

## **Vergleich der Oberflächenstruktur von Lotuspflanzenblättern und wasserabweisenden Kunststoffen unter dem Rasterelektronenmikroskop mit speziellem Blick auf ihre Fähigkeit Wasser abzuperlen**

Warum perlt das Wasser von künstlich hergestellten Stoffen ab? Was für eine Technik wird verwendet, um künstlich hergestellte Materialien wasserabweisend zu machen?

Es gibt inzwischen viele Materialien, welche sich Techniken der Natur zum Vorbild nehmen und diese versuchen nachzuahmen. Mit der Umsetzung von Phänomenen der Natur auf die Technik befasst sich die noch junge Wissenschaft der Bionik.

### **Fragestellung**

Wie funktioniert der Lotuseffekt und was für eine Oberflächenstruktur weist das Lotusblatt auf?

Gibt es künstlich hergestellte Materialien, die mit dem Lotuseffekt arbeiten und wie sieht ihre Oberflächenstruktur aus?

### **Erklärung des Rasterelektronenmikroskops**

Das Rasterelektronenmikroskop (REM) kann mit Hilfe eines stark gebündelten Elektronenstrahls die Oberfläche eines Gegenstands vergrößert darstellen. Dabei wird der Elektronenstrahl über die Probe gefahren und rastert sie zeilenweise ab. Darum nennt man dieses Mikroskop Rasterelektronenmikroskop.

Mit dem REM sind viel stärkere Vergrößerungen und bessere Auflösungen möglich als mit herkömmlichen Lichtmikroskopen. Zudem hat das Rasterelektronenmikroskop durch das Prinzip mit dem engen Strahl eine hohe Schärfentiefe.

Der Elektronenstrahl wird aus einer Elektronenkanone geschossen. Diese besteht aus einer Kathode, aus der sich die Elektronen lösen und einer Anode, welche die Elektronen beschleunigt. Es gibt verschiedene Versionen solcher Elektronenkanonen. Alle besitzen jedoch die zwei vorher erwähnten Bestandteile. Mit Hilfe von elektromagnetischen Linsen wird der abgeschossene Elektronenstrahl auf einen Punkt fokussiert. Wenn der Elektronenstrahl auf die Probe trifft, kommt es zu unterschiedlichen Reaktionen. Wenn der Elektronenstrahl auf ein grosses Atom trifft, können die Elektronen zurück geschlagen werden. Das sind Rückstreuelektronen. Eine andere Möglichkeit ist, dass der Elektronenstrahl, aus einem Atom Elektronen herausschlägt. Dann nimmt ein Elektron mit höherer Energie den Platz des herausgeschlagenen Elektrons ein und gibt die nicht mehr benötigte Energie in Form von Röntgenstrahlen ab. Die von den Detektoren empfangenen Elektronen oder die empfangene Strahlung werden als Helligkeit in einem Pixel dargestellt.

Im Rasterelektronenmikroskop wird also der Elektronenstrahl auf das zu mikroskopierende Objekt geschossen. Detektoren zeichnen verschiedene Signale gleichzeitig in



Abbildung 1: Rasterelektronenmikroskop im Zentrum für Mikroskopie am Biozentrum

einem Punkt auf. Sekundärelektronen werden üblicherweise zur Abbildung verwendet. Rückstreuelektronen sagen etwas über die Grösse der Atome unter dem Strahl aus. Die charakteristische Röntgenstrahlung wird zur chemischen Analyse verwendet. Viele solcher Messpunkte, dargestellt als verschieden helle Pixel, werden zu einer Zeile aneinandergereiht und Zeilen werden zu einem Bild aneinandergereiht. Die Vergrößerung entsteht durch die Feinheit der Rasterung. Das Elektronenmikroskop funktioniert nur im Hochvakuum. Die Elektronen würden mit den Luftmolekülen kollidieren und abgelenkt werden. Das erfordert eine Präparation, da die Proben wasserfrei oder in Eis eingebettet sein müssen.

Bei meinen Untersuchungen wurde vor allem ein Detektor gebraucht: Der Sekundärelektronendetektor. Sekundärelektronen sind Elektronen, die sich von den Atomen aufgrund des Beschusses mit dem Elektronenstrahl lösen. Sie weisen eine niedrige Energie auf und so können nur Sekundärelektronen aus den obersten Nanometern des beschossenen Objekts den Detektor erreichen. Durch das Erfassen der Sekundärelektronen ergibt sich ein sehr guter Blick auf die Topographie eines Objekts.

