



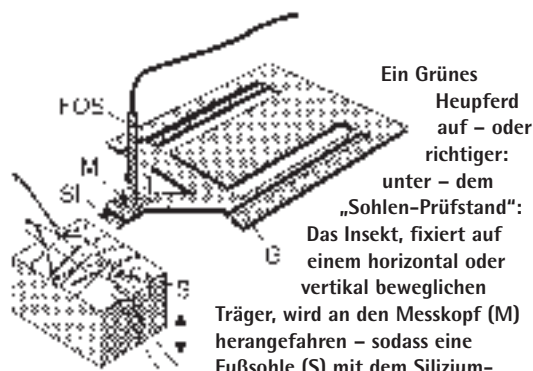
Wo Heupferde hintreten, da wächst allerlei Gras und „Grünzeug“ mit unterschiedlich glatten oder rauhen Blattflächen. Dennoch finden diese Insekten, wo immer sie nach einem Sprung aufkommen, sofort und zuverlässig Halt.

Diese Trittsicherheit vermitteln besondere, auf Reibung und Haftung angelegte Sohlenbläschen – „Fußwerkzeuge“, mit deren Feinbau und Funktion sich Forscher am Tübinger **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ENTWICKLUNGSBIOLOGIE** beschäftigen.



FOTOS: FISLER / GRAFIK: GORB

Wie Insekten Tritt fassen



Danach wird das Insekt seitlich oder nach unten bewegt: Die dabei durch Reibung beziehungsweise Haftung der Sohle am Messkopf ausgeübte Kraft führt zu einer entsprechenden Auslenkung der Feder (G), die über eine Faseroptik (FOS) gemessen wird.

Grasgrün, dreieinhalb Zentimeter lang und ein Gramm schwer: So präsentiert sich *Tettigonia viridissima*, das „Grüne Heupferd“ – eine der respektabelsten Erscheinungen unter den hier zu Lande heimischen Laubheuschrecken. Der Name Heuschrecke geht auf „schricken“ zurück, auf das althochdeutsche Wort für „springen“. Und dem macht das Grüne Heupferd alle Ehre: Bis zu einen Meter weit schnellst dieses Insekt kraft seiner ausgeprägten Sprungbeine – des hinteren Beinpaars – durch die Luft.

Ebenso bemerkenswert wie dieses Sprungvermögen ist die geradezu traumwandlerische Sicherheit, mit der das Große Heupferd jeweils landet. Es fasst augenblicklich Fuß, wo immer sein Sprung auch hinführt: ob auf ein glattes oder rauhes, ein ledrig-hartes oder filzig-weiches Blatt, ob auf eine horizontale, an eine senkrechte oder sogar überhängende Fläche.

Doch nicht nur das Große Heupferd ist derart trittsicher. Auch die meisten anderen Insekten sowie viele Spinnen, manche Frösche und der Mauergecko können sich auf oder an Oberflächen unterschiedlichster Beschaffenheit und Neigung halten und bewegen – und das ohne „Haken und Ösen“, also ohne die Hilfe irgendwelcher Greifwerkzeuge. Zwar tragen viele Insekten, so auch das Grüne Heupferd, Klauen oder Zangen an ihren Beinen; damit können sie dünne Halme oder Stängel umgreifen und sich daran emporhängeln. Doch auf mehr oder minder glatten Pflanzenblättern ist damit nichts auszurichten: Auf solch griffllosem Terrain helfen nur Reibung und Haftung, fachlich Friktion und Adhäsion genannt.

Mit diesen beiden Kräften befasst sich eine eigene physikalisch-technische Disziplin namens Tribologie – im Duden als „Wissenschaft von Rei-

bung, Verschleiß und Schmierung“ eingedeutscht. Ein zoologischer Ableger dieses Fachs gedeiht seit gut zwei Jahren am Tübinger Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie: Dort, in der von Prof. Uli Schwarz geleiteten Abteilung Biochemie, arbeitet eine Gruppe „Biologische Mikrotribologie“ unter Dr. Stanislav Gorb, und zwar hauptsächlich mit Insekten – darunter auch mit dem bereits vorgestellten Grünen Heupferd.

