

# NATURWISSENSCHAFTLICHE RUNDSCHAU

SONDERDRUCK

Redaktion Hans Rotta, Stuttgart, und Roswitha Schmid, München

Die NATURWISSENSCHAFTLICHE RUNDSCHAU erscheint monatlich. Bestellungen nimmt jede Buchhandlung des In- und Auslandes, die Post oder der Verlag entgegen. In den Ländern Belgien, Dänemark, Großbritannien, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Portugal, Schweden, der Schweiz und der Vatikanstadt ist der Bezug durch die Post ebenfalls möglich. *Bezugspreis*: jährlich DM 82.—. Einzelheft DM 8.00. Ermäßigter Bezugspreis für Mitglieder der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, Studenten, Assistenten, Referendare und Schüler jährlich DM 65.60.

**Probeheft: kostenlos durch den Verlag.**

Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft m. b. H., Birkenwaldstraße 44, Postfach 40, 7000 Stuttgart 1.

# Spinnennetze: Plan und Baukunst

Joseph Westley Burgess und Peter N. Witt, Raleigh, USA

„Alle Dinge in der Natur haben eine Gestalt“, sagt Sullivan, „in anderen Worten eine Form, eine äußere Erscheinung, die uns wissen läßt, was sie sind und die sie von uns und untereinander unterscheidet...“ „Sei es der schwungvolle Adler im Fluge oder die offene Apfelblüte, das schuftende Arbeitsroß, der wohlgenute Schwan, die sich ausbreitende Eiche, treibende Wolken und über allem die kreisende Sonne; Form folgt immer der Funktion, und das ist das Gesetz“ [11].

Die Vereinigung von Denkweisen aus verschiedenen Fachbereichen wie Architektur und Technik mit biologischem und ethologischem Gedankengut kann helfen, die Ursachen für viele der Verschiedenheiten in Spinnennetzen aufzuklären. Und die Analyse von Spinnennetzen kann uns über die optimalen Formen für die Konstruktion von Gebäuden belehren.

Wenn ein Architekt ein Haus plant, muß er die verschiedensten Ansprüche berücksichtigen. Einmal wird die Lage die Struktur beeinflussen; zum Beispiel können Umweltbedingungen einen geschlossenen oder offenen Entwurf notwendig machen. Zugleich bildet das Gebäude einen unabtrennbaren Teil seiner Umgebung; und die Umgebung kann so weit verändert werden, daß zukünftige Gebäude in der Nähe entsprechend angepaßt werden müssen. Es bedeutet auch einen großen Unterschied, ob Gebäude für langen Gebrauch beabsichtigt sind, oder ob sie nach wenigen Tagen wieder abgebaut werden sollen.

Sparsamkeit mit Material und Arbeitskraft beeinflussen die Planung für ein Gebäude, und das vorhandene Material entscheidet über die mögliche Weite, Höhe und Form der Räume. Menschliche Bauwerke zeigen eine weite Variation in Größe: Diese hängt davon ab, ob sie von einer Person, einer Familie oder von einer großen Anzahl von Menschen bewohnt werden sollen. Wenn sie hauptsächlich als Unterkunft dienen sollen, muß ihre Form anders sein als wenn sie Büros und Produktionsstätten beherbergen sollen. Getrennte Baueinheiten werden dann durch Transportnetze von Verbindungsstraßen und Eisenbahnen zusammengefügt.

Spinnen leben wie Menschen in selbstgebauten Strukturen. Selbst dem oberflächlichen Beobachter fällt die große Verschiedenheit in Spinnennetzen auf. Nahe dem Boden bemerkt man tuchförmige Netze oder Labyrinth aus dicht verflochtenen Seidenfäden; im hohen Gras und in Büschen befinden sich kunstvoller gebaute, dreidimensionale Strukturen; und oben in den Bäumen sind oft die wunderschönen, geometrischen Radnetze zu erkennen. Einige Netze bilden die Wohnung eines einzelnen Tieres, andere stellen den Zufluchtsort für eine Mutter mit ihren Jungen dar, und wieder andere bilden ausgedehnte Gemeinschaftsunterkünfte für Hunderte von Individuen.

Viele verschiedene Funktionen werden Spinnennetzen zugeschrieben: Einige der bekannteren sind Kommunikationsnetzwerk, Verbindungsweg, seidene Falle, Schutzstruktur und Substrat für die Paarung. In einigen Fällen haben Versuche die Funktion eines Strukturteiles aufgeklärt, in anderen können wir die Funktion nur erraten. In speziellen Netzen ist der klebrige Fangfaden säuberlich vom trockenen Gerüstfaden getrennt. Signalfäden verlaufen oft ohne Unterbrechung durch offene Netzsektoren, um die ungedämpfte Übertragung von Informationen zu ermöglichen.

Die Resonanzeigenschaften von Netzen filtern unzuverlässige Signale aus, und besondere Netzmuster dienen der Informationsausbreitung in viele Richtungen, so daß zahlreiche Tiere für den Angriff auf sehr große Beute zusammengerufen werden können. Radnetze und Fadengewirre können zusammengebaut werden, so daß eine zusammengesetzte, zweckmäßige Unterkunft für eine kleine Gruppe von Spinnen entsteht. Breite, undurchsichtige Seidenbänder beschützen die Baumeister vor den Blicken feindlicher Räuber. Und das gemeinschaftliche Fadengewirr, das einige Spinnenbabies bauen, schafft eine vorteilhafte Umgebung für ihr Heranwachsen.

Wir postulieren, daß jedes Strukturdetail eines Netzes letzten Endes als Teil eines Überlebensplanes des Baumeisters verstanden werden kann, ein Plan, der ihm erlaubt, sich in seiner besonderen Umgebung zu behaupten. Ferner glauben wir, daß der Vergleich zwischen Spinnen und menschlicher Baukunst (Abb. 1) uns erlauben wird, Grundeigenschaften des Bauplanes zu identifizieren, die in den beiden sonst so verschiedenen Gruppen von Lebewesen ähnlichen Zwecken dienen, und daß dadurch die Weisen aufgezeigt werden können, in denen beide Lebewesen ihre Umgebung verändern.

---

Joseph Wesley Burgess (geb. 5. März 1952) ist Doktorand an der North Carolina State University und arbeitet in Witts Laboratorium über soziale Spinnen.

Prof. Dr. med. Peter N. Witt (geb. 20. Oktober 1918) ist Direktor der Mental Health Research Section des North Carolina Department of Human Resources, Professor für Pharmakologie an der University of North Carolina und Professor für Zoologie an der North Carolina State University. 1956 veröffentlichte er das Buch „Die Wirkung von Substanzen auf den Netzbau der Spinne als biologischer Test“ und 1968 „A Spider's Web“, beide im Springer-Verlag. — Der vorliegende Beitrag basiert auf einer Publikation in englischer Sprache: Spider Webs: Design and Engineering, in *Interdisciplinary Science Reviews* 1, 322 (1976). — Die Autoren danken R. Daniels, M. Scarboro, E. H. Williams, C. F. Reed, R. Jackson und der National Science Foundation für Unterstützung und Hilfe.

J. Wesley Burgess, Peter N. Witt, M. D., N. C. Division of Mental Health, Research Section, Box 7532, Raleigh, N. C. 27611/USA.



**Abb. 1.** Auf diesem holländischen Stich aus dem 16. oder 17. Jahrhundert sieht man eine Gruppe von Männern bei der Diskussion eines Stadtplanes, während sie ein Spinnennetz betrachten. Die symmetrische Radstruktur des Netzes kann man in vielen Stadtplänen wiederfinden, wie zum Beispiel in dem des Place de l'Etoile in Paris oder dem Platz in Karlsruhe, wo die Hauptstraßen vom zentral gelegenen Schloß des Fürsten ausstrahlen. Solche Stadtpläne erlauben der Regierung, die Bürger durch im Zentrum aufgestellte Kanonen zu kontrollieren, ähnlich der Kontrolle, die eine Spinne im Netzzentrum durch vibrierende Radien ausübt.

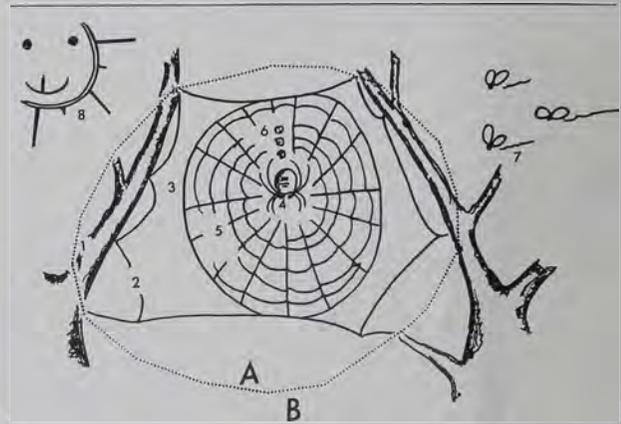
## Der Bauplatz

Bei der Betrachtung des Menschen erscheint uns oft das Individuum als in sich ruhende Einheit. Tatsächlich sind Menschen nicht autonom, sondern bilden mit ihren Organisationen und Unterkunftsstrukturen ein ganzes System, in dem kein Teil entbehrlich ist. Wie vollständig ist ein einzelner Mensch tatsächlich, wenn wir ihn von seinen Mitmenschen und von seinem Heimatlande isolieren? In ähnlicher Weise kann ein Bauernhof zum Beispiel nicht funktionieren, wenn der Bauer, seine Familie oder das Vieh abwesend sind. Vergleichsweise ist es nutzlos, über eine Spinne ohne ihr Netz oder über das Netz ohne Spinne zu diskutieren.

Die beinahe blinde Spinne ist ohne ihr Netz hilflos, unfähig, Beute zu fangen oder diese zu erkennen, ohne daß Vibrationssignale übertragen werden [2]; und die hakenbewehrten Füße, die dem Hängen am seidenen Faden angepaßt sind, rutschen auf glatten Oberflächen aus. Umgekehrt kann ein leeres Netz weder Beute fangen noch festhalten, und es verfällt in kurzer Zeit. Es gibt sogar noch ein direkteres Band zwischen Spinne und Netz: Seide wird vom Körper ausgeschieden, und einige Arten essen die Seide nach einer Weile wieder auf, so daß sie ein Teil der Körpersubstanz wird. Radnetzspinnen fressen tatsächlich ihre Netze regelmäßig und sondern 95% des gleichen Materials am nächsten Tag wieder als Seide ab

[20], indem sie einfach Aminosäuren in zweckmäßiger Weise in den Körper hinein- und wieder herausbefördern.