## Vorgehen

- **Ordnen der Proben:** Um die Oberflächenstruktur von künstlich hergestellten Materialien, welche wasserabweisend sind, mit der Oberflächenstruktur der Lotuspflanzenblätter vergleichen zu können, habe ich Zeltstoff, Fallschirmseide, den Stoff einer Regenjacke, Fassadenfarbe mit Lotuseffekt und mehrere Pflanzen mit Lotuseffekt unter dem REM untersucht. Um mir einen Überblick zu verschaffen und die Kunststoffe ein erstes Mal zu sortieren, habe ich im Lichtmikroskop Aufnahmen von ihnen gemacht.
- **Präparation der Proben:** Um die Proben unter dem REM zu untersuchen, dürfen sie kein Wasser mehr enthalten. Bei meinen Kunststoffproben ist dies kein Problem, da sie sowieso trocken sind. Um die Kunststoffproben später analysieren zu können, müssen sie auf Objektträger aufgebracht werden. Wenn man die Stoffe auf den Objektträger klebt, ist zu beachten, dass die Stoffe nicht mit den Händen berührt werden, da sie dadurch verunreinigt würden und der abgelagerte Dreck sehr gut im REM sichtbar wäre. Die Fassadenfarbe habe ich nach dem Auftragen auf einen Objektträger und auf Beton an der Luft trocknen lassen. So enthielt sie während des Untersuchens unter dem Rasterelektronenmikroskop keine Feuchtigkeit mehr.
- **Besputtern der Proben:** Durch ihre schwache Leitfähigkeit lösen sich nur sehr wenige Sekundärelektronen von den Kunststoffproben, wenn sie mit dem Elektronenstrahl beschossen werden. Und es kann sein, dass die Probe eine negative Ladung erhält. Um dies zu verhindern und um mehr Sekundärelektronen im Detektor sammeln zu können, werden die Proben vor der Untersuchung unter dem REM mit einer dünnen Schicht eines gut leitfähigen Metalls überzogen. Diesen Vorgang nennt man sputtern. In einem speziellen Gerät mit etwas Argon Restgas bei stark reduziertem Luftdruck erzeugt eine Hochspannung Argon Kationen, die auf eine negativ geladene Metalloberfläche treffen (in unserem Fall eine Goldfolie) und Partikel ausschlagen, welche sich dann auf der Probe festsetzen. Somit wird die Probe mit einer atomar dünnen Schicht Metall überzogen (in unserem Fall Gold), ist leitfähig und unter dem REM entstehen viel mehr Sekundärelektronen.
- **Kryo-Elektronenmikroskop und Kryo-Präparation:** Um mir die Oberflächenstruktur von einem Lotusblatt anzusehen, musste ich das

Mikroskop wechseln. Nun arbeitete ich am Kryo-Elektronenmikroskop. Dieses Mikroskop ist hilfreich beim Mikroskopieren von biologischen Objekten, die Wasser enthalten. Durch das im Mikroskop herrschende Hochvakuum, würde das Wasser verdampfen und die Feinstrukturen des Objekts zerstört. Deshalb friert man die Objekte vor dem Sputtern mit Flüssigstickstoff ein. Die Kryo-Präparation besteht darin, das Objekt so schnell einzufrieren, dass das Wasser keine Zeit hat, Kristallstruktur anzunehmen. So erstarrt das Wasser in amorphem Zustand und das Objekt kann unter andauernder Kühlung eingebettet in amorphem Eis im Kryo-REM untersucht werden.

- **Analyse der Bestandteile einer Probe mit Hilfe von Röntgenstrahlen**  
Mit Hilfe der Röntgenstrahlenanalyse (EDX) ist es möglich zu bestimmen, was für Elemente in einer Probe an der Stelle des Elektronenstrahls vorhanden sind. Röntgenstrahlen entstehen, wenn der Elektronenstrahl ein Elektron eines Atoms herausschlägt. Ein Elektron von einem höheren Orbital (besitzt höhere Energie) nimmt den Platz des herausgeschlagenen Elektrons ein und gibt die nicht mehr verwendbare Energie in Form von Röntgenstrahlung ab. Jede Atomgattung weist eine charakteristische Röntgenstrahlung auf. Mit Detektoren, welche die Strahlung nach verllorener Energie aufzeichnen (Energie-dispersiv), lässt sich definieren was für Atome in der Probe enthalten sind.

