Description of a New Genus and Four New Species. In: Psyche: A Journal of Entomology. Band 89 (1982) Heft 1-2.
- Zschokke, Bernhard: Web construction behaviour of the orb waving spider Araneus diadematus Cl. Basel 1994.

12.2 Internetquellen

Scheibel, Thomas: Proteinfasern. Spinnenseide – was Spiderman wissen sollte.
https://www.biospektrum.de/blatt/d_bs_pdf&_id=981493 (15.8.2019).

https://www.epo.org/learning-events/european-inventor/finalists/2018/scheibel_de.html (18.8.2019).

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/cribellatae/15711> (14.08.2019).

https://www.youtube.com/watch?v=KCZF_05fPzo (18.8.2019).

13 Abbildungsverzeichnis

Titelbild: <https://www.die-waldfrau.de/dein-krafttier/symbolik/spinne/> (20.09.2019).

Abb. 1: Ackerschott, Christian: Charakterisierung rekombinanter Flagelliform-Spinnenseidenproteine. München 2007. S.10.

Abb. 2: Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 174.

Abb. 3: Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 175.

Abb. 4: Bellmann, Heiko: Der Kosmos Spinnenführer. Über 400 Arten Europas. Stuttgart ¹2010. S. 130.

Abb. 5: Eigene Darstellung.

Abb. 6: <https://www.helles-koepfchen.de/artikel/828.html> (12.09.2019).

Abb. 7: <https://www.theatlantic.com/science/archive/2019/05/hyptiotes-a-spider-that-makes-a-spring-loaded-web/589303/> (12.09.2019).

Abb. 8: Bellmann, Heiko: Der Kosmos Spinnenführer. Über 400 Arten Europas. Stuttgart ¹2010. S. 155.

Abb. 9: Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 178.

Abb. 10: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Cyrtophora.citricola.net.7626.jpg> (12.09.2019).

Abb. 11: Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 186.

Abb. 12: Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 187.

Abb. 13: Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 199.

Abb. 14: Foelix, Rainer: Biologie der Spinnen. Frankfurt am Main ³2015. S. 195.

Abb. 15: Eigene Darstellung.

Abb. 16: Eigene Darstellung.

Abb. 17: Eigene Darstellung.

Abb. 18: Eigene Darstellung.

Abb. 19: Eigene Darstellung.

Abb. 20: Eigene Darstellung.

Abb. 21: Eigene Darstellung.

Abb. 22: Eigene Darstellung.

Abb. 23: Eigene Darstellung.

Abb. 24: Eigene Darstellung.