Aus all solchen Gründen betrachten wir Netz und Spinne (und den Plan) als ein zusammengehöriges System. Die Netz-Spinnen-Einheit kann als Ganzes überleben; sie bildet einen Teil des allgemeinen Austauschsystems von Energie und Baustoffen, was wiederum das Studienobjekt des Biologen darstellt. Besondere Produkte können innerhalb des Komplexes übertragen werden, wie zum Beispiel das Baumaterial des Netzes, das ausgeschieden und wieder gefressen wird.



**Abb. 2.** Das Baugelände, wie es durch den Netz-Spinnen-Komplex von *Araneus diadematus* definiert wird. — A: Netzraum. — B: Raum außerhalb des Netzbereiches. — Teile des Netz-Spinnen-Komplexes: 1: Strukturelemente der Umgebung, die von der Natur zur Baustelle beigetragen werden; sie tragen potentielle und kinetische Energie zum Komplex bei. — 2: Pufferzone, die den Austausch mit dem Außennetzraum abfedert und filtert. — 3: Netzaufhängung; ein langfristiger Strukturteil, der Stoffwechselenergie speichern kann. — 4: Eigentlicher Spinnenraum, wo die Spinne lebt und wo Stoffwechselenergie aufbewahrt werden kann; ständiger Materialverlust vom Körper. — 5: Das eigentliche Netz, kurzfristiger Teil der Struktur, der Stoffwechselenergie aufbewahren kann. — 6: Aufbewahrte Beute, Speicher von Stoffwechselenergie; teilweiser Verlust durch Abbau. — 7: Beutequelle, die Stoffwechsel- und kinetische Energie einbringt, Substanz beisteuert. — 8: Weitere Umgebung, Quelle von Material- (z. B. Wasser-) Nachschub, Wärmeenergie, Kühlung, kinetischer Energie (Wind) und Bereich verschiedener anderer Einnahmen und Verluste.

An der Grenze des Spinnen-plus-Netz-Ganzen findet ein Austausch mit der Umgebung statt, wie zum Beispiel die Einnahme von Nahrung und Sauerstoff und die Ausscheidung von Kohlenoxyd und Kot (Abb. 2). Eine solche Netz-Spinnen-Einheit kann man wieder mit einem Bauernhof vergleichen, auf dem Untereinheiten wie Weide, Kühe, Bauer zusammen funktionieren. Hier kann auch Austausch stattfinden, wenn zum Beispiel der Bauer die Kühe melkt oder Mist auf der Weide verteilt. Mit der weiteren Um-

gebung tritt der Bauer in Verbindung, wenn er Heu kauft oder Milch verkauft. Tatsächlich sind wir mit vielen solchen Systemen vertraut.

Eine Stadt für Menschen gebaut stellt öffentliche Dienste zur Verfügung: Müllabfuhr und Feuerwehr; auch liefert sie die notwendige Elektrizität. Der Austausch von Energie und Materialien findet innerhalb des Bürger-Stadt-Komplexes statt. Für Nahrungsmittel und Telefon hingegen ist eine Stadt vom Austausch mit Anderen außerhalb ihrer Grenzen abhängig. Wenn wir die Funktionen einer Stadt in eine einzige riesige architektonische Struktur zu integrieren versuchen, wie Paolo Solaris es vorschlägt, schaffen wir etwas, was einer Spinnenkolonie auffallend ähnlich sieht. Aber selbst innerhalb eines solchen Systems gibt es keine unabhängigen Einheiten. Feuerwehr, Feuer, Löschwagen, Gebäude, Nahrung und Feuerwehrleute formen voneinander abhängige Teile eines Komplexes, der sich erfolgreich erhält und seine Teile mit der Zeit auswechselt.

Beide, Netz-plus-Spinne und Land-plus-Stadt, müssen nicht nur in ihren Teilen vollständig sein; sie können nur an einer günstigen Stelle reibungslos funktionieren; es gibt einen *richtigen* Standort. Wenn Ökologen über „Ortswahl“ oder „Ortsnutzung“ bei Spinnen und anderen Tieren sprechen, denken sie im allgemeinen an den Ort als eine Quelle materiellen Nachschubs. Wir im Gegensatz ziehen es vor, ein weiteres Spektrum von Austausch zwischen einem Organismus und seiner Umgebung in Betracht zu ziehen (Abb. 2).

Dies erlaubt es, Schwierigkeiten bei der Diskussion des Netz-Spinnen-Komplexes zu vermeiden, denn Spinnen können ihren Haushalt buchstäblich in der Luft begründen. G. C. Argon [1] fordert als einen Begriff für Entwürfe, daß „durch Verbindung einer Anzahl von Punkten im Raum mit ununterbrochenen Strängen das Objekt einen Platz beansprucht und seine Existenz im freien Raum schafft“. Vom Standpunkt des Bauplanes ist alles das, was wir in Netzen untersuchen, ein Ergebnis ihrer Schaffung durch die Beanspruchung eines Platzes, und dies steht in keiner Beziehung mehr zu dem ursprünglich unbenutzten Raume, außer dadurch, daß der Raum die Grundlage bildet, auf der ein neues Objekt geschaffen wird: das Netz. Der Grund dafür ist, daß alle Anforderungen, die jeder Spinnen-Netz-Komplex an die Lage stellt, ob strukturell (starke Äste, eng zusammenliegende Stützen oder weite Räume zwischen Blättern) oder biologisch (Regenwasser, Sonnenschein, Beutevorrat), erst realisiert werden, nachdem die Struktur selber errichtet ist.

Im Zusammenhang damit wird der erste Schritt in der Netzbaustrategie die unmittelbare Umgebung gleich verändern. Andere Tierarten mögen fürs Überleben auf physiologische oder morphologische An-

passungen ihres Körpers angewiesen sein; Spinne und Mensch passen sich dagegen hauptsächlich dadurch an, daß sie nicht den Körper, sondern ihre Umgebung verändern. Die Veränderung der Umgebung kann durch aktive Suche der Spinne geschehen [26, 7] oder dadurch, daß natürliche Auslese auf eine große Zahl mehr oder wenige zufällig verteilter Nachkommenschaft einwirkt. Ein *Araneus diadematus*-Weibchen kann bis zu 1000 Junge hervorbringen, und die wenigen, die davon das Erwachsensein erleben, sitzen in voraussagbaren Stellen im Laub. Es ist möglich, daß sie solche Stellen aktiv aufgesucht haben; oder sie haben sich wahllos verteilt, und nur diejenigen, die eine günstige Position gefunden haben, überlebten. Die Verteilungsmethode ist jedenfalls unwichtig für unsere Überlegungen, denn das Resultat ist das gleiche.

Die Radnetze von *Araneus diadematus* sind hauptsächlich in Bäumen und Büschen zu finden, und das gleiche gilt für die Tuchnetze von *Mallos gregalis* [6], während *Cyrtophora*-Netze bis zu 200 cm vom Boden auf Opuntien und Agaven befestigt sind [29]. *Metepeira*-Netze befinden sich speziell in blattlosen, offenen Räumen innerhalb eines Busches oder Baumes [17]. Wo auch immer der Standort oder wie er auch gewählt wird, das Endresultat ist für jede Tierart die Trennung zwischen Netz und netzfreiem Raum. Man kann sich die Welt aus verschiedenen Standorten bestehend vorstellen, wobei alle Wirtspflanzen, Höhen und Lagen ausgenützt sind, so daß jeweils verschiedene Arten nebeneinander leben. So sieht es tatsächlich in der Natur aus: Elegant ineinander verzahnte Systeme ergänzen einander, so daß alle Nischen ausgefüllt sind und jede Tierart ihre Scheibe des biologischen Kuchens abbekommt. Man kann einen Vergleich mit der Aussicht eines Flugzeugpassagiers auf die Erde hinunter ziehen: Die Landschaft erscheint säuberlich in Höfe, Städte und Wälder unterteilt, wobei Straßen die verschiedenen Komponenten vereinigen. Solche Parallelen werden mit zunehmender Häufigkeit erscheinen, wenn wir das Gefüge der Spinne mehr im Detail betrachten.

## Das Netz der Spinne

*Bestandteile.* In dieser Übersicht werden wir die folgenden Bezeichnungen für Netzteile benutzen: Das *geometrische Radnetz* bezeichnet eine zweidimensionale Speichenstruktur. Es besteht aus Radien, die von einer Nabe ausstrahlen; die Radien werden von Spiralumgängen überquert, und sie enden in der Peripherie an einem vieleckigen Rahmen. Die Fläche, die von der Spirale bedeckt ist, ist oft mehr elliptisch als rund, und die Nabe liegt meistens

nicht genau im Zentrum. Alle uns bekannten Radnetze sind nur für kurzdauernden Gebrauch gebaut, und sie werden nach ein paar Tagen entweder repariert oder neu gebaut. Die Bauzeit ist kurz: Sie beträgt eine bis wenige Stunden. Zwei verschiedene Vorgehen sind für den Bau des Radnetzes beschrieben worden:

Beim senkrechten Netz des *Araneus-Typs* werden alle oder beinahe alle Radien zuerst gebaut, wobei die Mehrzahl von der Nabe zum Rahmen durchläuft; danach wird die Spirale quer über die vollendete Radienstruktur von außen nach innen gelegt (Abb. 3). Unter dem Mikroskop sehen die meisten Kreuzungsstellen der Fäden wie untrennbar zusammengeschnitzene Verbindungen aus. Die Maschen des senkrechten Radnetzes sind rechteckig. In den *Araneus*-Netzen sind die Spiralen von Klebtropfen bedeckt, während Radien aus trockener Seide bestehen [33].

Im *Cyrtophoranetz*, das eine zusammengesetzte Struktur besitzt, ist das horizontale Rad nur einer von mehreren Bestandteilen. Beim Bau des Rades werden zuerst nur ein paar Radien (10 bis 20) gespannt, und zusätzliche Radien entstehen während des Spiralbaues, der von innen nach außen erfolgt; am Rahmen kann man am Ende 300 bis 500 Radien zählen. Kullmann [12] erläutert die Konstruktionsfolge in besonders klarer Weise. Maschen in diesen Netzen sind sechseckig, da Radien und Spiralfäden eine kurze Strecke lang zusammen verlaufen (Abb. 4 E).