Insekten stellen, tribologisch betrachtet, ungemein ergiebige Forschungsobjekte dar. Das liegt zunächst daran, dass diese Tiere in einem so genannten Exoskelett stecken, in einer Hülle aus Cuticula, die gleich einer Ritterrüstung aus einzelnen starren, doch gelenkig verbundenen Formteilen besteht.

Viele dieser Gelenke sind nicht nur einfache, um eine Achse schwenk-

bares Nervensystem voraussetzen, das diese Muskeln steuert und koordiniert.“

Also hat die Evolution bei den Insekten an „Hirnschmalz“ gespart und stattdessen in Mikromechanik investiert – sozusagen nach dem Motto: Was man nicht im Kopf hat, das hat man eben in den Beinen, respektive Gelenken ...

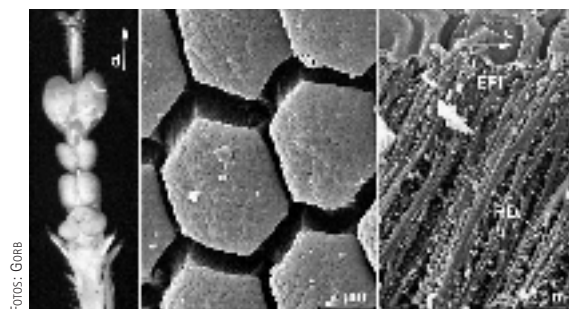
PROBLEMLOSE LANDING AUF GLASSCHEIBEN

Gorb und seine Mitarbeiter interessieren sich allerdings nicht nur für die Gelenke von Insekten. Ihr besonderes Augenmerk gilt den Füßen oder genauer: den Fußsohlen dieser Tiere. Denn diese „Tretwerkzeuge“ verkörpern tribologisches Know-how in Vollendung: Insekten können sich damit auf Blättern aller Art, auf Holz oder auf Gesteinsoberflächen festsetzen und bewegen, ohne den Halt zu

verlieren. Und sie können sogar auf Glasscheiben landen und laufen, auf Flächen also, die in dieser Glätte in der Natur gar nicht vorkommen.

Es ging der Natur folglich nicht darum, Insekten auch auf Glas spazieren gehen zu lassen (und damit Hausfrauen zu ärgern). Vielmehr kam es darauf an, diese Tiere an die breite Vielfalt unterschiedlich rauher Oberflächen anzupassen, die in der Umwelt vorkommen: Ihre Füße soll-

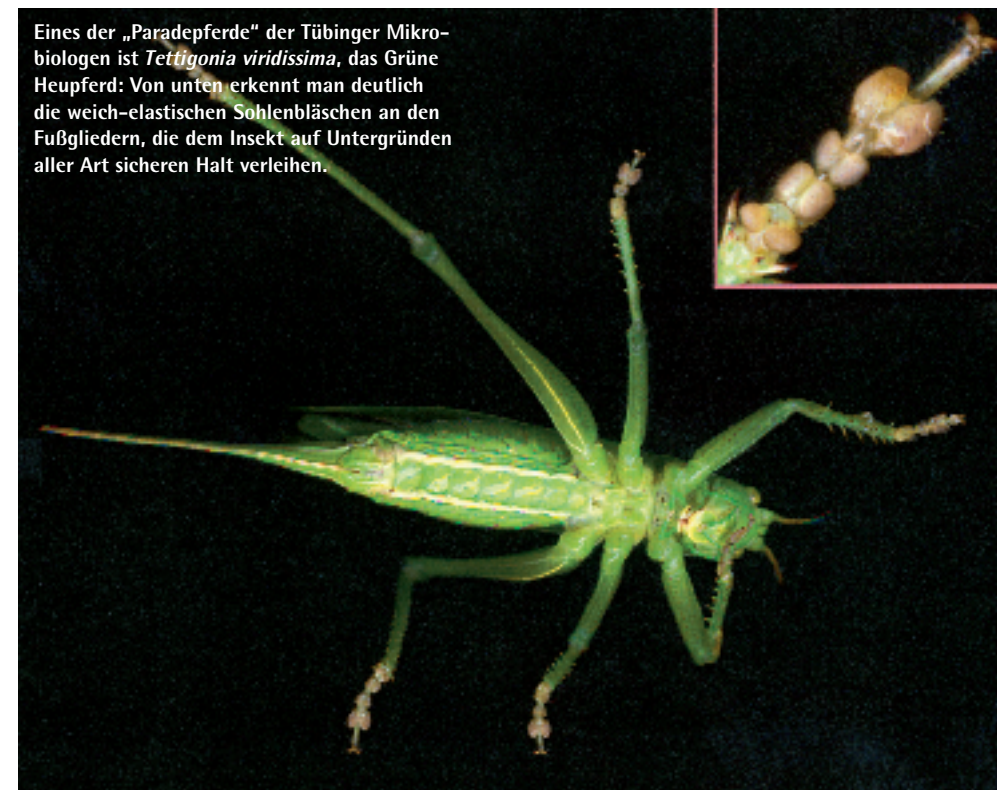
Das Raster-Elektronenmikroskop enthüllt die Feinstruktur der Sohlenbläschen: Ihre Oberfläche ist mosaikartig aus kleinen Sechsecken zusammengesetzt (mittleres Bild), die ihrerseits auf faserigen Strukturen gründen (rechtes Bild). Diese Fasern verlaufen in distaler Richtung (d), das heißt, sie weisen vom Körper weg nach außen: Bedingt durch diese Architektur ist die Reibungskraft der Sohlen am höchsten in Richtung zum Körper hin – etwa, wenn sich das Insekt an senkrechten oder gar überhängenden Flächen halten muss (1µm entspricht einem tausendstel Millimeter).