## Beschreibung des Lotuseffekts und Analyse der Oberflächenstruktur des Lotusblattes

Der Lotuseffekt ist ein Naturphänomen, der die geringe Benetzbarkeit von Oberflächen beschreibt. Wasser, welches sich auf der Oberfläche eines Stoffes mit Lotuseffekt befindet, perlt ab. Dieses abperlende Wasser nimmt Schmutzpartikel auf der Oberfläche mit und reinigt sie auf diese Weise. Oberflächen mit Lotuseffekt sind selbstreinigend. Dies ist ein Widerspruch, da sich die Oberfläche nicht selbst reinigt, sondern das abperlende Wasser den Schmutz mitnimmt. Die Lotuspflanze ist im

Asiatischen Raum der Inbegriff der Reinheit, da sie eben einen Lotuseffekt aufweist. Aber nicht nur sie sondern auch die in unserer Gegend wachsende Kapuzinerkresse, gewöhnliche Gräser oder auch Flügel von manchen Insekten.

Um zu verstehen wie der Lotuseffekt funktioniert, liegt

primär an der Oberflächenspannung von Wasser. Wasser kann in seiner flüssigen Form nur existieren, wenn sich die einzelnen Wassermoleküle gegenseitig anziehen. Da Wassermoleküle polare Bindungen sind, ziehen sie sich sehr stark an. Zwischen ihnen herrschen starke Dipol-Dipol Kräfte. Umso stärker die Bindungen zwischen den gleichen Molekülen sind, desto stärker ist auch die Oberflächenspannung. Wasser hat folglich eine hohe Oberflächenspannung.

Bei Kontakt mit einer Oberfläche beginnen neue intermolekulare Kräfte zwischen dem Wasser und der Oberfläche zu wirken. Wenn diese stark sind und die mit dem Wasser in Berührung kommende Oberfläche gross ist, wird die Oberfläche benetzt und das Wasser ist nicht mehr tropfenförmig. Ob eine Oberfläche mit Wasser benetzt



Abbildung 2: Lotusblatt mit Schmutzpartikeln



Abbildung 3: Abperlendes Wasser nimmt Schmutz mit



Abbildung 4:  
Lotusblattoberfläche mit Papillen

wird, hängt von ihrer Struktur und damit von der Beschaffenheit der Kontaktfläche mit dem Wasser ab.

Die Lotuspflanze bildet auf ihrer Oberfläche Ausstülpungen, auch Papillen genannt, von einer Grösse von 10-20  $\mu\text{m}$  in Abständen von ungefähr 10-20  $\mu\text{m}$ .