Das *Tuchnetz* ist ein zweidimensionales Bauwerk, das keine Symmetrie erkennen läßt. Es kann flach liegen oder schüsselförmig gebogen sein und besteht aus langen Fäden, die häufig unbefestigt einander kreuzen. Das Tuch kann ovale Löcher enthalten, deren Ränder durch extra Fäden verstärkt sind; aber sonst ist das Gebilde gleichförmig ohne deutliche Unterteilungen. Alle uns bekannten Tuchnetze sind für langdauernden Gebrauch bestimmt, und sie werden periodisch über längere Zeitspannen hin erneuert.

Das *Raumnetz* ist dreidimensional und kann entweder allein oder in Kombination mit einem Rad oder Tuch vorkommen. Raumnetze zeigen keine klar abgegrenzten Struktureinheiten; aber während des Baues wird viel Sorgfalt darauf verwandt, die Spannung in allen Richtungen gleichmäßig zu verteilen [10]. Raumnetze zeigen gewebte Teile, in denen kurze Fadenstücke in Y-Strukturen zusammengeschnitten sind; in anderen Teilen der Raumnetze finden wir weitoffene Lücken, die nur von wenigen Seidenfäden durchkreuzt werden. Im allgemeinen findet der Bau von Raumnetzen über viele Tage hin statt; das gleiche Netz wird wochen- und monatelang benutzt, manchmal sogar während der ganzen Lebenszeit der Baumeister. Viele Raumnetze formen

die Grundlage für das Gemeinschaftsleben der Bewohner und dienen dem gemeinsamen Beutefang.

Ein oder mehrere der eben beschriebenen Typen erscheinen in jedem der vier Netze, die wir zur Besprechung ausgewählt haben, und in den meisten anderen bekannten Spinnennetzen. Es sollen hier nicht die weitverbreiteten, ausschließlich tuchförmigen Netze der Lynphiiden diskutiert werden, die bei Betrachtung einer taubedeckten Wiese so stark auffallen, und wir lassen zum Beispiel auch das „Einfadennetz“ aus, das von der Bolaspinne in dauernder Bewegung gehalten wird.

### Beispiele verschiedener Netze

Wir werden 4 Netztypen betrachten: Das *Araneusnetz* (Abb. 3) ist das Vorbild für alle Netze derjenigen Spinnenarten, die alleinstehende, senkrechte Radnetze bauen. All diese Netze sind geringe Varia-

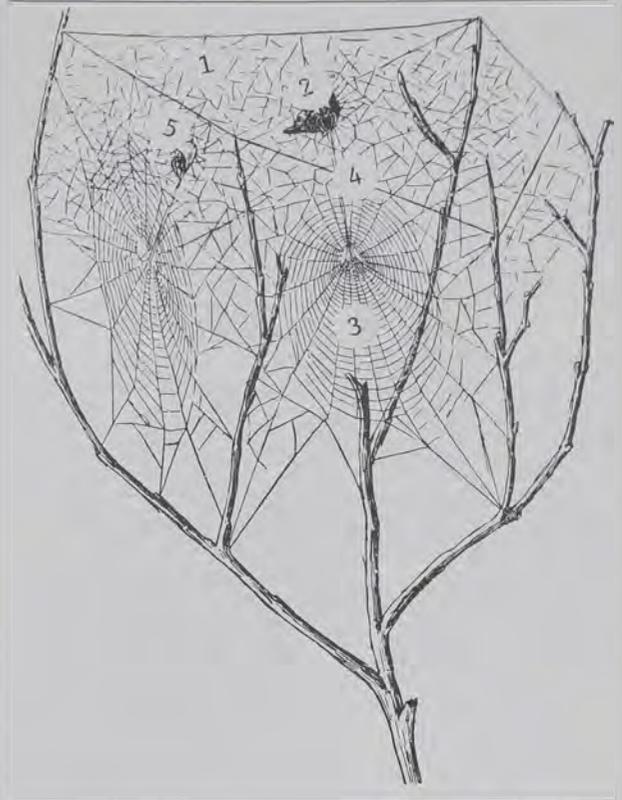


**Abb. 3.** Dieses geometrische Radnetz eines erwachsenen Weibchens von *Araneus diadematus* (Kreuzspinne) wurde in einem Rahmen im Laboratorium in ungefähr 30 min gebaut. Die Erbauerin sitzt auf der Nabe und hält mit ihren 8 Beinen die Radien straff. Die senkrechten Fäden im Maßstab in der linken oberen Ecke waren ursprünglich 20 mm voneinander entfernt und hängen senkrecht, um die Richtung der Schwerkraft anzuzeigen; dies ist ein typisches senkrechtes Radnetz. Ein kleiner Holzwinkel war vorsätzlich in der unteren rechten Ecke des Rahmens angebracht worden: Die Spinne, die gezwungen war, den Bauplatz zu benutzen, hat deutlich den Spiralbau verändert, wo er den Winkel überschritten hätte.

tionen des Hauptthemas: ein Gerüst aus Radien, das von einer sogenannten Fangspirale bedeckt ist. Das fertige Netz ist besonders schön anzusehen. Es zeigt eine logarithmische Abnahme der Spiralzwisehräume von der Peripherie zur Mitte, und im allgemeinen sind die Radienwinkel oben weiter als unten [21]. Die Spiralfäche ist oval, mit der längeren Achse in senkrechter Richtung; und die Spirale zeigt kreisförmige und Pendelumgänge. Im Zentrum befinden sich Nabe und offene Zone, am Rand die unregelmäßigen Rahmenfäden.

Der Rahmen ist an Ankerfäden aufgehängt, die eine Pufferzone zwischen Strukturelementen der Umgebung, wie Zweigen und Mauern, und den Spinalfäden bilden; die Form variiert weit von Netz zu Netz. Der alleinige Netzbewohner sitzt entweder in der Nabe oder in einem Unterschlupf außerhalb des Netzes, wobei er einen Signalfaden, der zur Netzmitte verläuft, berührt. Netze von *Araneus diadematus* Cl. (auch Kreuzspinne genannt) sind am besten erforscht und vermessen (eine neuere Übersicht über *Araneus*-Netzliteratur siehe in [33]).

Netze von *Metepeira* (Abb. 4 und 5) sind zusammengesetzte Gebilde, die von der weltweit verbreiteten Spinnenfamilie gebaut werden. Besonders zwei Arten, *M. labyrinthica* und *M. spinipes*, leben in Gruppen und arbeiten zusammen [17, 22]. In den Netzen kann man fünf deutlich verschiedene Strukturelemente erkennen, die verschiedene physikalische Eigenschaften haben; diese unterscheiden sich voneinander durch unterschiedliche Arten von Spinnseide aus verschiedenen Drüsen und durch Verschiedenheiten im Fadenziehverhalten. Die Strukturelemente sind: Raumnetz, Schlupfwinkel, Radnetz, Signalfaden und Eierkokon. Jedes ist deutlich erkennbar, und alle werden in vorbestimmter Reihenfolge



**Abb. 4.** Das zusammengesetzte Netz einer *Metepeira*. Zuerst wird das Raumnetz (1) oben gebaut, an dessen unteren Ende die Spinne im Schlupfwinkel (2) sitzt; darunter befindet sich das Radnetz (3) mit Signalfäden zur Spinne (4); über dem Schlupfwinkel sind bei erwachsenen Weibchen gewöhnlich Eierkokons (5) in Lagen aufgebaut. Dies ist ein Holzschnitt aus McCook 1889 [17]. Netzeinheiten können für das Leben in Kolonien dicht zusammengebaut werden.



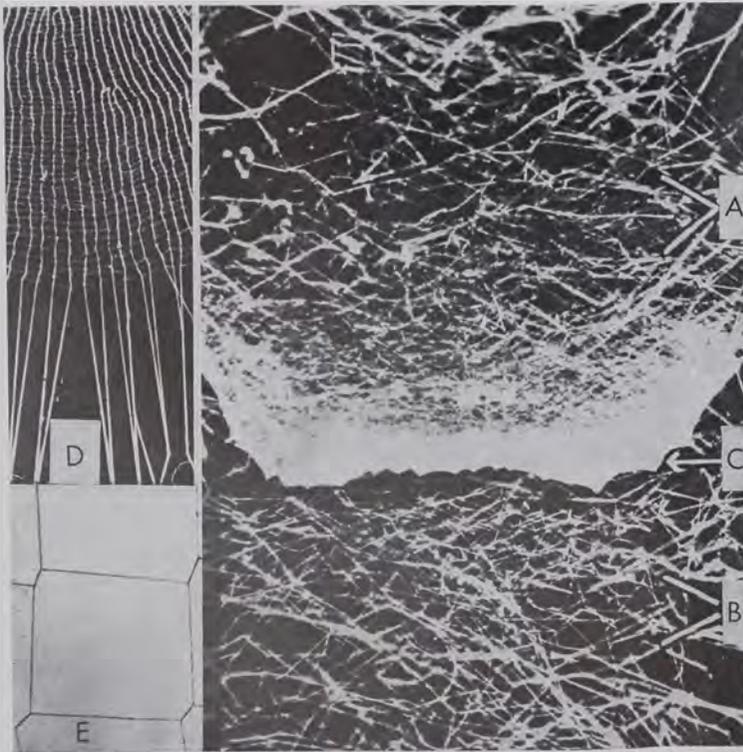
**Abb. 5.** Rechts und links sind Schlupfwinkel-Eierkokon-Kombinationen zu sehen, in denen sich *Metepeira spinipes*-Weibchen aufhalten, die Netze mit gemeinsamen Fäden zusammen gebaut haben. Zusammenarbeit findet nur auf dem langfristigen Raumnetz statt, während Beute von Einzeltieren in oft erneuerten „persönlichen“ Radnetzen gefangen wird. In der Natur bauen viele *Metepeira spinipes* zusammen eine Netzkolonie, wobei sie gemeinsam einen Standplatz bewohnen. Die Zahlen bezeichnen die gleichen Teile wie in der Abbildung 4.

gebaut. Die Radstruktur von *Metepeira* und *Araneus* ist die gleiche. Viele *Metepeira* können gemeinsam einen zusammengesetzten Netzkomplex bewohnen, wobei einzelne Individuen eigene Schlupfwinkel und Radnetze bauen.