FOTOS: GORB

bare Scharniere, sondern mikromechanische Meisterwerke: Ihre kompliziert geformten und ineinander greifenden Gelenkflächen bilden Zwangsführungen, die multiaxiale – also dreidimensionale – Bewegungsabläufe nach einer vorgegebenen „Choreografie“ steuern. Manche dieser Gelenke sind zudem mit einer Art Gangschaltung ausgerüstet, manche mit Arretierungen und andere wieder sind miteinander gekoppelt, um synchrone Bewegungen – etwa der Sprungbeine – zu gewährleisten.

So viel Aufwand in die Mechanik und Automatik von Gelenken zu stecken, ist durchaus sinnvoll, wie Gorb erläutert: „So genügt oft ein einziger Muskel, um einen komplexen Bewegungsablauf rasch und exakt ‚durchzuziehen‘. Andernfalls wären zusätzliche Muskeln zur räumlichen und zeitlichen Steuerung der Bewegungen erforderlich. Und das würde ein entsprechend leistungs-



Eines der „Paradepferde“ der Tübinger Mikrobiologen ist *Tettigonia viridissima*, das Grüne Heupferd: Von unten erkennt man deutlich die weich-elastischen Sohlenbläschen an den Fußgliedern, die dem Insekt auf Untergründen aller Art sicheren Halt verleihen.

ten also, was Reibung und Haftung angeht, nicht auf extreme Glätte spezialisiert, sondern möglichst universell auf allen natürlichen Oberflächen einsetzbar sein. Erstaunlicherweise genügte der Evolution zwei grundlegende Konstruktionen, um eine fast unüberschaubare Vielzahl von Insekten und viele andere Tiere mit solchen – wie man heute sagen würde – „All-terrain“-Gehwerkzeugen auszustatten. Dazu Stanislav Gorb: „Die eine Alternative findet man beispielsweise bei der Stubenfliege, bei Spinnen und auch beim Mauergecko: Sie tragen an den Fußsohlen feine Härchen, die eine Art Bürste bilden. Die zweite Lösung, verwirklicht unter anderem am Grünen Heupferd, besteht in glatt-elastischen Näpfchen oder Bläschen an den Sohlen, wozu bei Insekten noch die Sekretion von Flüssigkeit kommt – die allerdings nicht als ‚Kleber‘, sondern nur als Haftvermittler wirkt.“

Spinnen und Geckos brauchen diese Flüssigkeit nicht. Denn ihre Sohlenhärchen sind besonders fein und können einen hauchdünnen Wasserfilm nutzen, der sämtliche

Oberflächen in der Natur überzieht. Diese wenige millionstel Millimeter dünne Wasserhaut macht sich bei der so genannten Kraft-Mikroskopie durch einen „Kontaktsprung“ am atomar-feinen Mikroskopfühler bemerkbar und wirkt vermutlich auch als universeller Haftvermittler für die mikroskopisch feinen Härchen an den Fußsohlen der Spinnen und Geckos.

