

## Der Lotuseffekt<sup>1</sup>

Pflanzen sind von Natur aus unterschiedlichen Verschmutzungen ausgesetzt. Die meisten sind anorganischer Natur (verschiedenartiger Staub, Ruß), andere biologischen Ursprungs (Pilzsporen, Konidien, Honigtau, Algen). Darüber hinaus unterscheiden sie sich hinsichtlich ihrer Benetzbarkeit, also ob sie von einem Wassertropfen aufgenommen werden oder auf dessen Oberfläche schwimmen. Dies hat ein unterschiedliches Reinigungsverhalten zur Folge. Auf rauen, unbenetzbaren Blättern ist nicht nur die Adhäsion von Wasser an die Oberfläche verringert, sondern auch die von Schmutz. Rollt ein Tropfen über die nur lose aufliegenden Schmutzpartikel hinweg, dann werden sie von Wasser benetzt und haften an der Tropfenoberfläche. Durch die sehr geringe Adhäsion an die Oberfläche werden die Partikel mitgerissen und vom Blatt entfernt.

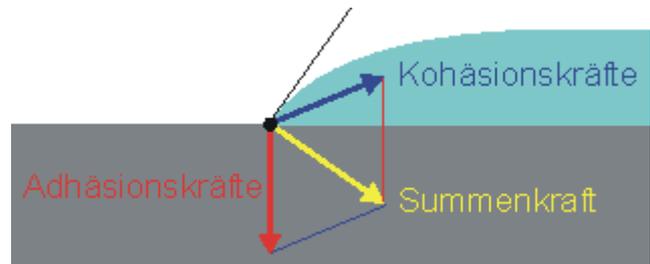


### Unter welchem Winkel trifft das Wasser auf die Unterlage?

Betrachtet man den Kontakt zweier unterschiedlicher Medien (außer Luft), genügt es nicht mehr von der eigenen Oberflächenspannung zu sprechen, zwischen den beiden Medien kommt es zu einer **Grenzflächenspannungen**.

Bringt man einen Flüssigkeitstropfen auf eine feste Oberfläche, so wirken auf das schwarz gezeichnete "Randmolekül der Flüssigkeit" sowohl die

Anziehungskräfte der benachbarten Flüssigkeitsmoleküle (*die Kohäsionskräfte*) und die Anziehungskräfte der benachbarten Festkörpermoleküle (*die Adhäsionskräfte*). Diese beiden Kräfte (und eventuell noch Gewichtskräfte) ergeben eine Summenkraft. Die Oberfläche der Flüssigkeit an der Berührstelle stellt sich dann an dieser Stelle senkrecht zur Summenkraft ein.



### Benetzend oder nicht benetzend?

Sind die Kohäsionskräfte kleiner als die Adhäsionskräfte, so spricht man von einer benetzenden Flüssigkeit. Um ein äußeres Molekül einer benetzenden Flüssigkeit zu entfernen muss mehr Arbeit aufgewendet werden als für ein Molekül aus dem Inneren. Es befindet sich auf einem noch tieferen Energieniveau, als das innere Teilchen und liefert einen **negativen** Beitrag zur **Grenzflächenenergie**. Eine Vergrößerung der Oberfläche bewirkt eine Verkleinerung der Energie des Systems.

Hat eine Flüssigkeit also eine negative Grenzflächenenergiedichte (= **Grenzflächen-spannung**) so ist sie bestrebt sich möglichst weit auszudehnen, um den stabilen Gleichgewichtszustand herzustellen. Daher ist sie benetzend.

Hat sie im Gegensatz dazu eine **positive** Grenzflächenenergie, kommt es zu einer Abkuglung.

<sup>1</sup> Als Einleitung zu diesem Kapitel kannst du dir auch die Seite zur Oberflächenspannung durchlesen!