Ein weiterer Typ ist das *Cyrtophoranetz* (Abb. 6); die Netze von *C. citricola* und *C. moluccensis* scheinen die gleiche Struktur zu besitzen und sind von Wiehle (1928), Kullmann (1958), Blanke (1972) und Lubin (1973) beschrieben worden. Die Struktur ist dreidimensional mit drei deutlich unterscheidbaren

netze sind durch ihre Raumnetze und gemeinsame Befestigungsseile miteinander verbunden. In diesen großen Gemeinschaften sind die Netznaben in der Mitte mindestens 15 cm voneinander entfernt; einzelne Tiere tauschen oft Netze untereinander aus.

Schließlich betrachten wir das Netz von *Mallos gregalis* (Abb. 7). Diese winzigen Spinnen aus Zentralmexiko leben zu Tausenden zusammen. Eine Kolonie besteht aus einem zusammenhängenden Riesenetz, auf dem alle Mitglieder gesellschaftlich zusammenleben, zusammen Beute fangen und in Gruppen



**Abb. 6.** Netz von *Cyrtophora citricola* (leicht verändert nach [12]). **A** bezeichnet das obere Raumnetz, das gegen die Mitte hin dichter wird. **B** bezeichnet das untere Raumnetz, das nach oben hin weitmaschiger gebaut ist. In der Mitte bildet das schüsselförmige, horizontale, geometrische Radnetz **C** die Trennfläche zwischen oberem und unterem Netz; die Unterseite des Radnetzes bildet die Rennfläche für die Spinne, und die Oberseite fängt fallende Beute auf. In **D** sieht man einen Teil des Radnetzes von oben, wobei gegen die Peripherie hin (hier unten) die Zahl der Radien stark zunimmt. **E** zeigt eine Netzmasche in starker Vergrößerung und läßt die sechseckige Form erkennen.

Unterabteilungen: je ein Raumnetz unten und oben, von einem horizontalen Radnetz voneinander getrennt. Der obere Teil besteht aus einem dreidimensionalen, unregelmäßigen Maschenwerk, das gegen das Rad hin dichter wird. Ein horizontales Radnetz in der Mitte hat im Gegensatz zu den Netzen von *Araneus* und *Metepeira* eine große Zahl unvollständiger Radien. Das flache Radnetz ist durch starke senkrechte Fäden so verzogen, daß es schüsselförmig mit erhöhter Mitte erscheint. Direkt unter dem Rad ist ein verhältnismäßig offenes Gebiet, das dem alleinigen Bewohner erlaubt, schnell hin und her zu laufen. Meistens sind viele Netze zusammengebaut (zum Beispiel 200 [15]) und bilden eine Kolonie. Die Einzel-

fressen. Die Netzoberfläche sieht grau aus, mit Ausnahme der neuesten Teile, die weiß erscheinen. Das dreidimensionale Gebilde hat drei deutlich verschiedene Strukturelemente: die Oberfläche oder das Beutefangtuch, meist mit toten Fliegen bedeckt; das komplizierte, innere Raumnetz, das von Tunneln durchzogen ist; die Innenräume, die Spinen und Eierkokons beherbergen. *Mallos gregalis* lebt in den Tropen wie viele andere Spinnenarten, die komplexe Gesellschaften bilden, und die Netze sind weit vom Boden in Bäumen und Büschen befestigt. Man kann diese Spinnenart leicht im Laboratorium halten, denn sie fühlen sich unter den verschiedensten Umweltbedingungen wohl und sind anpassungsfähig [6, 9, 5].



**Abb. 7.** Teil einer Baumkolonie von *Mallos gregalis*, die in der Nähe von Guadalajara in Mexiko gefunden wurde. Die Spinnen haben gemeinsam ein Netz unter Einschluß von Blättern und Zweigen gebaut; fliegende Beute bleibt an der Oberfläche des Tuches hängen, wo sie von vielen Tieren gemeinsam verzehrt wird. Gewöhnlich ruhen die Spinnen sich im Inneren des Netzes aus. Die Öffnungen, die im Deckennetz zu erkennen sind, erlauben den Tieren Zugang zur Netzoberfläche.

## Netzgrenzen

Der Standort sollte nicht als statisch oder in sich selbst beruhend aufgefaßt werden, ebenso wie wir eine Stadt nicht als ein isoliertes, unveränderbares Gebilde auffassen sollten. Im Gegenteil ist der Standort mit dem Netz in einem dynamischen Gebilde vereinigt, das Energie innerhalb sowohl als mit der Umwelt austauschen kann. *Araneus diadematus* baut einen Brückenfaden und Ankerseile zwischen Ästen und Zweigen. Diese grenzen ihr persönliches Gebiet ab und bilden die Pufferzone zwischen Netz und Umweltstruktur. Zweige, die vorher getrennt und unbezogen waren, werden als Ankerpunkte zu einem dynamischen Teil des Standortsystems. Die Rahmenfäden, die man mit dem Fundament eines Hauses vergleichen kann, verändern die Unterstüßungsgebilde so, daß sie optimal der täglichen Konstruktion des Radnetzes dienen; sie absorbieren unter anderem den kinetischen Streß, indem sie ein Zugskelett bilden, an dem das Radnetz hängt.

Solch ein System erinnert an Klees Statuen: „In diesen Gebilden kann man mit Sicherheit den Doppelfaktor eines Aufhängungs- und eines Unterstüßungssystems erkennen, wobei die schiefen Flächen Freiheit im unterstützenden Rahmenwerk besitzen, an dem Verbindungen befestigt sind, die so fein sind, daß sie nur Berührungspunkte darstellen“ [1]. Brückenfäden und Rahmen bilden oft verstärkte, dauerhafte Teile des Radnetzes. Sie formen langfristige

Stützen und erhalten den Umkreis des Netzes, unabhängig davon, ob im Augenblick ein Netz eingebaut ist oder nicht. Die Rahmenseide kann recht dicht sein, und sie stellt einen erheblichen Energieverbrauch dar; aber Brücke und Rahmen sind langfristige Anlagen, was die Annahme unterstützt, daß einmal gewählte Standorte selten gewechselt werden [20].

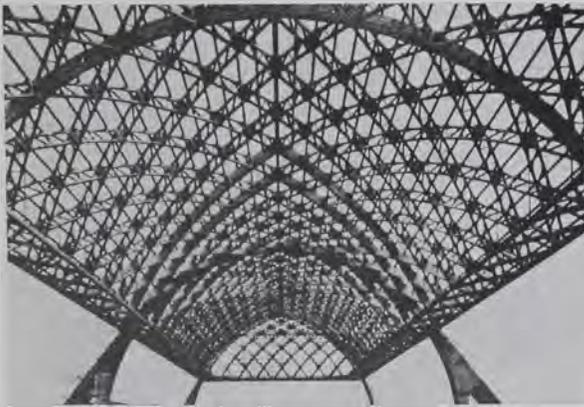
## Bauzeit

Wie bei den Menschen gibt es bei Spinnen kurzfristige und Dauerstrukturen. Soweit die Seide analysiert worden ist, ist sie in beiden Netztypen ähnlich zusammengesetzt, während der Verteilungsplan auffallende Unterschiede aufweist. Sparsamkeit mit Arbeitskraft und Material bilden die hervorstechendsten Eigenschaften des kurzfristigen, täglich erneuerten Netzes; mehr Zeit, Anstrengung und Material werden hingegen auf ein Gebäude verwandt, das wochen- und monatelang dienen soll. Interessanterweise haben die beiden Plantypen auch ganz verschiedene Funktionen: Das kurzfristige Bauwerk dient als leistungsfähige Falle, welche Beute für je ein Tier festhält und fängt; das Netz mit dem langfristigen Plan hingegen hat viele Funktionen im Leben der Spinnen, wie Ernährung, Schutz oder Aufzucht der Nachkommenschaft.

Das beste Beispiel für ein kurzfristiges Bauwerk ist das Netz von *Araneus diadematus*. Seine Struktur ist durch Symmetrie vereinfacht, ein Prinzip, das Nervi [18] für sparsames Bauen vertritt, und das für ein häufig erneuertes Gebilde wesentlich ist. Es ist gezeigt worden [30], daß das Legen von Spiralumgängen im Lot auf den nächsten Radius den kürzesten und einfachsten Weg für den Baumeister darstellt, eine Methode, die die Errichtung einer logarithmischen Spirale zur Folge hat. Vom Standpunkt des Materials ist eine logarithmische Spirale verschwenderisch; denn ein gutes Fangnetz für fliegende Beute sollte außen, wo die Radien weit auseinanderliegen, enge Spiralumgänge haben; und eine enggebaute Spirale nahe der Nabe ist tatsächlich unnötig. Daß die Spirale außen weit und innen eng ist, zeigt, daß für Spinnen im kurzfristigen Bauwerk Sparsamkeit in Bewegung und Orientierung wichtiger ist als Einzelheiten im Plan, die ausschließlich dem Beutefang dienen.

*Araneus diadematus* baut täglich ein weites, luftiges Netz für fliegende Insekten. *Cyrtophora*-Netz-plus-Spinnen-Komplexe andererseits nehmen eine kleinere Fläche in Anspruch und werden für langfristige Benutzung gebaut. Dies sind keine zufälligen Bauunterschiede, sondern das Resultat zweier wichtiger Grundsätze architektonischen Planens und Entwerfens. Norberg-Schulz konstatiert dies präzise:

„Im Prinzip können wir zwischen zwei Arten von Unterstützungsstrukturen unterscheiden, der umfassenden und der wiederholenden. Umfassende Strukturen werden verwendet, um in einem Schwung große, ununterbrochene Zwischenräume zu überspannen; sie bilden meistens ein einheitliches Ganzes“ (Abb. 8 und die geodesischen Dome von Buckminster Fuller; siehe auch [35]). Das Radnetz verwendet den umfassenden Plan: Zwar kann man der Radstruktur Radien zufügen, aber der Plan kann nicht ohne Verletzung der Symmetrie und Funktion variiert werden.



**Abb. 8.** Beim Bau der Ausstellungshalle in Turin verwendete Pierre Luigi Nervi einen modularen Plan, in dem gleiche, vorgegossene Strukturelemente viele Male verwendet wurden, um Material und Arbeit zu sparen. Obwohl die Maschenweite im senkrechten, geometrischen Radnetz variiert, kann man es als einen Versuch der Spinne betrachten, eine möglichst große Fläche mit möglichst wenig Material und Arbeit zu bedecken; die Konstruktion ist durch einen Verhaltensmodul vereinfacht, der im Zentralkörper des Zentralnervensystems höchstwahrscheinlich verschlüsselt ist.