Die Konstruktion und Funktion dieser Haftorgane systematisch und im Detail aufzuklären, dieses Ziel der Tübinger Mikrotribologen erforderte einen interdisziplinären Ansatz, der Zoologie, Strukturbioogie, Physik und Materialwissenschaft umfasst. Besonders wichtig war dabei die Entwicklung experimenteller Verfahren, mit denen sich Insekten sozusagen „auf Schritt und Tritt“ verfolgen lassen. So wurde beispielsweise in

enger Zusammenarbeit mit Dr. Matthias Scherge von der Gruppe Mikrotribologie der Technischen Universität Ilmenau ein Messkopf konstruiert, mit dem man Reibungs-, Adhäsions- und Materialeigenschaften einzelner Sohlelemente von Insekten genau messen kann.

EIN TRITTBRETT UND EIN KARUSSELL

Das Herzstück dieser Apparatur bildet eine lasergefräste Feder, die sich sowohl horizontal als auch vertikal auslenken lässt und an ihrem Ende ein sehr glattes Silizium-Plättchen trägt. Dieses Plättchen dient sozusagen als „Trittbrett“ für die Fußsohle eines Insekts, das unter der Feder auf einer beweglichen Plattform fixiert ist: Die Forscher setzen die Fußsohle des Tiers auf das Plättchen

Aus der Drehzahl des Zylinders, dem Gewicht des Insekts und dessen Abstand von der Drehachse errechnen die Wissenschaftler die Fliehkraft beim „Abwurf“: Sie entspricht der Reibungskraft der Fußsohlen, vorausgesetzt, das Insekt sitzt auf der horizontalen Deckfläche; im anderen Fall, wenn das Versuchstier an der senkrechten Mantelfläche „klebt“, misst man die Adhäsionskraft.

Indem die Experten die Flächen des Zylinders mit unterschiedlichen Materialien belegen, erhalten sie Aufschluss darüber, wie die Rutsch- und Haftbarkeit eines Insekts von der Beschaffenheit des Untergrunds abhängt. Neben Pflanzenblättern aller Art dienen für solche Experimente Schleif- und Polierpapiere mit jeweils genormter Körnung sowie glat-

unabhängig davon, ob sie auf Wasser anziehend (hydrophil) oder abstoßend (hydrophob) wirken.