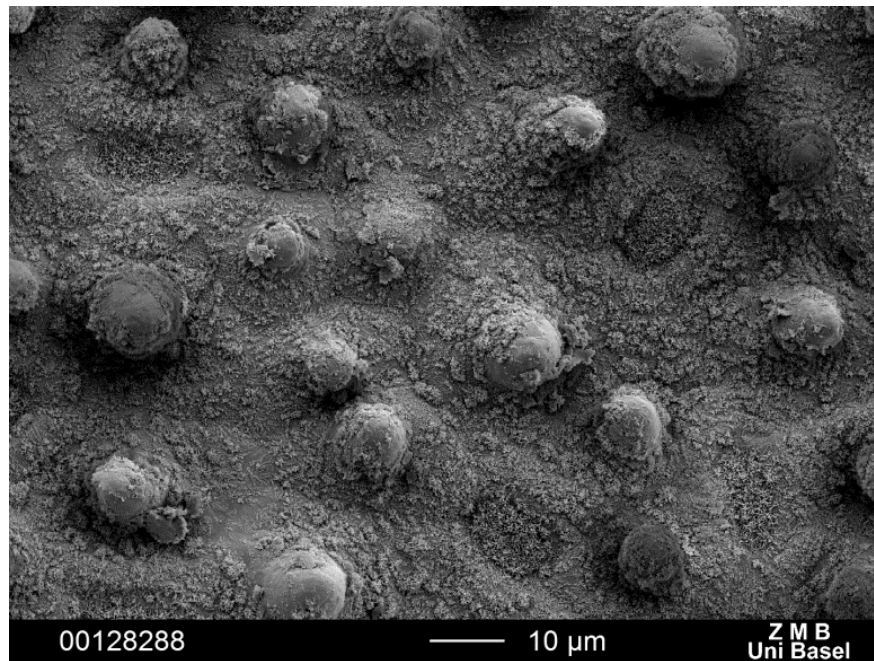
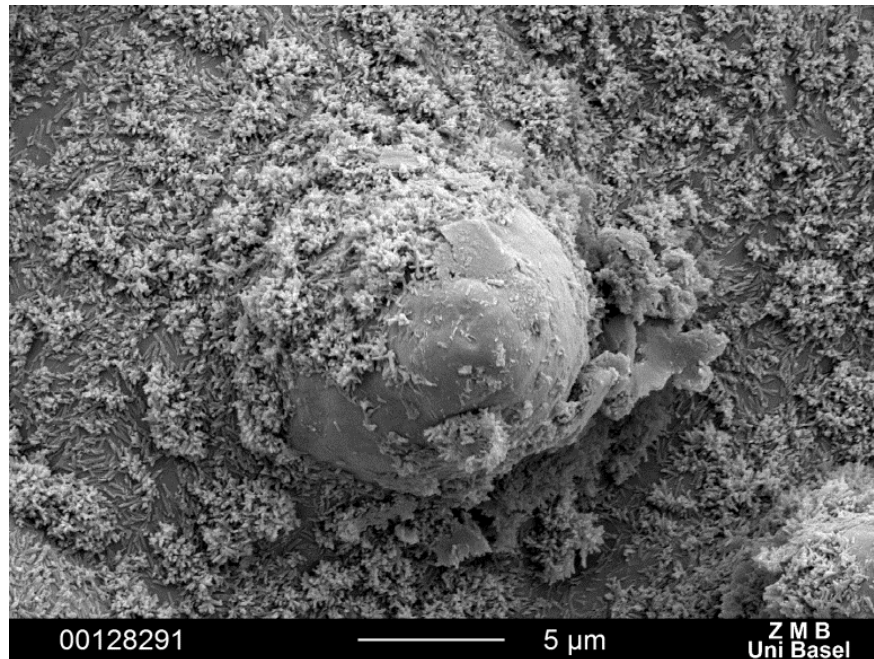


Abbildung 5: Papille mit Wachskristallen

Zu dieser speziellen Oberfläche kommt eine Schicht von unregelmässig geformten, hydrophoben (wasserabweisenden) Wachskristallen hinzu. Zwischen diesen sind Lufteinschlüsse vorhanden, was die Oberfläche rauer macht und somit noch weniger Kontaktfläche



bietet. Dies führt dazu, dass das Wasser nicht in die Ritzen des Blattes eindringen kann und durch seine eigene Oberflächenspannung und die geringe Kontaktfläche beinahe Kugelförmig auf den Papillen aufliegt und abperlt. Auch die Schmutzpartikel liegen oben auf der Struktur auf und werden von ``vorbeikullernden`` Wassertropfen mitgerissen.

Der Nutzen dieses Effekts für die Lotuspflanze liegt darin, dass sich keine Mikroorganismen oder Krankheitserreger auf ihren Blättern festsetzen können und weil die Oberfläche nicht beschmutzt ist, empfängt das Blatt die höchstmögliche Menge an Sonnenstrahlen für eine optimale Photosynthese-Leistung.

## Analyse der Oberflächenstruktur der wasserabweisenden Kunststoffe

Für die künstlich hergestellten Materialien ist auch die Selbstreinigung des Lotuseffekts von Nutzen. Lotuseffekt-Oberflächen sind sowohl schmutzabweisend wie auch schlecht benetzbar. Besitzt ein Gewebe zusätzlich kleinere Poren als die Grösse von Wassertropfen oder Schmutzpartikeln, so ist das Gewebe atmungsaktiv.