Wiederholende Strukturen, im Gegensatz dazu, können leicht vergrößert werden, indem man Teile an der Außenseite anbaut, ohne daß der Grundplan gestört wird. Die letztere Bauart ist anpassungsfähiger und erlaubt vielerlei Anbauten; sie ist im Raum- und Tuchnetz verkörpert.

Das Radnetz enthält also, zum Unterschied von Raum- und Tuchnetzen, Untereinheiten oder Module, die das Resultat von kurzen, fadenlegenden Bewegungsfolgen sind, die beim Bau eines Radnetzes viele hundert Male wiederholt werden. Dies wird in bester Weise durch Marcel Breuers Worte anschaulich: „Die Suche nach Vereinfachung ist selbstverständlich damit verbunden, daß man ein Modell für die Massenproduktion findet.“ Das geometrische Radnetz, das eine möglichst große Fläche mit möglichst wenig Material und Anstrengung ausfüllt, wirkt harmonisch durch „die Wiederholung eines Moduls auf solche Weise, daß alle Teile eines Gebäudes in einfachen

numerischen Beziehungen miteinander stehen“ [27]. Man kann sich die Herstellung des Radnetzes als eine Verfeinerung des modularen Planes vorstellen, das heißt als eine kurze Folge von tastenden und fadenlegenden Bewegungen, die mit großer Geschwindigkeit viele Male wiederholt werden. Tatsächlich baut die spirallegende Kreuzspinne im allgemeinen über 1000 Maschen in rascher Folge in weniger als 20 Minuten, wobei ein relativ einfaches Verhaltensmuster, das im Zentralnervensystem der Spinne programmiert ist, wiederholt ausgeführt wird. Störungsexperimente [31] haben gezeigt, daß der Zentralkörper am rostralen Ende des supraösophagealen Ganglions von *Araneus diadematus* möglicherweise der Sitz des Modulprogrammes ist. Wenn man hier Läsionen mit dem Laser verursachte, wurden nachher Netze mit weitgehend gestörter Regelmäßigkeit beobachtet.

Die Ausstellungshalle in Turin ist ein Beispiel menschlicher Baukunst mit modularem Plan. Beim Bau der Ausstellungshalle in Turin (1948/49) benutzte Nervi gegossene Einheiten aus verstärktem Zement für den tonnenförmigen Bogen der Halle, deren größte Dicke kaum 5 cm beträgt. Mit diesen dünnen Einheiten überbrückt er einen 80 m langen Raum, ein erstaunliches Verhältnis zwischen Materialaufwand und Leistung. Die wellenförmige Anordnung dieser vorgegossenen Einheiten, die die Rippen des Daches formen, gibt ihnen die notwendige Stärke und löst zur gleichen Zeit auf eleganteste Weise das Problem des Lichteinfalles ([11], Abb. 8). Sowohl dieses Bauwerk als auch das Radnetz benötigt vorübergehend ein Gerüst.

### Voraussichtliche Dauer der Netze

Peakall [20] beschreibt eine der Maßnahmen, die *Araneus* entwickelt hat, um Energie und Material im häufig erneuerten Radnetz zu sparen. Ersetzte „kalte“ Spinnen auf radioaktive Netze, die sie bereitwillig annehmen. Nachdem sie den Rest des Tages die fremden Netze benutzt hatten, bauten sie diese sorgfältig Stück für Stück ab und fraßen die alte Seide, wie diese Art es mit ihren eigenen Netzen zu tun gewöhnt ist. In darauf gebauten Netzen konnte das Wiederauftauchen der Aminosäuren, der Bausteine der alten Seide, durch Messung der Radioaktivität festgestellt werden. In jedem Versuch waren mehr als 90% der Radioaktivität der alten Seide im neuen Netz, das am 2. Tage danach gebaut worden war. Dies zeigt, daß im allgemeinen das alte Material wiederverwendet wurde, und es erinnert an die Wiederverwendung von Konstruktionsteilen kurzfristiger menschlicher Gebäude.

Wenn ein Wanderer ein Zelt für vorübergehenden Schutz kauft, wählt er ein System, das sich schnell aufrichten läßt; und eine Ausrüstung, die schnelles Aufrichten erlaubt, wird oft dauerhafteren Modellen vorgezogen. Ähnlich legt *Araneus* ihre Fäden während dem täglichen Netzbau mit enormer Geschwindigkeit, wobei sie je zwei Fäden an 2000 Stellen in 20 bis 40 Minuten zusammenschmilzt. Dem menschlichen Beobachter erscheint der Bau des Radnetzes so, als ob ein wohl vorbereiteter Plan systematisch ausgeführt wird, während der Bau von Raumnetzen mehr einem Ausprobieren von Möglichkeiten zu folgen scheint. In Tuch- und Raumnetzen sieht man nichts von der Ausführung eines zentralnervösen Programmes; *Cyrtophora* und *Mallos* brauchen mehrere Tage zum Bauen eines neuen Netzes, um später einfach anzubauen.

*Cyrtophora* wechselt zwischen dem schnellen Legen eines Fadenteiles und ausgedehntem Tasten und Ausprobieren ab, wobei sie häufig einen bereits gelegten Faden wieder abtrennt und ihn zum zweiten und dritten Male an einem neuen Ort befestigt [29]. Beobachter von netzbauenden *Cyrtophora* haben beschrieben, daß alte Seide bei Reparaturen weggeworfen wird und scheinbar nicht wieder verwendet wird. Dies zeigt, daß in Tuch- und Raumnetzen die kurze Bauzeit und Wiederverwendung alten Materials zugunsten eines dauerhaften Gebäudes aufgegeben worden sind. Sogar nach einem Regenschauer können Tuch- und Raumnetze oft weiterbenutzt werden, während Radnetze zerstört sind.

Im wiederholenden Netztyp kann die Struktur anpassungsfähiger gehalten werden, und *Metepeira* und *Cyrtophora* zeigen großen Formenreichtum. Da sie vielfältig verändert werden können, sind diese Systeme imstande, einem weiten Spektrum von Funktionen zu dienen, was dem Radnetz nicht möglich ist. Einmal kann die Spinne sich in drei Dimensionen bewegen, während andererseits das Fadengewirr einen gewissen Schutz gegen Räuber für Spinnen und Eierkokons bildet. Zudem können die frischgeschlüpften Babies an den oberen Fäden „herumturnen“. Und am wichtigsten ist die langfristige Besetzung des Standortes. Zwar kann eine *Cyrtophora* ihr Netz mit einer anderen austauschen, aber andere Spinnenarten können den einmal besetzten Platz nicht mehr beanspruchen.

Das langfristige Netz können wir mit einem Bauernhof vergleichen. Nachdem ein Ansiedler einmal das Land gerodet hat, treibt er andere Siedler weg und entscheidet über die Nutzung. Dabei hat er den Vorteil eines festen Standortes, relativ frei von Störungen von außen. Wenn er dann eine erste Unterkunft, wie zum Beispiel ein Blockhaus, baut, kann er dort Schutz suchen und kann jederzeit Räume anbauen, wenn sie benötigt werden. Aus diesem Grund haben

viele große amerikanische Bauernhäuser in der Mitte Überreste eines Blockhauses oder einen anderen, primitiven Mittelraum.

## Verhalten und Bauplan

In den von uns gewählten Spinnarten und ihren Netzen kann man eine fortschreitende Zunahme sozialer Wechselbeziehungen unterscheiden. Das Radnetz von *Araneus diadematus* scheint ausschließlich für Einzelbewohner vorgesehen zu sein; das ganze Netz kann von einer kleinen Plattform, der Nabe, aus kontrolliert werden; die zusammenlaufenden Radien leiten alle Vibrationssignale und alle Gehwege zu diesem Punkt. Mitglieder der Art zeigen wenig Duldsamkeit untereinander. Alles, was im Netz Schwingungen erzeugt, scheint angegriffen zu werden, sei es eine Fliege, ein Familienmitglied oder eine Stimmgabel.

Aber selbst Einzelgänger unter den Tieren müssen mit Artgenossen Kontakt aufnehmen, zumindest mit Ehepartnern und Jungen. Werben findet mit Hilfe des *Araneus*-netzes statt, wobei das wandernde Männchen damit beginnt, mit einem Bein am Außenrande des Netzes zu zupfen oder zu trommeln. Aber ehe die Paarung wirklich stattfinden kann, muß das Männchen einen eigenen Faden am Netz des Weibchens befestigen, was zeigt, daß ein neues Strukturelement hinzugefügt werden muß, ehe zwei Tiere zusammenkommen können. Die Jungen, die zu Hunderten aus einem Eiersack schlüpfen, bleiben einige Zeit zusammen, wobei sie nicht ein Radnetz, sondern ein gemeinsam gebautes Tuchnetz bewohnen ([17], Burch, in Vorbereitung). In allen Fällen dient das Radnetz nur einer Spinne, und Gruppentätigkeiten sind mit anderen Strukturen verbunden.

Im Gegensatz dazu zeigen *Cyrtophora* und *Metepeira* regelmäßige Wechselbeziehungen zwischen Individuen auf den Alltagsnetzen; sie brauchen dafür keine Extrastrukturen zu bauen. Bei *Cyrtophora*, wo Netze sich berühren, können Nachbarn Beute voneinander stehlen oder Netze austauschen; und nur selten greifen Artgenossen sich untereinander an. Wenn Junge aus dem Kokon kriechen, begeben sie sich direkt in das überdachende Raumnetz. Sie bauen eigene Fadengebilde in das Netz der Mutter und dulden sich gegenseitig während der ersten Zeit. Es ist wahrscheinlich mehr das Netz als gegenseitige Anziehung, was sie zusammenhält. Das Werbeverhalten ist im Gegensatz dazu von der Anwesenheit des Weibchens und nicht vom Netz abhängig.

