

## Spinnenfaden, Leimtröpfchen und Oberflächenspannung – Die faszinierende physikalische Welt der Spinnennetze



Spinnennetze sind meist nicht nur schön anzusehen, sondern können auch faszinierend sein, wenn man ihren Aufbau und ihre Eigenschaften näher betrachtet.

### Zuerst die **Eigenschaften eines Spinnenfadens:**

Spinnen produzieren je nach Spezies und Verwendungszweck verschiedene Sorten von Fäden. Die Längsfäden eines Netzes (Leitfäden) haben einen Durchmesser von etwa 0,2 Mikrometern. D.h. in einem Kubikmillimeter finden etwa 30 km Faden Platz!!!

Ein Spinnfaden kann auf das Fünffache seiner Länge gedehnt werden. Er besitzt materialtechnisch gesehen also eine maximale Dehnbarkeit, zudem eine hohe Reißfestigkeit (er muss den ungebremsten Anflug eines Insekts stand halten) und er ist sehr robust. Außerdem darf ein Spinnfaden keine hohe Rückfederung besitzen, da sonst die Insekten gleich wieder aus dem Netz katapultiert werden würden. Ein derartiges Material muss also den größten Teil der hineingesteckten Energie in Wärme umwandeln, ohne dabei zu zerfließen. Die Leimtröpfchen helfen diese Eigenschaft zu unterstützen.

### **Aufbau eines Spinnenfadens**

Seine Stabilität erhält der dünne Spinnfaden durch lange Eiweißketten (Seidenproteine), die in einer unstrukturierten Trägermasse „schwimmen“. Das wesentliche Material eines Spinnenfadens ist also Protein, eine Kette von Aminosäuren (davon gibt es 20 verschiedene). Für ihre Fäden verwendet die Spinne allerdings nur sieben Aminosäuren (vor allem Alanin und Glyzin). Ein Protein ist gekennzeichnet durch die Abfolge seiner Aminosäuren. Je nach Bau faltet sich die Aminosäurekette zu einer für das Protein typischen 3D-Struktur, die auch seine Funktion bestimmt.

Die Reißfestigkeit eines Längsfadens z.B. ist bedingt durch seine Dicke, seine kristalline Struktur und dadurch, dass er aus mehreren Einzelsträngen besteht.

Die Verbindungsfäden hingegen sind etwas dünner. Zudem kann man darauf kleine Leimtröpfchen beobachten, an denen die Beutetiere kleben bleiben. Unter dem Mikroskop sieht man, dass die Leimtröpfchen einen regelmäßigen Abstand haben. Dieser entsteht auf Grund eines physikalischen Prinzips.

### **Wie entstehen die Leimtröpfchen?**

Beim Spinnen der Verbindungsfäden werden diese durch eine Drüse gleichmäßig mit einer dünnen Leimschicht überzogen. Dieser Überzug bleibt aber nicht so, sondern es entstehen auf Grund der Oberflächenspannung entlang des Spinnfadens kleine Tröpfchen (Kügelchen). Das physikalische Prinzip dahinter ist jenes der Minimierung der Oberflächenenergie: Bei gegebenem Volumen hat eine Kugel die kleinste Oberfläche, die Oberflächenenergie erreicht damit einen minimalen Wert.

Den gleichen Effekt kann man auch beobachten, wenn man einen feinen Wasserstrahl aus einem Wasserhahn laufen lässt: Nach kurzer Fallzeit löst sich der Strahl in einzelne Tropfen auf.

Dies gilt allgemein für Flüssigkeiten: Erreicht die Länge eines Flüssigkeitsfadens ein Vielfaches des Umfangs, so wird er instabil und schnürt sich, je nach Länge, an mehreren Stellen ein und zerfällt schließlich in einzelne Tropfen. Die folgende Information zur Oberflächenspannung soll dieses Prinzip genauer erläutern:

## Oberflächenspannung

### Einleitung

Die Oberflächenspannung ist neben Dichte und Viskosität die dritte wesentliche Eigenschaft von Flüssigkeiten. Die relative Größe des Wertes der **Oberflächenspannung** ( $\sigma$ ) ist augenfällig: Etwas in eine Schale gegebenes Quecksilber flutscht in Form ziemlich perfekter Kügelchen am Gefäßboden herum; dabei würde eigentlich die hohe Dichte - ein Liter davon wiegt immerhin rund 14 Kilogramm - jedes Tröpfchen platt drücken. Der Schwerkraft stemmt sich diese Oberflächenspannung entgegen, und sie ist bei Quecksilber sehr groß ( $\sigma = 484 \text{ mN/m}$ ). Ein Öltröpfchen (ca.  $30\text{-}40 \text{ mN/m}$ ) verhält sich da anders: obwohl die Dichte viel geringer ist, zerfließen Öltröpfchen meist zu einem dünnen Film.