### Kunststoff-Gewebe (Zeltstoff, Fallschirmseide, Stoff einer Regenjacke):

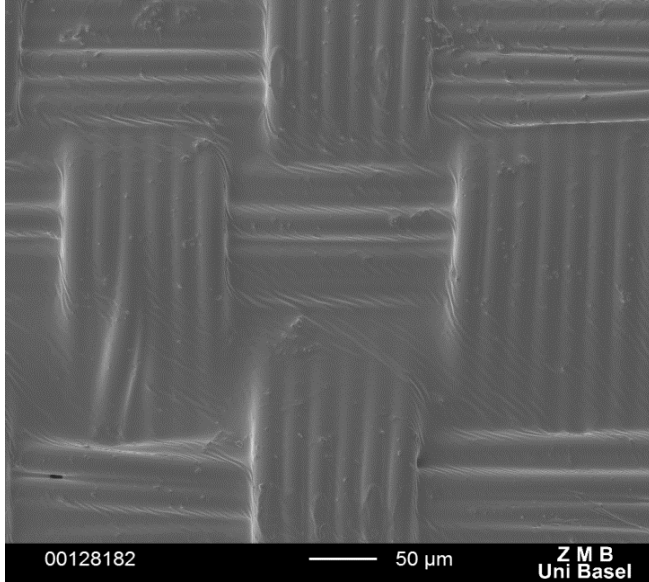


Abbildung 6 Zeltstoffoberfläche im Rasterelektronenmikroskop

Unter dem Rasterelektronenmikroskop wird schnell klar, dass die Oberflächenstruktur meiner Kunststoffproben nicht direkt mit der des Lotusblattes vergleichbar ist. Der Zeltstoff und die Fallschirmseide besitzen eine geflochtene Struktur, die jedoch mit einer glatten Beschichtung überzogen ist. Aus welchem Material die Beschichtungen besteht, ist unter dem Rasterelektronenmikroskop nicht ersichtlich. Diese Beschichtung ist wasserabweisend, jedoch kann dieser Kunststoff nicht atmungsaktiv sein, weil er keine Poren oder Löcher aufweist durch die Luft durchdringen könnte. Weil die Oberfläche keine

raue Struktur aufweist, welche die Kontaktfläche zu Wasserpartikeln oder Schmutzpartikeln reduzieren würde, ist sie weder wasserabweisend noch selbstreinigend. Es liegt also kein Lotuseffekt vor. Durch den ultradünnen Kunststoffüberzug über das Gewebe wird der Stoff wasser- und luftdicht.

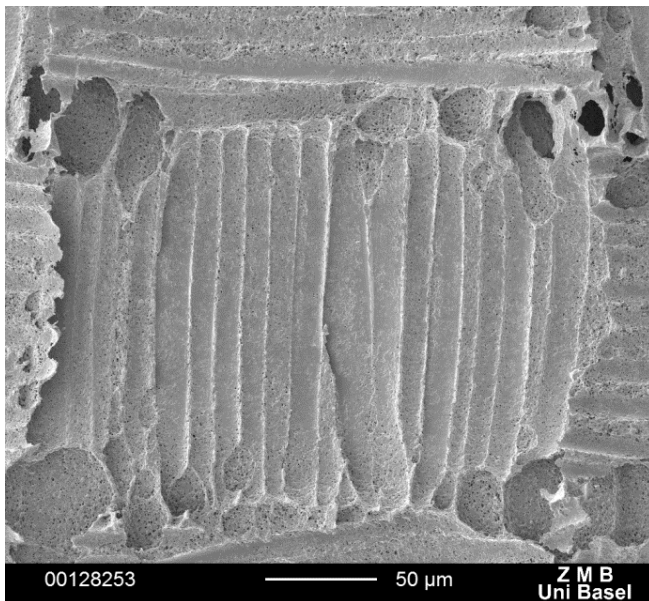


Abbildung 7 Innerer Regenjackenstoff

Die Regenjacke besteht aus zwei Stoffen. Der Äussere ist ebenfalls geflochten, weist aber keine Kunststoffbeschichtung auf. Er ist wasserdurchlässig aber dafür höchstwahrscheinlich atmungsaktiv, da Löcher vorhanden sind. Der innere Stoff ist ein Kunststoff, der wasserundurchlässig aber wahrscheinlich nicht atmungsaktiv ist. Es sieht auch so aus, als wäre die Schicht von einer Gewebeunterlage abgelöst worden. An manchen Stellen sind dann kleine Poren sichtbar. Es ist eher zweifelhaft, ob dies für eine Atmungsaktivität reicht.