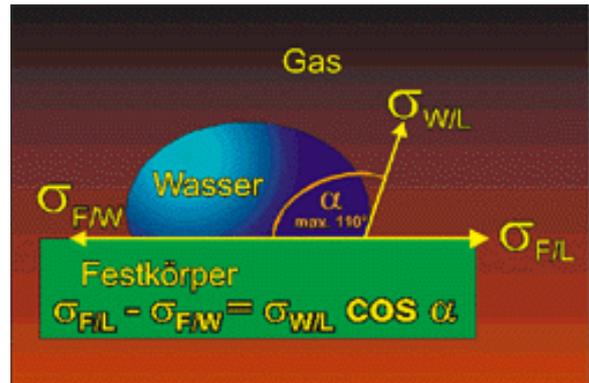
Mathematisch wird dieser Sachverhalt durch die **YOUNG-GLEICHUNG** beschrieben:

$\sigma_{F/L}$  Oberflächenenergie des Festkörpers

$\sigma_{F/W}$  Grenzflächenspannung zwischen  
Wasser und Festkörper

$\sigma_{W/L}$  Oberflächenspannung des Wassers

Kontaktwinkel  $\alpha$ : Winkel zwischen der  
Festkörperoberfläche und der Tangente, die  
an die Oberfläche des Wassertropfens angelegt wird.



Es gilt:

Kontaktwinkel  $\alpha < 90^\circ$ : Festkörper ist hydrophil („wasserliebend“)

Kontaktwinkel  $\alpha > 90^\circ$ : Festkörper ist hydrophob („wasserabweisend“)

z. B. Teflon:  $\alpha = 120^\circ$

### Technische Umsetzung

Netzmittel: Schmieröle benetzen Eisen und lösen Rost, indem sie ihn unterwandern.  
Wasser mit Abwaschmittel benetzt ebenfalls schmutziges Geschirr.

Imprägniermittel:

Sie machen Gewebe nicht wasserdicht, sondern wasserabweisend, indem sie die Grenzflächenspannung zwischen Gewebe und Wasser vergrößern.

### Was heißt das für Schmutz auf Blättern?

Bei einer Kontamination der Blätter mit *hydrophilem* Schmutz wie Lehm, kann beobachtet werden, dass die Partikel in die Wassertropfen aufgenommen werden und nicht wieder aus ihnen herausgelangen können. Deutlich ist eine Laufspur sichtbar, wo die Tropfen die Partikel aufgenommen haben. Wird statt einer hydrophilen eine *hydrophobe* Substanz zur Kontamination verwendet, dann ändert sich das Verhalten an der Oberfläche grundlegend. Wider alle Erwartungen entfernt ein aufgesetzter Wassertropfen die Partikel ebenfalls vom Blatt, obwohl die hydrophoben Partikel eher an der hydrophoben Oberfläche haften sollten als am Wassertropfen. Dabei werden die Partikel jedoch nicht ins Innere des Tropfens aufgenommen, sondern bedecken die Oberfläche des Tropfens gleichmäßig.



Die stark verminderte Benetzbarkeit von Blättern stellt ein sehr auffälliges Phänomen dar, das schon seit langer Zeit bekannt ist. Da sie zuerst an der Lotus-Blüte entdeckt wurde wird sie auch als „**Lotuseffekt**“ bezeichnet. Die Theorie der Benetzung von Oberflächen wurde weitgehend zu Beginn des letzten Jahrhunderts erarbeitet, ist im Detail aber bis heute Gegenstand intensiver Forschung.

### Zusammenfassend lässt sich folgendes festhalten

Die Benetzung eines Stoffes mit Wasser und Luft als umgebendem Medium hängt vom Verhältnis der Grenzflächenspannungen Wasser/Luft, Festkörper/Wasser und Festkörper/Luft ab. Das Verhältnis der Spannungen bestimmt den Kontaktwinkel eines Wassertropfens auf einer Oberfläche.

Ein Kontaktwinkel von  $0^\circ$  bedeutet vollständige Benetzung, das heißt, ein Wassertropfen zerläuft zu einem monomolekularen Film.

Ein Kontaktwinkel von  $180^\circ$  bedeutet vollkommene Unbenetzbarkeit, der Tropfen berührt die Oberfläche in nur einem Punkt. Stoffe mit einer hohen Grenzflächenspannung werden besser benetzt als solche mit niedriger Grenzflächenspannung zum Beispiel Teflon.