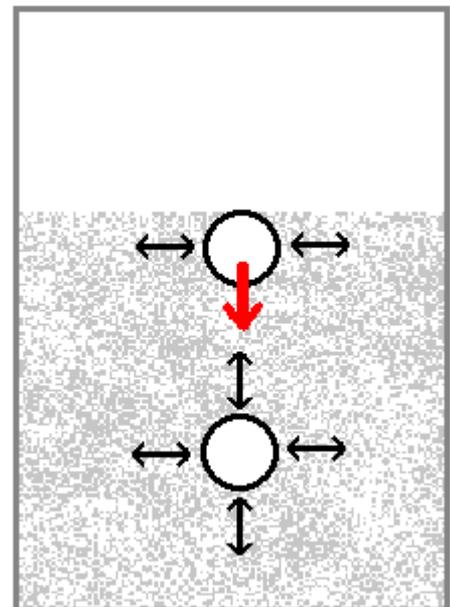
Der Effekt hängt dabei von der Oberfläche des Untergrunds ab: Öl in einer Teflonpfanne lässt sich auf dieser Oberfläche nicht gut zu einem Film verteilen (spreiten), es hat hier die starke Tendenz wieder zusammenzufließen, und möglichst wenig der Teflonfläche zu bedecken (benetzen). Andererseits kann man Stahlpfannen mühelos mit einem Ölfilm bestreichen. Verantwortlich dafür sind die Oberflächen- und Grenzenergie der beiden Stoffe. Während im ersten Fall Teflon eine Oberflächenenergie hat, die geringer als die des Öls ist, ist die des Stahls größer (vgl. dazu auch die Informationen zum **Lotuseffekt** auf dieser Website).

Wie die Begriffe "Ober- bzw. Grenzflächenenergie" schon andeuteten, ist der Energiebegriff von Bedeutung. Der Energiegehalt eines Systems versucht immer ein Minimum zu erreichen. Der Energieinhalt des Systems ist also jeweils minimal, wenn also das Öl die Metalloberfläche bedeckt bzw. die des Teflons eben nicht. Das Braten in einer teflonbeschichteten oder unbeschichteten Pfanne, gibt im mehr oder weniger festsitzenden Resultat einen Zusammenhang mit der Adhäsion wieder.

### Physikalische Erklärung anhand von Wassermolekülen

Wasser besteht aus Molekülen. Jedes Molekül bewirkt auf die Nachbarmoleküle anziehende und abstoßende Kräfte. Zieht man sie auseinander überwiegen die anziehenden, drückt man sie zusammen überwiegen die abstoßenden Kräfte. Auf diese Weise stellt sich zwischen Nachbarmolekülen ein ziemlich konstanter Abstand ein. Innerhalb der Flüssigkeit hat ein Wassermolekül in allen Richtungen Nachbarmoleküle und deshalb gleichen sich die Kräfte (**die Kohäsionskräfte**) dort aus. An der Oberfläche hat ein Molekül nur zur Wasserseite hin Nachbarmoleküle, zur Luftseite hin jedoch grenzen keine weiteren Moleküle (**Adhäsionskräfte** vernachlässigbar). Ein Oberflächenmolekül wird also sofort wieder zurückgezogen, wenn es sich ein wenig aus der Oberfläche hinaus bewegen will.

Die Wasseroberfläche ist demnach wie eine Membran gespannt.



Um Moleküle vom Inneren der Flüssigkeit an die Oberfläche zu bringen – um sie also von ihren Bindungen zu lösen – muss Arbeit verrichtet werden.