## Fassadenfarbe Lotusan:

Die Fassadenfarbe Lotusan ist von den Kunststoffen am besten mit der Oberflächenstruktur des Lotusblattes vergleichbar. Zwei Bestandteile der Farbe sind unter dem Rasterelektronenmikroskop ersichtlich.

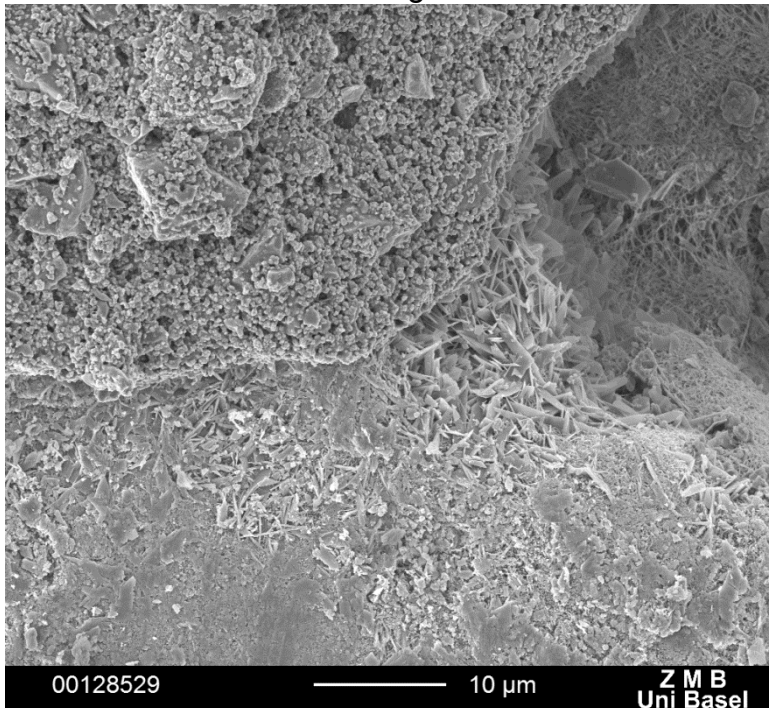


Abbildung 8: Grenzfläche von oben links mit Lotusan übermalter Beton unten rechts: Betongestein ohne Farbe

An einer Grenzfläche zwischen Farbe und Beton ist die Eigenschaft beider Materialien gut ersichtlich.

An einer Grenzfläche zwischen Farbe und Beton ist die Eigenschaft beider Materialien gut ersichtlich. Der Beton ist porös, aber auch benetzbar. Die Farbe ist porös und ähnlich wie die Oberfläche der Lotuspflanze, erfüllt also die Kriterien wasserabweisend, schmutzabweisend und atmungsaktiv.