Ebenso wie *Cyrtophora* findet man *Metepeira spinipes* immer in Gruppen mit charakteristischen Abständen von Tier zu Tier [3] (unveröffentlichte Maße

von Burgess). Das Raumnetz von *Metepeira* ist die Bühne, auf der gemeinsame Handlungen stattfinden. Männchen, die keine eigenen Netze bauen, können hier warten, um das Futter von Radnetzen der Nachbarin zu stehlen, oder sie können sich zum Schlupfwinkel herablassen, um Werbung und Kopulation zu vollziehen. Die Jungen halten sich hier nach dem Schlüpfen eine Weile auf, und sie verankern ihre ersten Netze hier. Männchen können tagelang mit jungfräulichen Weibchen im Gespinst über dem Schlupfwinkel zusammenleben. Bemerkenswerterweise werden nach der Kopulation die Eierkokons unmittelbar über dem Schlupfwinkel angebracht und besetzen dadurch diese Gegend.

Das Netz von *Mallos* bildet die permanente Grundlage für die vielen sozialen Wechselbeziehungen dieser Spinnen. Als das Produkt gemeinsamen Spinnens macht das Tuchnetz Anhäufungen von Tieren, gemeinsamen Beutefang und Aufziehen der Jungen durch Gruppen möglich. Die Tiere dulden sich unbegrenzt gegenseitig. Die Männchen nähern sich den Weibchen in relativ einfachem Werbeverhalten, und winzige Jungspinnen laufen auf dem Netz unbelästigt herum. Sie können ungestört an der von den Erwachsenen gefangenen Beute fressen. Noch wissen wir nicht, wie die Gattenwahl auf dem Gemeinschaftsnetz stattfindet, wo alle Tiere die ganze Zeit lang so nahe zusammenleben; aber man kann sich vorstellen, daß es ein bisher noch unentdecktes Strukturelement gibt, das der Gattenwahl dient.

Im Tuch- und Raumnetz ist das wiederholende Bauprinzip verwandt, und wenn die Bevölkerung wächst, wird das Netz vergrößert. In ähnlicher Weise mag ein Architekt keine spezielle Kinderstube für eine Familie bauen, sondern einfach genügend Zimmer in Standardproportionen, die für Kinder eingerichtet werden können und den vielen anderen Erfordernissen über viele Jahre hin dienen können.

Man kann das soziale Verhalten auf auch andere Weise ansehen, nämlich vom Standpunkt seiner Organisation. Die alleinstehende Kreuzspinne, die sorgfältig altes Strukturmaterial wiederbenutzt, kann die verschiedenen Tätigkeiten selber koordinieren. Folglich hält sie Eierkokon, Schlupfwinkel und Fangnetz sauberlich auseinander. In ähnlicher Weise sind *Cyrtophora*-Männchen für die Kopulation nicht von der Netzstruktur abhängig, sondern folgen vom Weibchen ausgehenden Signalen.

Wenn mehrere Individuen an einem Ort leben, mag es vorteilhafter sein, wenn man zum Beispiel durch die Netzstruktur gemeinsame Tätigkeiten koordiniert. Wir können zum Vergleich anführen, daß wir unseren Weg zu Hause gut zu finden wissen, während im Bereich einer großen Stadt Landkarten, Wegweiser und gut bezeichnete Straßen Wichtigkeit erlangen.

Das Verhalten von *Metepeira* ist weitgehend durch die Netzstruktur bestimmt. Der Beutefang auf dem Radnetz sieht dem der Kreuzspinne ähnlich, aber der Abstand zwischen Radnetzen ist bei *Metepeira* durch ein permanentes Raumnetz festgelegt. Die Orientierung des Männchens zum Weibchen erfolgt mit Hilfe der oberen Verbindungsstraßen des Raumnetzes und nicht durch die freie Luft. Wie bei *Cyrtophora* wirkt das Raumnetz richtunggebend bei der Ausbreitung der Jungen; die Jungen bleiben lange Zeit in der Nähe der Geburtsstätte und können sich über die aneinanderstoßenden Netze der ganzen Kolonie verteilen. So ist der Ort für jede Handlung der Spinne in der Gebäudestruktur vorgesehen: Das kurzzeitige Radnetz hängt am Dauerraumnetz, während der Schlupfwinkel ein Wartegebiet darstellt und den Eierkokons als Unterlage dient. In einer ständig wechselnden Umwelt ist der Netzkomplex ein stadtähnliches Ordnungssystem, das einem Plan folgt, der sich über lange Zeitspannen entwickelt hat und in den Genen der Spinnen verankert ist.

Der *Mallos*plan, der auch die meisten Funktionen in der Struktur verankert, ist weniger beweglich. Im gemeinsamen Netz bewegen sich die Mitglieder der Gruppe auf seidenen Straßen, die vorher von anderen Mitgliedern als Richtungsfaden gelegt worden sind. Das oberflächliche Tuchnetz dient nicht nur dem Verkehr, sondern es übermittelt auch Signale für den Gruppenbeutefang dadurch, daß es durch Mitschwingen mit der zappelnden Fliege den spezifischen Reiz auslöst [4]. Innerhalb des Netzes sind in Räumen für trüchtige Weibchen und für Eierkokons Funktionen der Kolonie zentralisiert. Da das Tuchnetz durchlaufend und asymmetrisch ist, können Gruppen von Spinnen Beute gemeinsam fangen. Möglicherweise lockt das Netz Fliegen an [6].

### Strukturen zur Nachrichtenübermittlung

Es ist leichter, über die Nachrichtenübermittlung bei Tieren zu diskutieren, als sie exakt zu untersuchen, hauptsächlich deswegen, weil Fragen wie „wer spricht zu wem“ oder „ist die Nachricht durchgedrungen“ beantwortet werden müssen. Tiere können uns das nicht erzählen. Um Kommunikation wissenschaftlich zu untersuchen, müssen wir etwas finden, was meßbar ist. Die Verhaltensforscher zum Beispiel messen Informationsübermittlung, wobei sie Informationseinheiten berücksichtigen, die ein Lebewesen in die Umgebung aussendet. In unseren Untersuchungen am Spinnennetz denken wir in erster Linie an Strukturelemente und Formen als Unterlage für den Transfer von Informationseinheiten. Da die Signalarstärke mit zunehmender Entfernung abnimmt, müssen Tiere dafür sorgen, daß sie im Bereich bleiben, in dem Signale erkennbar sind. Um den Bereich zu

erweitern, bauen sie Signaltransportnetzwerke. Ebenso wie die Spinne im Netz ist der Mensch von Gebilden umgeben, die seinen Wahrnehmungsbereich erweitern: Wir sind untereinander durch Telefondrähte verbunden, durch Radiowellen, Straßennetze, Eisenbahnen, Postdienst und Flugzeugverkehrswege. Wir rufen Nachbarn an, schreiben Briefe, tauschen Bücher aus oder gehen über Straßen und durch Hallen, um sie persönlich zu sehen. Wir hängen mit unseren Artgenossen durch die strukturellen „Netzwerke“ unserer Zivilisation zusammen.

Abstand zwischen Individuen ist ein Sozialfaktor, der auf Signalaustausch beruht. Mit Ausnahme der Tiere, die sich rein zufällig verteilen, können Artgenossen entweder versuchen, sich zu vereinigen oder sich soweit wie möglich voneinander entfernen, und die Ausbreitungsmuster beruhen auf interindividuellem Informationsaustausch. So können Tiere, die oberflächlich als Einzelgänger erscheinen, mit Artgenossen in Verbindung treten, ihnen Signale übermitteln, die den Abstand bewahren helfen. Dies könnte sehr wohl für die einzelgängerischen Radnetzspinnen der Fall sein.

Um zu fressen, müssen Spinnen Signale von der zukünftigen Beute empfangen, meistens durch Fadenschwingungen. Das Radnetz wählt Informationen aus der Umgebung dadurch aus, daß es nur Beute von verwendbarer Größe mechanisch ausfiltriert [32] und ungeeignete Schwingungen und luftübertragene Geräusche dämpft [25, 28, 8]. Im Gemeinschaftsleben von Mallos sorgt das entsprechende Netz für gemeinsamen Beutefang, indem ein deutliches Signal von einer schwirrenden Fliege übermittelt wird, aber die Schwingungen, die laufende Spinnen erzeugen, gedämpft werden [4].

Für solche Funktionen gibt es viele Parallelen in anderen Gebilden, die von Lebewesen gemeinschaftlich bewohnt werden. Als Baumeister planen Menschen Häuser, die einerseits Familien zusammenhalten, aber durch Zwischenwände und Türen das Privatleben von Individuen ermöglichen. Das Gebäude einer Handelsgesellschaft kann so konstruiert sein, das Angestellte leicht den Weg zum Büro des Direktors finden; aber dort muß dann unweigerlich eine Sekretärin sitzen, die den Verkehrsfluß koordiniert und filtert. Straßen mit ebenen Oberflächen verbinden menschliche Wohnhäuser und unterstützen den Verkehr durch Fahrzeuge oder auf besohlenen Füßen. Seidenfäden verbinden Spinnen und erlauben Verkehr auf hakenbewehrten Füßen.

### Den Bauplan beeinflussende Faktoren

Der Bauplan in menschlichen Behausungen und Spinnennetzen ist ein Ergebnis sowohl der unmittelbaren

funktionellen Ansprüche, die an das Gebäude gestellt werden, als auch von Überlieferungen. In Vororten sich ausbreitender Städte bieten die Häuser den Bewohnern Unterkunft und eine angenehme Umgebung, aber sie enthalten auch nichtzweckmäßige Elemente wie weiße Säulen, Verzierungen und Giebel, die oft an griechische Tempel erinnern. In ähnlicher Weise kann man Einzelheiten im Spinnennetzbauplan durch Überlieferung zu erklären versuchen, anderes durch den unmittelbaren Nutzen für den Bauherrn.

Der Ausdruck „Überlieferung“ oder „Tradition“, der von Webster als „entworfen in bewußter Anlehnung an architektonische Stile der Vergangenheit“ definiert wird, kann auf Spinnen kaum angewandt werden. Stattdessen hört man häufig den Ausdruck „genetisches Beharrungsvermögen“. Das Zentralnervensystem, das den Beinen und dem übrigen Körper die Signale zusendet, damit sie sich in der besonderen Weise bewegen, die zum Auslegen der Seide im Netzmuster führen, entwickelt sich gemäß einem genetischen Schlüssel. Dieser Schlüssel wird von Generation zu Generation weitergereicht; und obwohl er Mutationen und natürlicher Auslese unterliegt, bleibt er für die Art über lange Zeiträume unverändert.