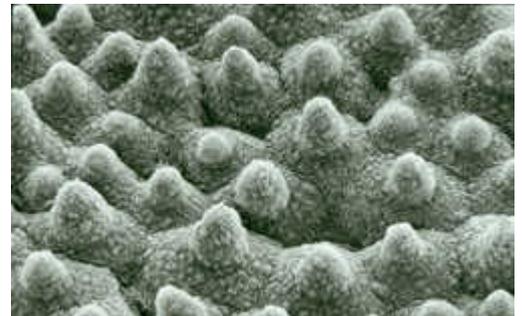
Das Verhalten von Wasser auf einer Oberfläche hängt in starkem Maß von der **Rauigkeit der Oberfläche** ab:

Ist eine glatte Oberfläche relativ gut benetzbar, dann wird die Benetzbarkeit durch Aufrauung noch weiter verbessert.

Ist eine glatte Oberfläche hydrophob und damit schlecht benetzbar, dann führt eine Aufrauung zu Superhydrophobie, also extremer *Wasserabstoßung*.

Im letzteren Fall wird die Luft zwischen den Mikrostrukturen und dem Wassertropfen eingeschlossen. Bringt man einen einzelnen Tropfen auf ein intaktes bewachstes Blatt auf, dann kugelt er ab und verhält sich so wie auf einer heißen Herdplatte. Durch die Rauigkeit der Oberfläche wird die Kontaktfläche zwischen Blatt und Wassertropfen extrem minimiert, was ein scheinbar reibungsloses Abrollen der Tropfen ermöglicht.

**Mikrostrukturierung verstärkt also den Grundeffekt!**

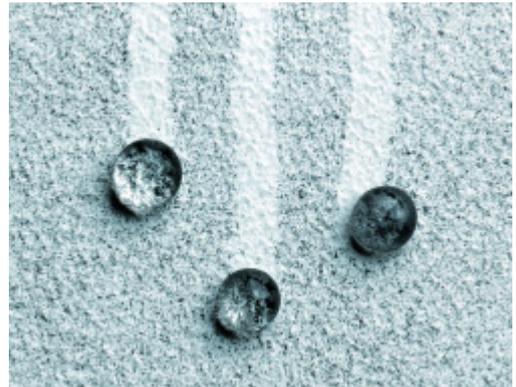


Logisch ist das hydrophiler Schmutz von den abrollenden Wassertropfen mitgerissen wird. Es ist aber erstaunlich, dass eine hydrophobe Substanz durch einen Wassertropfen von einer hydrophoben Oberfläche entfernt wird. Bei Betrachtung der Verhältnisse auf der mikroskopischen Ebene wird der Mechanismus jedoch klarer. Die Partikel liegen nur auf den äußersten Spitzen der Wachskristalle auf. Daher ist auch ihre *Kontaktfläche* mit der Blattoberfläche extrem *gering* und damit verbunden auch die *Adhäsionskräfte*. Diese sind nun zwischen dem Wassertropfen und dem Partikel größer, als zwischen dem Partikel und der Wachsschicht. Die Partikel haften also an der Wasseroberfläche und werden abtransportiert.

Der Lotus-Effekt ist kein zufälliges Begleitphänomen, sondern ist von der Pflanze „gewollt“. Neben den anorganischen Kontaminantien, die mehrere negative Auswirkungen auf das lebende Gewebe haben (z.B. stärkere Erhitzung unter Sonneneinstrahlung, Säurewirkung, Verschluss von Spaltöffnungen), spielen die organischen in Form von Pilzsporen, Bakterien oder Algen für die Pflanzen eine viel bedeutendere Rolle. Die wohl eleganteste Möglichkeit bietet jedoch der Lotus-Effekt. Dadurch wird verhindert, dass sich ein Pathogen auf der Oberfläche überhaupt erst festsetzt. Sporen werden bei jedem Regen abgewaschen, und für den Fall, dass es eine Zeitlang nicht regnet, fehlt ihnen das nötige Wasser für die Keimung. (vergleiche dazu: <http://www.lotus-effekt.de>)