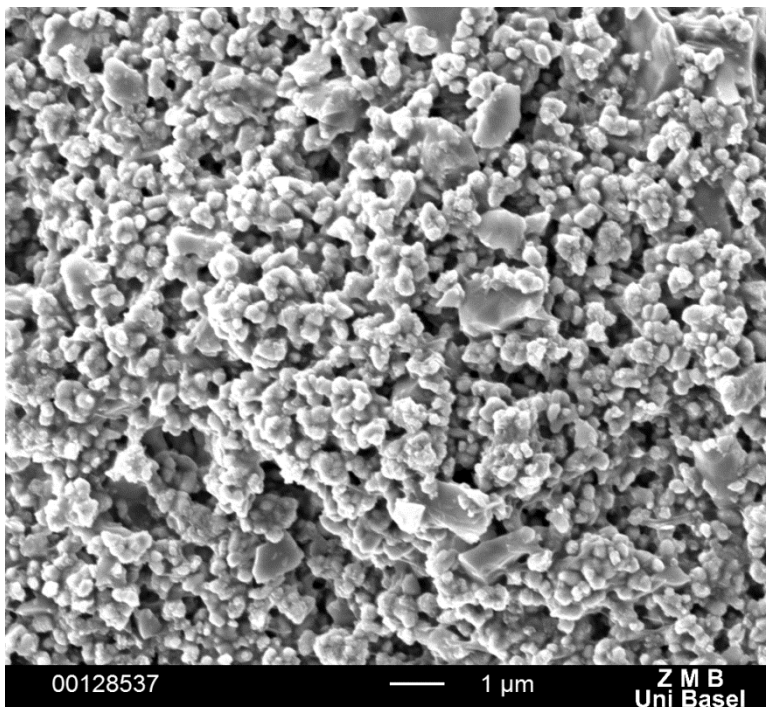


Abbildung 9: Fassadenfarbe Lotusan mit Titanpartikeln und Quarzkörnern

Titanpartikel, die kleiner sind als  $1\ \mu\text{m}$ , sind auf der ganzen Oberfläche der Farbe verteilt. Wegen einer Kunststoffbeschichtung sind sie höchstwahrscheinlich hydrophob. Die Titanpartikel sind eingebettet in ca.  $1\text{-}2\ \mu\text{m}$  grosse Quarzkörner. Dadurch dass die Titanpartikel verstreut auf der Oberfläche liegen, bietet sich wenig Kontaktfläche für Wasser und Schmutz. Durch die grösseren Quarzkörner entstehen Lufteinschlüsse und Poren. So wird der Lotuseffekt erfolgreich nachgeahmt und die Atmungsaktivität bleibt erhalten. Auch die

schmutzabweisende Eigenschaft ist vorhanden.

## Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX)

Eine EDX-Analyse identifiziert die einzelnen Elemente in dem Bild. Die kleinen Körner bestehen aus Titan und Sauerstoff, Titanoxid. Die grossen Körner bestehen aus Silizium und Sauerstoff, Siliziumoxid. Der Kohlenstoff weist auf eine wasserabweisende Kunststoffschicht hin. Platin ist die Beschichtung zur Verminderung der Aufladung der Probe.