Um das Ausmaß der genetischen Verschlüsselung zu untersuchen, haben Reed und Mitarbeiter [23] versucht herauszufinden, ob Spinnen individuelle Erfahrungen im Radnetzmuster sichtbar machen: Auf früheren Versuchen aufbauend, vermaßen sie die Netze aufwachsender *Araneus diadematus*-Geschwister, wobei die Hälfte der beobachteten Tiere täglich Fliegen im Netz gefangen hatten, die andere Hälfte ausschließlich direkt am Mund gefüttert worden war. Man kann vermuten, daß die Nichtbenutzung des Netzes bei der Hälfte der Spinnen Vernachlässigung von Details im Netzbau verursacht, so daß diese Spinnen weitmaschige, unregelmäßige Netze bauen. Es wurden aber keine Unterschiede zwischen den Netzmustern fliegenfangender und mundgefütterter Spinnen gefunden, was für minimalen Einfluß der Erfahrung auf die Feinstruktur des Netzes spricht. Andere Experimente, wo Spinnen unter verschiedenen Bedingungen aufgezogen worden waren, bestätigen diesen Schluß. Es läßt sich daraus ableiten, daß Nichtbenutzung von Strukturelementen bei Spinnen langsamer als bei Menschen zu deren Verschwinden führt.

Andererseits kann man aus Netzphotographien ersehen, daß neue Umweltbedingungen den Netzbau unmittelbar beeinflussen können (Abb. 3). Es wurden Photographien gemacht, nachdem Spinnen in Käfige eingeschlossen worden waren, wo sie nicht geeignete Netzbauplätze auswählen konnten; so etwas mag unter natürlichen Bedingungen nie vorkommen, weil Spinnen dort den Ort je nach dem Vorhandensein offener Räume wählen. Aber unter unseren etwas

künstlichen Lebensbedingungen kamen Mechanismen ins Spiel, die ihnen Anpassung an unmittelbar vorhandene Umweltbedingungen erlaubte.

Teilweise wollten wir die Wirkung extremer Umweltbedingungen auf das Netzmuster testen, und teilweise wollten wir die Anpassung eines wirbellosen Tieres an Gewichtlosigkeit, die in der Erfahrung der Art nie vorgekommen war, untersuchen, als wir netzbauende Spinnen in den Weltraum zu Skylab II schickten, während es die Erde umkreiste. Zwei Tiere wurden von den Astronauten in kleinen Röhrchen in der Tasche zum früher hinaufgeschossenen Laboratorium befördert; sie wurden in Käfigen freigesetzt und durch Kameras beobachtet. Das erste Tier begann vier Tage, nachdem es aus der Röhre entlassen war, ein Netz zu bauen, das etwa die Größe und Regelmäßigkeit eines Erdnetzes besaß.

Dagegen waren im Weltraum gebaute Netze von Erdnetzen deutlich in drei Maßen verschieden: Verteilung der Radienwinkel, Fadendicke und Zahl der Umkehrstellen in der Klebspirale; diese Maße hängen vermutlich alle mit der Orientierung des Tieres nach der Schwerkraft zusammen [34]. Man kann die Tätigkeiten der Spinnen und Astronauten unter schwerelosen Bedingungen vergleichen: Die letzteren machten ein ausführliches Training durch, lasen und dachten über die Maßnahmen nach, mit denen sie sich den erwarteten neuen Umweltbedingungen anpassen könnten, während die Spinnen dem Wechsel völlig unvorbereitet ausgesetzt waren. Beide Lebewesen lösten das Problem des sich Herumbewegens, und sie formten ihre Umwelt in gewohnter Weise, wobei sie beide wirksam die Abwesenheit der Schwerkraft ausglich. Dies zeigt, daß zwei verschiedene Organismen ähnliche Resultate erzielen können, wobei jeder das Problem auf seine Weise löst.

Da keine fossilen Netze erhalten sind, wissen wir nicht, wie der Selektionsprozeß den Netzplan in der Stammesgeschichte der Spinnen beeinflußt hat. Es ist eine erstaunliche Beobachtung, daß nur wenige Grundpläne wie das Rad-, Tuch- und Raumnetz immer wieder in verschiedenen Kombinationen von Tausenden netzbauender Spinnen wiederholt werden. Man hat deshalb vermutet, daß diese Netzformen solch einzigartige und vorteilhafte Lösungen für das Problem der geforderten Funktion bieten, daß sie von verschiedenen Arten unabhängig voneinander mehrmals „erfunden“ worden sind [13].

Man kann auch das Erscheinen weniger Muster in verschiedenen Arten so erklären, daß man die Existenz eines ursprünglichen Netzbauers annimmt, der ein subsoziales Tier mit einem zusammengesetzten Netzgebilde war, ähnlich der jetzigen *Metopeira*. In der Entwicklung über Tausende von Jahren nahm die Spezialisierung zu: Einige Tiere entwickelten sich zu Einzeljägern mit großen, regelmäßigen, schnell zu

erbauenden Radnetzen, andere zu Gemeinschaftswesen, wo die gemeinsamen, asymmetrisch sich wiederholenden Pläne den Ansprüchen am besten entsprachen, während wieder andere sich zu losen Gruppen mit gemischten Netzstrukturen zusammenschlossen. Robinson und Robinson [24] nennen solche Erscheinungen „Netzentwicklung mit zunehmender Reduktion der Komplexität“. Im Gegensatz zum Menschen, bei dem die Möglichkeit der Wahl zwischen Einzel-, Gruppen- oder Familienleben offensteht, wobei er verschiedene Unterkünfte entsprechend wählen kann, werden die heute lebenden Spinnen in ihre soziale und Netzstruktur hineingeboren, die artspezifisch in ihren Genen verankert ist.

Ein weiteres indirektes Beweisstück für den gemeinsamen Ursprung verschiedenartiger Netzstrukturen ist die Strukturveränderung, die im Verlauf des Lebens eines Tieres beobachtet werden kann. Frisch geschlüpfte *Araneus diadematus*-Spinnen bauen ein Raumnetz und leben darauf zusammen. Solange sie auf diesem Gebilde leben, sind sie tolerant gegeneinander, obwohl sie bereits fähig sind, kleine Beutetiere zu fangen und einzuspinnen. Nach ein bis zwei Wochen verlassen sie das gemeinsame Netz einzeln und bauen ein erstes eigenes, vollkommenes Radnetz; auf diesem Netz ist kein Zeichen von Toleranz mehr erkennbar, und sogar Geschwister werden angegriffen, wenn sie zufällig ins Netz gelangen.

Man muß hier den Schluß ziehen, daß die Fähigkeiten, Raum- und Radnetze zu bauen, alle beide jeder einzelnen Kreuzspinne genetisch mitgegeben sind, sich aber zu verschiedenen Zeiten des Lebens manifestieren. Die Tatsache, daß Tiere zwei verschiedene Netztypen in der Spanne eines Lebens bauen, zwingt zu dem Schluß, daß die Veränderung zusammen mit dem Netzbauprogramm im Zentralnervensystem enthalten ist. Man muß sich bei dieser Gelegenheit auch daran erinnern, daß viele andere Faktoren wie Körperform berücksichtigt werden, wenn ein phylogenetischer Stammbaum für Spinnen aufgestellt wird; uns beschäftigt hier nur der Netzplan als einer der Faktoren, der zur Erkennung von Verwandtschaftsgraden dienen kann.

Das gewählte Material beeinflußt die Struktur. Sobald Stahlträger oder verstärkter Zement zur Verfügung standen, eröffneten sich neue Möglichkeiten für das Bauen von Räumen. Im Gegensatz dazu scheinen Spinnen nur *ein* Material in all ihren Bauwerken verwendet zu haben: das Polypeptid Seide. Sehr ähnlich zusammengesetzte Seiden sind weit verbreitet, werden sie doch von so entfernt verwandten Tieren wie Spinnen und Insekten verwendet, bei den letzteren von Motten und Schmetterlingen; am besten bekannt sind die Larven der Motte *Bombyx mori*, die Seidenraupen. Lucas und Rudall [16] faßten Unter-

suchungen der Seide radnetzbauender Spinnen (Arthropidae) zusammen, wobei sie die Seiden aus verschiedenen Drüsen einer Art und die Seiden von verschiedenen Arten miteinander verglichen.

Der Faden, der das Gewicht der Spinne halten muß und die Spannung im Netz bewahrt, enthält einen hohen Prozentsatz von Aminosäuren mit kurzen Seitenketten: Peakall (in [33]) erwähnt für Alanin Zahlen wie 32,7 und 33,4 g/100 g Seide, für Glycin 24,3 g/100 g Seide und für Serin 6,3 bis 6,4 g/100 g Seide. 10 oder 11 andere Aminosäuren mit längere Seitenketten bilden die übrigen Bestandteile der Seide. Im Vergleich mit Nylon (8,7 g Denier\*) ist die Spinnenseide mit 7,8 g Denier beinahe ebenso zäh; aber gleichzeitig ist die Streckbarkeit von Spinnenseide erheblich höher. — Für ähnliche Zwecke haben Spinnen und Menschen vergleichbare Vorgehen entwickelt. Beim Bau der Brookhynbrücke, einer Hängebrücke in New York, die 1883 vollendet wurde, entwickelten Vater und Sohn Roebling eine Vorrichtung zum Spinnen von Stahlfäden zu dicken Seilen; der Vorgang wurde an Ort und Stelle ausgeführt und führte zum Überspannen großer Zwischenräume mit majestätischer Eleganz. Im Einklang mit seinen Grundeigenschaften wurde Stahl so als Spannungsträger benützt [14].

Wenn man die Seide der strukturellen Netzfäden, die die Tiere zu tragen haben, mit Kokonseide, die mehr als Schutzhülle und Isolation funktioniert, vergleicht [16], muß man schließen, daß die mechanischen Eigenschaften der zwei vom selben Tier produzierten Seidenarten ihren Funktionen gut angepaßt sind: Während der Strukturfaden hohe Reißfestigkeit besitzt, zeigt der Kokonfaden diese nur in geringem Maße. Vermutlich sorgte genetisches Beharrungsvermögen, nachdem günstige Materialien entwickelt worden waren, dafür, daß Spinnen sie viele Generationen lang verwendeten. Anders gesehen hat die Entwicklung von starker und elastischer Seide es ermöglicht, die derzeitigen Netzmuster auszuführen; aber der ererbte Weg der Seidensynthese hat dann mögliche Variationen im Netzmuster eingeschränkt.