**Definition:**

- Freie Moleküle (außerhalb des Wassers):  $E_{\text{pot}}=0$
- Moleküle im Inneren: kleine  $E_{\text{pot}}$
- Moleküle auf der Oberfläche: große  $E_{\text{pot}}$
- Differenz der beiden  $E_{\text{pot}} = \text{Oberflächenenergie/Teilchen}$

**Oberflächenenergie** ist also der "Vorrat an potentieller Energie", den die an der Flüssigkeitsoberfläche liegenden Moleküle besitzen. Größere Oberfläche bedeutet also größere potentielle Energie. (Beachte: Bestrebung zu minimaler Energie!)  
 Wird die Oberfläche einer Flüssigkeit vergrößert, so muss aufgrund der Oberflächenspannung Arbeit verrichtet werden.

**Definition der Oberflächenspannung  $\sigma$ :**

Die Arbeit, die zur Vergrößerung der Oberfläche verrichtet werden muss, geteilt durch die Fläche, die dabei zusätzlich entsteht. Die Oberflächenspannung kann daher auch als **Oberflächenenergie-dichte** bezeichnet werden.

$$\sigma = \frac{\text{Arbeit zur Bildung von neuer Oberfläche}}{\text{neu entstandene Oberfläche}}$$

$$\sigma = \Delta W / \Delta A$$

$$[\sigma] = \text{J/m}^2 = \text{Nm/m}^2 = \text{N/m}$$

Oberflächenspannung verschiedener Flüssigkeiten bei 20 °C:	
Flüssigkeit	Oberflächenspannung in mN/m
Aceton	23,3
Benzol	28,9
Ethanol	22,55
Quecksilber	476
Wasser	72,75

**Beispiel:** Oberflächenspannung von Wasser

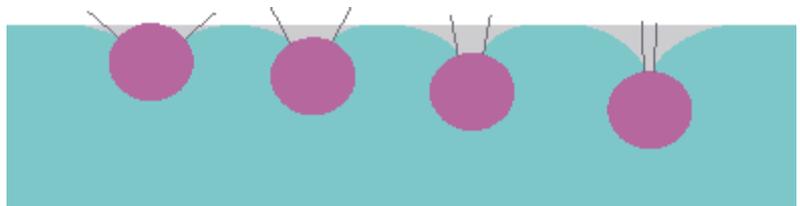
$$\sigma = 72,5 \cdot 10^{-3} \text{ N/m} = 0,0725 \text{ N/m (bei 20 °C)}$$

Zusatz von 25 Gewichtsprozent Kochsalz:  $\sigma = 0,08 \text{ N/m}$  für Wasser (Vergrößerung!)

Wegen der Oberflächenspannung nehmen kleine Tropfen Kugelform an. Somit werden Oberfläche und Energie minimiert, da die Kugel bei gegebenem Volumen die kleinste Oberfläche hat.  
 $\sigma$  nimmt mit wachsender Temperatur ab und reagiert empfindlich auf geringfügige Verunreinigungen, beispielsweise durch Tenside aus Spülmitteln.

**Das Tragen leichter Gegenstände**

Sinkt ein Gegenstand z.B. eine dünne Nadel in die Wasseroberfläche ein, so trifft das Wasser an die Grenzschicht unter dem durch das Verhältnis der Kohäsions- und Adhäsionskräfte vorgegebenen Winkel und wird dabei nach unten gezogen, wie oben gezeichnet. Solange die beiden Wasseroberflächen noch nicht über dem Körper zusammenstoßen, geht der Körper nicht unter und erhält durch die Flüssigkeit eine Auftriebskraft, die der Gewichtskraft des durch Nadel und Herunterbiegen der Wasseroberfläche (hellgrau) verdrängten Wasservolumens entspricht. Schließen sich die Wasseroberflächen oberhalb des Körpers, so ist nur noch das Nadelvolumen (lila) für den Auftrieb zuständig und die Nadel sinkt.



## Experimente zur Oberflächenspannung

### Experiment 1: Tragen leichter Gegenstände

#### Material

flache Schüssel – gefüllt mit Wasser  
mehrere Zehngroschenstücke  
Spülmittel

#### Durchführung

- Geht in Gruppen zu zwei bis drei Personen zusammen.
- Versucht die Zehngroschenstücke einzeln vorsichtig auf die Wasseroberfläche zu legen, dass sie schwimmen und nicht untergehen.  
Wie viele Geldstücke könnt ihr zum Schwimmen bringen?
- Wenn ein paar Geldstücke schwimmen tropft langsam ein paar Tropfen Spülmittel in die Schüssel und beobachtet, was passiert.
- Versucht eure Beobachtungen zu erklären.
- Versucht nun ein paar Eincent- oder Fünfcent-Stücke zum Schwimmen zu bringen. Funktioniert das auch mit diesen Geldstücken?