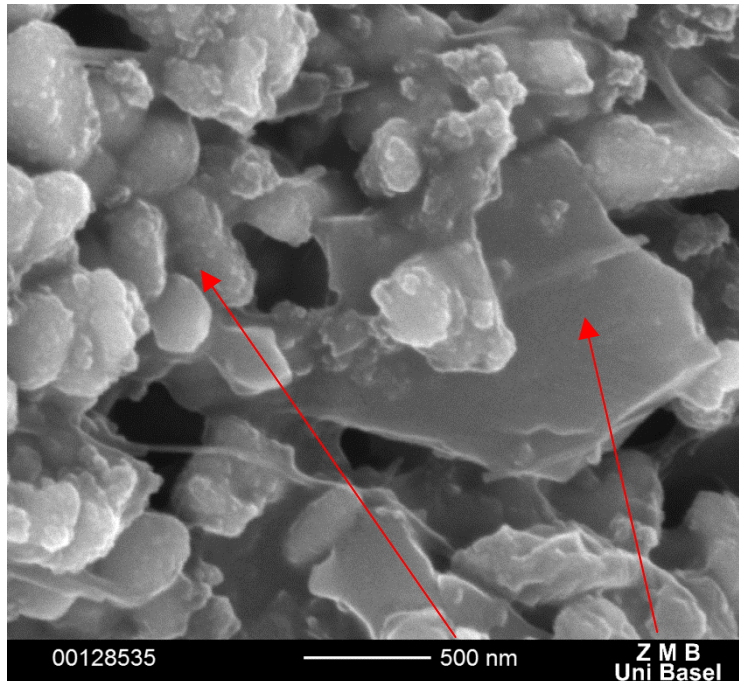


Abbildung 10: Fassadenfarbe Lotusan mit Titanpartikeln und Quarzkörnern

Label A: Beton mit Lotusan

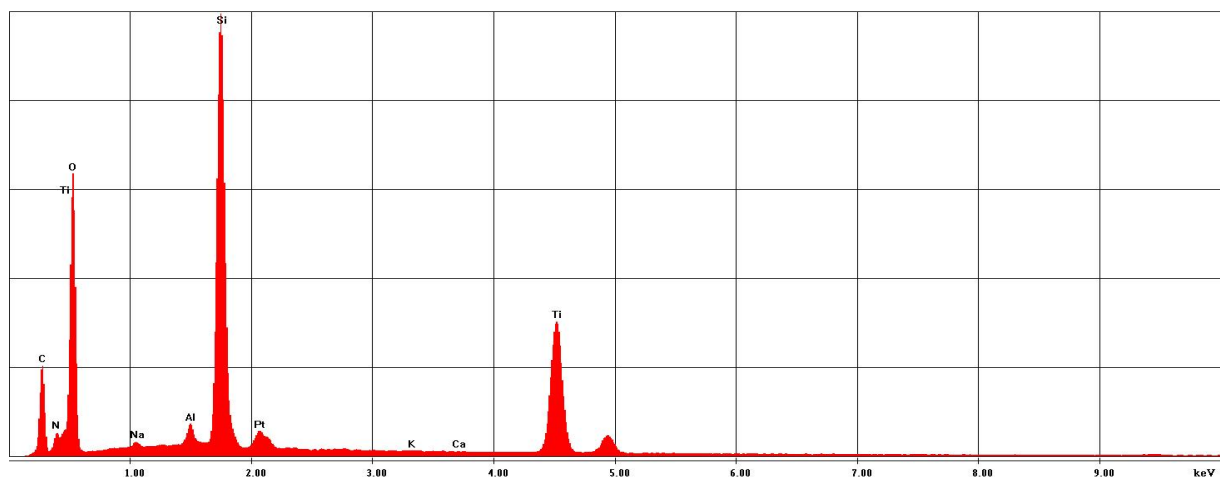


Abbildung 12: Spektrum mit Mengenangaben von vorhandenen Atomen

Ti=Titan + O= Sauerstoff: Hinweis auf Vorhandensein von Titanoxidpartikeln

Si=Silizium + O: Hinweis auf Vorhandensein von Quarzkörnern

C=Kohlenstoff + O: Hinweis auf künstliche, hydrophobe Schicht

Pt= Platin: Besputterungsschicht

## Fazit

Der Lotuseffekt ist eine sehr intelligente Lösung um Oberflächen wasserabweisend und zugleich selbstreinigend zu machen. Der Effekt ist auf eine Mikrostruktur auf Oberflächen von Pflanzen zurückzuführen. Seit der Entdeckung des Effekts gibt es Bestrebungen den Effekt auf künstliche Materialien zu übertragen, was auch gelungen ist. Ein Beispiel dafür habe ich untersucht und festgestellt, dass die Fassadenfarbe aufgrund ihrer lotusblattähnlichen, hydrophoben Oberflächenstruktur die gleichen Eigenschaften wie die Lotuspflanze aufweist. Jedoch nicht alle wasserabweisenden Materialien arbeiten mit dem Lotuseffekt. Häufig wird die Oberfläche mit einer künstlichen hydrophoben Oberfläche überzogen, die nichts mit dem Effekt der Lotuspflanze gemeinsam hat. Somit sind diese Kunststoffe dann wasserabweisend aber lassen es nicht abperlen und sind nicht selbstreinigend. Auch bleibt meist die Atmungsaktivität nicht erhalten.

Diese Arbeit entstand in einem 2-wöchigen Praktikum im Zentrum für Mikroskopie am Biozentrum der Universität Basel. Es war ein interessanter und neuer Einblick in die Arbeitswelt bei dem ich viele neue Erfahrungen gemacht und viel gelernt habe.

## Quellen

<http://de.wikipedia.org/wiki/Lotuseffekt>

[http://www.swissnanocube.ch/uploads/tx\\_rfnanoteachbox/Lehreranleitung\\_Lotus\\_V2.pdf](http://www.swissnanocube.ch/uploads/tx_rfnanoteachbox/Lehreranleitung_Lotus_V2.pdf)

<http://www.bionikzentrum.de/default.asp?navA=home&navID=1&editable=1>

[http://www.sto.de/de/produkte/produktprogramm/productdetail\\_101010962.html?prodid=PROD0962](http://www.sto.de/de/produkte/produktprogramm/productdetail_101010962.html?prodid=PROD0962)

<http://www.lotus-effect.de/index.php>

<http://www.erlus.de/ModelleSelbstreinigend/E58S/technischdaten/>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Rasterelektronenmikroskop>

<http://pages.unibas.ch/zmb/rem.html>