Bei Menschen bieten die griechischen Tempel ein Beispiel für Beschränkungen durch das Baumaterial. Die Steingebäude folgten Pfosten- und Balkenkonstruktionen, die mit dem früheren Baustoff Holz entwickelt worden war. Zwischenräume waren jetzt plötzlich durch die Länge der Steinbalken begrenzt, und die Säulen rückten näher zusammen, was zu massiven Bauten Anlaß gab. Erst Generationen später wurden Bogen und Gewölbe entwickelt, wodurch es möglich wurde, größere Zwischenräume mit Stein zu überbrücken; und die lichten gothischen Kathedralen

konnten gebaut werden, als man gelernt hatte, das „neue“ Material angemessen zu verwenden. Stahl und verstärkter Zement ersetzen schließlich Steine, wodurch neue Entwicklungen in menschlichen Bauplänen möglich wurden.

Eine kleine Auswahl von Spinnennetzen, absichtlich wegen ihrer starken Variation gewählt, ist von uns analysiert worden. Den charakteristischen Plan jeder Struktur haben wir durch funktionelle Erfordernisse zu erklären versucht. Es konnten Parallelen zwischen den Entwürfen der menschlichen und Spinnenstrukturen aufgezeigt werden, und in zahlreichen Fällen konnten Strukturdetails miteinander verglichen und ähnliche zugrunde liegende Bauprinzipien gefunden werden.

Spinnen bauen, ebenso wie Menschen, kurz- und langfristige Bauwerke, wobei die ersteren einen Plan verlangen, der schnelle Errichtung erlaubt, während die letzteren langsam gebaut werden und die Möglichkeit späterer Anbauten offenlassen. Der umfassende, modulare Plan wurde von beiden Lebewesen für gewisse Zwecke vorteilhaft gefunden; der wiederholende Plan für andere Zwecke.

Einzelwesen müssen miteinander in Verbindung treten und brauchen gleichzeitig Zurückgezogenheit. Man kann beide Anforderungen in den Spinnen- und Menschenbauten erfüllt finden. Es gibt sowohl Wände, die Lebewesen voneinander trennen als auch Verbindungsstraßen, die sie zusammenbringen; und beide Arten von Bauwerken ermöglichen Verbindung über weite Zwischenräume durch besondere Strukturen wie vibrierende Seidenfäden oder elektrische Drähte.

Der Grad von Zusammenleben, den Einwohner zeigen, ist deutlich im Bauplan sichtbar. Einzelwesen sind anders als Familien und Gruppen untergebracht. Nachkommen können im Wohnbau der Eltern oder in eigenen Räumen aufwachsen, Räume, die ausschließlich den Babies dienen.

Die Raum-, Rad- und Tuchnetze der Spinnen sind sowohl im Entwurf als auch in der Funktion verschieden. Sie sind der Ausdruck verschiedener adaptiver Strategien und zeigen Parallelen zu menschlichen Gebäuden. Netze können allein oder in Gruppen vorkommen; ein Gebäude kann vielen Funktionen durch zusammenfassendes Planen dienen.

Selbst so auffallende Unterschiede zwischen Spinnen- und menschlichen Behausungen wie Baumaterial und Verschlüsselung des Planes können Ähnlichkeiten in grundlegenden Systemprinzipien zeigen. Der Vorgang der natürlichen Auslese für das wirkungsvollste Spinnennetz ist mit den wirtschaftlichen Überlegungen vergleichbar, die ein Architekt beim Entwurf eines Gebäudes anstellt. Materialien, obwohl einheitlicher in Spinnenstrukturen als in menschlichen Gebäuden, sind in beiden Fällen nach Brauchbarkeit

\*) Denier = 0,05 g, Gewichtseinheit zur Bestimmung des Titers von Seidengarn u. a.

ausgewählt und haben daraufhin die Strukturpläne entscheidend beeinflusst.

Eine der interessantesten Aspekte von Spinnennetzen ist die Wechselwirkung zwischen ihnen und der Umgebung. Die unmittelbare Umgebung beeinflusst Netzstrukturen, aber andererseits verändern Netzstrukturen auch die Gegend, in der sie vorkommen. Wir stehen gerade am Beginn einer Periode, in der solche Fragen aufgeworfen werden. Das Verständnis dieser Wechselbeziehungen zwischen Gebäude, Baumeister und Umgebung ist möglicherweise das Gebiet, in dem wir menschlichen Baumeister in Zukunft am meisten vom genauen Beobachten der Spinnennetzpläne lernen können.

#### SCHRIFTTUM

Es werden jeweils die neuesten Übersichtsartikel zitiert. [1] G. C. Argon, Marcel Breuer: disegno industriale e architettura, Gorlich, Mailand 1957. — [2] R. Baltzer, Mitt. Naturforsch. Ges. Bern, S. 163 (1923). — [3] R. Blanke, Forma et Functio 5, 125 (1972). — [4] J. W. Burgess: The sheet web as a transducer, modifying vibration signals in social spider colonies of *Mallos gregalis*. Neuroscience Abstracts. New York 1975. — [5] J. W. Burgess, Scient. American 234, Nr. 3, 100 (1976). — [6] L. Diguët, Bull. Soc. Nat. Acclim. France, p. 240 (1915). — [7] F. Enders, Ecology 55,

317 (1974). — [8] A. Finck, G. M. Stewart, C. F. Reed, J. Acoust. Soc. Am. 57, 753 (1975). — [9] W. J. Gertsch: American Spiders. Van Nostrand, New York 1949. — [10] M. Holzapfel, Z. vergl. Physiol. 20, 55 (1933). — [11] J. Joedicke: A History of Modern Architecture. Praeger, New York 1959. — [12] E. J. Kullmann, Zool. Jb. Syst. 86, 181 (1958). — [13] E. J. Kullmann, Am. Zool. 12, 395 (1972). — [14] F. Lloyd Wright: Architecture, Man in Possession of his Earth. Doubleday, New York 1962. — [15] Y. S. Lubin, Forma et Functio 6, 337 (1973). — [16] F. Lucas, K. M. Rudall, Compreh. Biochem. 26B, 475 (1968). — [17] H. McCook: American Spiders and Their Spinning Work (1889). Pub. by author. Philadelphia 1903. — [18] P. L. Nervi: Structures. Dodge, New York 1956. — [19] C. Norberg-Schulz: Intentions in Architecture, MIT Press, Cambridge, Mass. 1945. — [20] D. B. Peakall, J. Exp. Zool. 176, 257 (1971). — [21] H. M. Peters, Zschr. Morph. Tiere 32, 613 (1936). — [22] F. O. Pickard-Cambridge, Biol. Centr. Amer. Zool. 2, 425 (1903). — [23] C. F. Reed, P. N. Witt, M. B. Scarboro, D. B. Peakall, Developm. Psychobiol. 3, 251 (1970). — [24] M. H. Robinson, B. Robinson, Zool. J. Linn. Soc. 56, 301 (1975). — [25] R. Szlep, Behaviour 23, 203 (1946). — [26] A. L. Turnbull, Ann. Rev. Entomol. 18, 305 (1973). — [27] M. Vitruvius: De Architectura. London 1940 (zit. aus [19]). — [28] C. Walcott, Am. Zool. 9, 133 (1969). — [29] H. Wiehle, Zschr. Morph. Ökol. Tiere 11, 115 (1928). — [30] P. N. Witt, Behaviour 4, 172 (1952). — [31] P. N. Witt, Am. Zool. 9, 121 (1969). — [32] P. N. Witt, Biosci. Comm. 1, 7 (1975). — [33] P. N. Witt, C. F. Reed, D. B. Peakall: A Spider's Web. Problems in Regulatory Biology. Springer, Berlin 1968. — [34] P. N. Witt, M. B. Scarboro, R. Daniels, D. B. Peakall, R. L. Gause, J. Arachnol. 4, 115 (1977). — [35] J. W. Burgess, P. N. Witt, Interdisc. Sci. Reviews 1, 322 (1976).

## Die Kernmatrix: Dynamisches Protein-Gerüst in Zellkernen

Frank Wunderlich, Freiburg

Zentrale Bedeutung kommt in Euzyten dem Zellkern als Hauptort der Replikation und Transkription zu. Dieses größte Kompartiment der Euzyte (sein Durchmesser beträgt in der Regel 3 bis 10  $\mu\text{m}$ ) beeindruckt vor allem durch seine strukturelle Komplexität und Dynamik. So sind unter anderem Kerngröße, Kernform, Anordnung und Verteilung des Eu-beziehungsweise Heterochromatins, Anzahl und besonders Ausbildung und Feinstruktur der Nucleoli in den verschiedenen Zelltypen recht mannigfaltig, variieren aber auch innerhalb eines Zelltyps in Abhängigkeit vom physiologischen Zustand, vom Zellzyklus, von der circadianen Periodizität usw. Zum Beispiel vergrößert sich der Kern vor dem Einsetzen der DNA-Synthese [1, 2, 3]. Oder: Die Gestalt der Kerne kann rund bis länglich ovoid, aber auch stark gelappt sein (Abb. 1—4). Eine besonders markante Veränderung in der Kernform läuft bei der Muskelkontraktion ab: Kerne mit glatter Oberfläche liegen in ent-

spannten Zellen vor (Abb. 2), während im kontrahierten Zustand die Kerne gelappt beziehungsweise verdrillt sind (Abb. 3). Oder: Kerne mit fast nur aufgelockertem, dem genetisch aktiven Euchromatin kommen bevorzugt in embryonalen oder proliferierenden Zellen vor (Abb. 6). Die umgekehrte Situation — Kerne mit ausschließlich kondensiertem Heterochromatin — ist in stoffwechselphysiologisch relativ inaktiven Zellen anzutreffen (Abb. 5). Oder: Kerne enthalten häufig nur einen, meist stark entwickelten Nucleolus (Abb. 1); andere Kerne dagegen können

Dr. rer. nat. F. Wunderlich (geb. 19. November 1943) ist Priv.-Doz. für Zellbiologie an der Universität Freiburg. Hauptarbeitsgebiete: Biomembranen, Kernmatrix, Kern-Cytoplasma-Stoffaustausch.

Priv.-Doz. Dr. F. Wunderlich, Lehrstuhl für Zellbiologie, Institut für Biologie II, Universität Freiburg i. Br., Schänzlestr. 1, 7800 Freiburg.