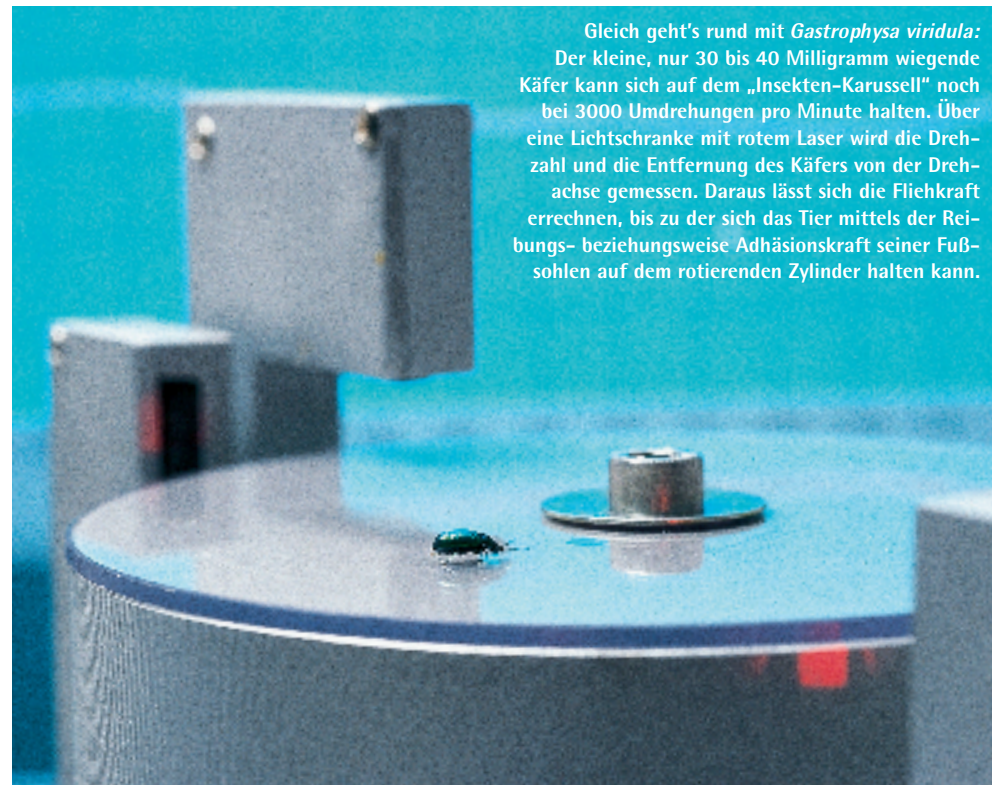
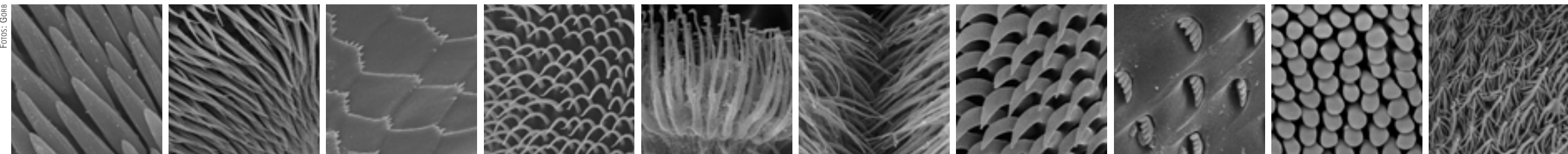
Auch bei rauen Unterlagen spielt die Chemie eine untergeordnete Rolle. Entscheidend ist vor allem die Rauheit – und da gibt es einen Bereich, der für Insektenfüße ausgesprochen schlecht ist: Auf Flächen, deren Unebenheiten in der Dimension von wenigen tausendstel Millimetern liegen, ist das Haltevermögen der Fußsohlen erheblich vermindert, und zwar unabhängig davon, ob die Sohlen mit haarigen „Bürsten“ oder mit elastischen Bläschen ausgestattet sind.

„Das liegt daran, dass die Sohlen jeweils eine Mikrostruktur aufweisen, was den Abstand der Bürstenhaare beziehungsweise der flächigen Einzelelemente angeht, aus denen



Auch eine Hochgeschwindigkeits-Videokamera gehört zum Instrumentarium der Tübinger Mikrotribologen. Mit ihr lassen sich Insekten auf Schritt und Tritt verfolgen, kann man Bewegungsabläufe im Detail studieren und das Aufsetzen und Ablösen der Fußsohlen genau verfolgen. Im Bild vorne Prof. Uli Schwarz, Leiter der Abteilung Biochemie am Tübinger Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie; hinter ihm Dr. Stanislav Gorb und auf dem Bildschirm *Gastrophysa viridula* – eines der „Haustiere“ der Gruppe „Biologische Mikrotribologie“.

Die Bildleiste zeigt eine kleine Auswahl aus der Vielzahl von Strukturen, die in Gelenken oder an den Fußsohlen von Insekten für Reibung und Haftung sorgen.



Gleich geht's rund mit *Gastrophysa viridula*: Der kleine, nur 30 bis 40 Milligramm wiegende Käfer kann sich auf dem „Insekten-Karussell“ noch bei 3000 Umdrehungen pro Minute halten. Über eine Lichtschranke mit rotem Laser wird die Drehzahl und die Entfernung des Käfers von der Drehachse gemessen. Daraus lässt sich die Fliehkraft errechnen, bis zu der sich das Tier mittels der Reibungs- beziehungsweise Adhäsionskraft seiner Fußsohlen auf dem rotierenden Zylinder halten kann.

und können, indem sie das Insekt horizontal oder vertikal bewegen, die Adhäsions- beziehungsweise Reibungskräfte anhand der Auslenkung der Federspitze messen.