### Experiment 2: Messung der Oberflächenspannung

#### Versuchsbeschreibung

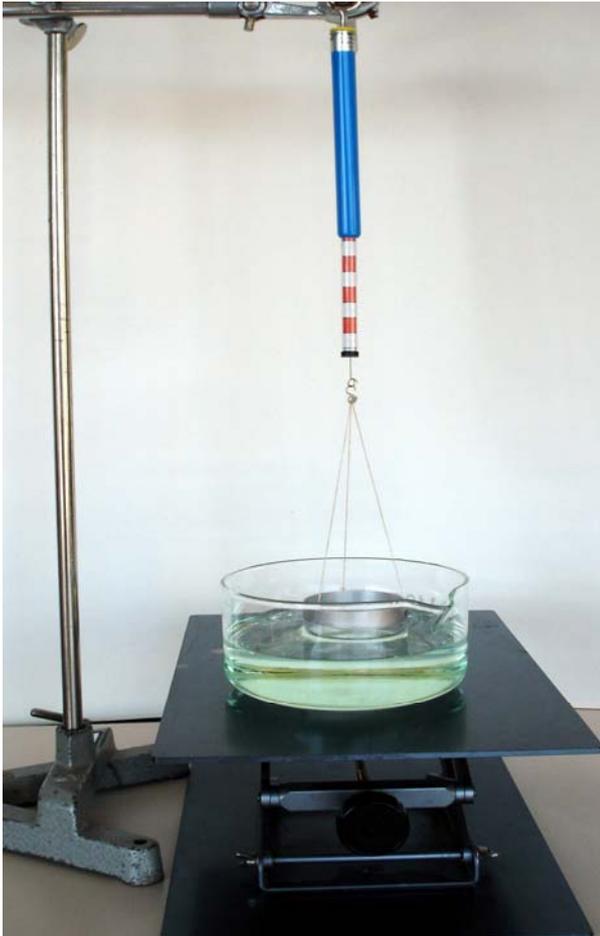
Ein Metallring hängt auf einer Federwaage ins Wasser (siehe Bild nächste Seite). Das Wassergefäß, welches auf einem Laborboy steht, wird langsam nach unten geschraubt. Durch die Oberflächenspannung wird bleibt eine Wasserhaut auf dem Ring zurück. Wenn die Oberfläche „reißt“, was bedeutet, dass die Oberflächenspannung überwunden ist, wird die Kraft an der Federwaage gemessen, die durch die Oberflächenspannung zusätzlich aufgetreten ist.

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A} \dots\dots\dots \frac{\text{aufgewendete Arbeit}}{\text{entstandene Fläche}}$$

$$\sigma = \frac{F \cdot \Delta h}{2r\pi \cdot \Delta h \cdot 2} \dots\dots\dots \frac{\text{aufgewendete Kraft} \cdot \text{Höhe der Anhebung}}{\text{Zylindermantel} \cdot 2}$$

$$\sigma = \frac{F}{4r\pi} \dots\dots\dots \frac{F \text{ wird von der Federwaage abgelesen}}{r \text{ wird vom Ring gemessen}}$$

Bau den Versuch gemäß der Abbildung auf und berechne die Oberflächenspannung  $\sigma$ !



### Weitere Experimente

- Gib ein paar Tropfen Öl in eine Stahl- und in eine Teflonpfanne und beobachte, was passiert! (Wenn du das Phänomen genauer untersuchen willst, dann lies dir auch die Website zum Lotuseffekt durch.)
- Tauche verschiedene Kantenmodelle (Würfel, Tetraeder, Ring, Spirale, ...) aus Draht in eine Seifenlauge. Dabei entstehen Minimalflächen. Versuche dieses Phänomen mit Hilfe der Oberflächenspannung physikalisch zu erklären.

### Literatur

Binder, R.: *Manuskript zur Oberflächenspannung und zum Lotuseffekt. Jahr der Physik.* Gmünd 2005

Tipler, Paul A.: *Physik.* Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg – Berlin 1998

Vogel, S.: *Von Grashalmen und Hochhäusern. Mechanische Schöpfungen in Natur und Technik.* WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim 2000

Wittmann, J.: *Physik in Wald und Flur.* hpt-Verlag, Reihe Physik-compact Sonderthemen. 1. Auflage 1998