## Technische Umsetzung

Da der Lotuseffekt ausschließlich auf einer physikalisch-chemischen Grundlage beruht und nicht an ein lebendes System gebunden ist, kann eine selbstreinigende Oberfläche technisch hergestellt werden. Die Werkstoffe für derartige neue Beschichtungen stehen zur Verfügung. Bis heute wurde allerdings die scheinbar widersprüchliche Forderung nach einer rauen Oberfläche als Grundlage einer saubereren Oberfläche übersehen. Dennoch haben in den letzten Jahren Forschung und Industrie intensive Anstrengungen unternommen, um schmutzabweisende oder selbstreinigende Oberflächen zu entwickeln. Einige Werkstoffe erlauben es zudem auch, Beschichtungen herzustellen, die neben hydrophoben auch oleophobe Eigenschaften haben. Sie werden also weder von Wasser noch Öl benetzt und können somit als ultraphob bezeichnet werden. Mögliche Anwendungsgebiete liegen vor allem in der Beschichtung von Fassaden, Dächern, Textilien und in dem weiten Feld der Lackindustrie. Gelingt die Umsetzung, dann stellt der Lotuseffekt sicherlich eines der eindrucksvollsten Beispiele für die Entwicklung der Bionik der letzten Jahre dar.



## Experimente zum Lotuseffekt

### Wie reinigen sich Pflanzen?<sup>2</sup>

#### Material

Blätter von Kapuzinerkresse, Kohlrabi und Usambaraveilchen  
Tonmehl (es funktioniert auch mit Lösslehm, Kohlepulver, Pollen oder Cucumapulver)  
kleines Teesieb  
Tropfpipette  
Wasserglas  
Auffanggefäß

#### Durchführung

Die Blätter der Pflanze (Kapuzinerkresse oder Kohlrabi) werden mit Tonmehl verunreinigt. Dazu kann das Teesieb verwendet werden, damit eine möglichst feine Bestäubung erfolgen kann.

Mit Hilfe der Pipette sollen nun einzelne Wassertropfen auf die verschmutzten Blätter getropft werden.

Beobachte den Reinigungseffekt und untersuche die gereinigten Stellen, sowie das aufgefangene Wasser. Beschreibe deine Beobachtungen.

Wiederhole nun den Versuch mit dem Usambaraveilchen und vergleiche den Reinigungseffekt. Welche Aussagen kannst du machen?

---

<sup>2</sup> Die Versuchsanleitung wurde in Anlehnung an den Beitrag „Nie mehr putzen?“ (Aufleger, M., Naturwissenschaften im Unterricht Physik, S. 10-15) gestaltet.

### Welche Oberflächen sind gut benetzbar bzw. unbenetzbar?<sup>3</sup>

#### Material

verschiedene Papiersorten  
verrußte Glasscheibe  
Schiebelehre  
Tropfpipette  
Wasser  
Klebstoff

#### Durchführung

Zuerst soll die Benetzbarkeit der verschiedenen Papiersorten getestet werden, indem Wassertropfen mit der Pipette auf das jeweilige Papier aufgebracht wird und der Durchmesser der Wassertropfen bestimmt wird. Beschreibe, welche Papiersorte am wenigsten gut benetzbar ist und warum!

Im Vergleich dazu soll nun auf die berußte Glasscheibe ein Wassertropfen aufgebracht werden. Beschreibe deine Beobachtungen, wenn du die Glasscheibe schief hältst. Was passiert genau mit dem Wassertropfen?

Gib nun einen Tropfen Klebstoff auf die verrußte Glasfläche und halte diese wieder schief. Was kannst du beobachten?

Schreibe deine Beobachtungen auf und beantworte damit die Frage nach der Benetzbarkeit von Oberflächen. Welche Eigenschaften der Oberfläche spielen dabei eine Rolle?

### Welche Blätter zeigen den Lotuseffekt?<sup>4</sup>

#### Material

Kapuzinerkresse, Tulpe, Weihnachtsstern, Usambaraveilchen  
Schmetterlingsflügel  
Tropfpipette  
Wasser  
Auffangbehälter

#### Durchführung

Untersuche, ob bei den vorliegenden Oberflächen der Lotuseffekt vorliegt oder nicht. Achte dabei darauf, ob die Wassertropfen die Oberflächen benetzen oder ob sie rückstandslos abperlen.

Überlege, wie man Oberflächen verändern müsste, damit der Lotuseffekt zerstört werden würde. Was bedeuten deine Überlegungen für die technische Nutzung des Lotuseffekts?