Noch eleganter und, jedenfalls für Laien, origineller erscheint ein anderes Gerät der Tübinger Forscher, das man als „Insekten-Karussell“ bezeichnen könnte. Es besteht aus einem senkrecht um seine Achse drehbaren Zylinder und gestattet die gesonderte Messung der Rutschsicherheit (Reibung) sowie des Haftvermögens (Adhäsion) eines Insekts auf Oberflächen unterschiedlicher Struktur. Dazu setzen die Wissenschaftler das Tier entweder auf die horizontale, kreisförmige Deckfläche oder auf die vertikale Mantelfläche des Zylinders und lässt diesen dann immer schneller rotieren – und zwar so lange, bis das Insekt infolge der wachsenden Fliehkraft vom Karussell abgeworfen wird.

te Glas- oder Siliziumscheiben als Testflächen.

Erwartungsgemäß erweisen sich auf dem Karussell vor allem Leichtgewichte unter den Insekten als besonders standhaft. So bleiben etwa junge Blattläuse noch bei bis zu 2000 Umdrehungen pro Minute auf dem Zylinder sitzen. „Und unser Champion“, berichtet Gorb, „ist *Gastrophysa viridula*, ein grün-metallisch glänzender Käfer von 30 bis 40 Milligramm Gewicht: Er hält auf manchen Testflächen bis zu 3000 Umdrehungen pro Minute durch, bis zur höchstmöglichen Drehzahl unseres Geräts. Dabei entspricht die angreifende Fliehkraft etwa dem Zwanzigfachen seines Eigengewichts.“

Allgemein, so die Befunde, liegt die Haltekraft der Insekten auf glatten Flächen – wie etwa auf Glas – sehr hoch, und zwar unabhängig von deren physikalisch-chemischen Eigenschaften, also beispielsweise

sich die elastischen Bläschen zusammensetzen. Stimmt diese Mikrostruktur der Sohlen schlecht mit der des Untergrunds überein, so ist das ungünstig für die Bodenhaftung“, sagt Gorb. Ob Pflanzen dieses „Interferenz-Phänomen“ ausnutzen, um Insekten den Zutritt zu verwehren, ist noch nicht näher untersucht. Doch ein solcher Lotos-Effekt wäre durchaus denkbar, meint Stanislav Gorb (und damit für Hausfrauen vielleicht auch die „fliegenfreie“ Fensterscheibe ...).

BIOLOGISCHE LÖSUNGEN FÜR TECHNISCHE PROBLEME

Mit der biologischen Mikrotribologie ist am Tübinger Max-Planck-Institut ein ebenso originelles wie „anwendungsträchtiges“ Forschungsgebiet eingezogen, das auch vom Bundesforschungsministerium mit finanziert wird. Es ist zu erwarten, dass man von dem tribologischen Know-

how, das in Insekten verwirklicht ist, auch mancherlei auf technische – insbesondere mikromechanische – Konstruktionen übertragen kann.

Zunächst geht es freilich darum, die vielfältigen Phänomene auf dem noch jungen Gebiet der biologischen Mikrotribologie systematisch zu erfassen, methodisch in den Griff zu bekommen und nach prinzipiellen Gesichtspunkten zu ordnen. Die Vielfalt dieser Phänomene entspricht dabei der Vielfalt der Tierklasse, die wie keine andere auf „tribologischer Grundlage“ lebt: Insekten gehören zu den artenreichsten und erfolgreichsten Lebewesen auf diesem Planeten – und einen guten Teil dieses Erfolgs verdanken sie den ausgeklügelten und ausgereiften Konstruktionen ihrer Gelenke und Fußsohlen. Davon kann der Mensch, über die Mikrotribologie, sicher allerhand lernen und sich am Ende auch zu Nutzen machen.

WALTER FRESE