---

<sup>3</sup> Die Versuchsanleitung wurde in Anlehnung an den Beitrag „Nie mehr putzen?“ (Aufleger, M., Naturwissenschaften im Unterricht Physik, S. 10-15) gestaltet.

<sup>4</sup> Wie Zitat 3

### Experiment zur Oberflächen- und Grenzspannung

Die Grenzspannungen ( $\sigma_{x-y}$ ) von Quecksilber (Hg) und Wasser (H<sub>2</sub>O) sind unterschiedlich groß.

Um die Oberflächenenergie möglichst gering zu halten wird Wasser versuchen, an der Glasfläche nach oben zu laufen.

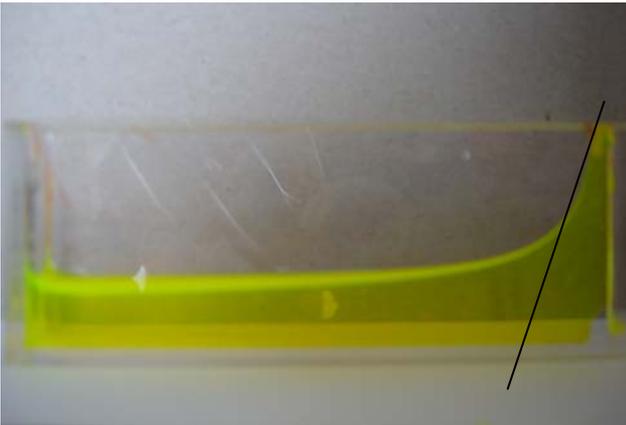
Genau andersherum ist es bei Quecksilber, dies benetzt das Glas nicht. Das Quecksilber läuft an der Oberfläche nach unten.

Allgemein lässt sich der Winkel Flüssigkeit-Glas folgendermaßen berechnen:

$$\sigma_{\text{Glas-Luft}} - \sigma_{\text{Glas-Flüssigkeit}} = \sigma_{\text{Flüssigkeit-Luft}} \cdot \cos \varphi \quad \text{.....Young-Gleichung}$$

Durch Umformen ergibt sich die Formel:

$$\cos \varphi = \frac{\sigma_{\text{Glas-Luft}} - \sigma_{\text{Glas-Flüssigkeit}}}{\sigma_{\text{Flüssigkeit-Luft}}} \quad \text{..... Kapillargesetz}$$

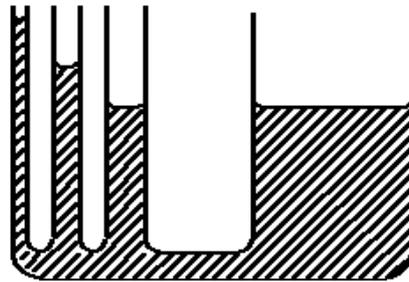


Dreiecksküvette mit Wasser



Dreiecksküvette mit Quecksilber

## Experiment zur Steighöhe in Kapillaren



Drei Kapillaren mit unterschiedlichen Durchmessern sind mit einem Wasservorrat verbunden.

Das Wasser will die Grenzfläche Wasser-Glas vergrößern. Deshalb entsteht in den Kapillaren ein Sog nach oben (entgegen der Gewichtskraft des Wassers). In der großen Röhre ist die Kraft zu klein, um eine Änderung der Wasseroberfläche hervorzurufen. In den drei kleinen Kapillaren lässt die Kraft das Wasser in Abhängigkeit des Durchmessers ansteigen.

Zur Berechnung der Steighöhe verwendet man die Formel:

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos \varphi}{rg\rho}$$

$h$  = kapillare Steighöhe  
 $\varphi$  = Kontaktwinkel zur Wand der Kapillare  
 $\sigma$  = Oberflächenspannung der Flüssigkeit  
 $g$  = Fallbeschleunigung  
 $\rho$  = Dichte der Flüssigkeit  
 $r$  = Radius des Röhrchens

Die Steighöhe ist proportional zum Kehrwert des Radius der Kapillare  $\frac{1}{r}$ .

### Arbeitsaufträge

- Betrachte die Dreiecksküvetten mit Wasser und Quecksilber und miss die Kontaktwinkel möglichst genau.
- Berechne wie hoch das Wasser in einer Kapillare steigen kann!