

Superhydrophobe Oberflächen: Funktionserhaltung durch Regeneration

Dissertation

Zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Henning Immink

aus

Bad Bentheim

Bonn, Dezember 2009

Angefertigt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen
Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Erstgutachter: Prof. Dr. Wilhelm Barthlott

Zweitgutachter: Prof. Dr. Kerstin Koch

Tag der Promotion: 17.02.2010

Erscheinungsjahr: 2010

Inhaltsverzeichnis

1	VORWORT	1
2	EINLEITUNG	2
2.1	Benetzungsverhalten von Oberflächen.....	3
2.1.1	Vollständige Benetzung.....	3
2.1.2	Partielle Benetzung	4
2.1.3	Benetzung von strukturierten Oberflächen	7
2.2	Superhydrophobe selbstreinigende Oberflächen in der Natur, ihre Erforschung und Übertragung in die Technik	12
2.3	Regeneration superhydrophober Oberflächen	15
2.4	Ziel der Arbeit.....	19
3	MATERIAL UND METHODEN	21
3.1	Material.....	21
3.1.1	Pflanzen	21
3.1.2	Technische Oberflächen	22
3.1.3	Kontaminationspartikel	23
3.1.4	Tenside und Tensid-Dispersionen.....	24
3.2	Methoden	25
3.2.1	Weißlichtprofilometrie.....	25
3.2.2	Rasterelektronenmikroskopie	28
3.2.3	Bestimmung von Kontakt- und Abrollwinkel	29
3.2.4	Erzeugung von Fehlstellen, Kontamination und Benebelung	29
3.2.5	Quantifizierung der Kontamination	31
3.2.6	Zusammenhang zwischen der Fluoreszenz und dem Kontaminationsgrad	31
3.2.7	Statistische Auswertung	32
4	ERGEBNISSE	35
4.1	Rasterelektronenmikroskopie und Weißlichtprofilometrie.....	35
4.1.1	Pflanzliche Oberflächen	35
4.1.2	Technische Oberflächen	56
4.2	Weißlichtprofilometrie zur Vermessung der Oberflächenstrukturen ..	60
4.2.1	Pflanzliche Oberflächen	61
4.2.2	Technische Oberflächen	69
4.3	Beschreibung der Oberflächenstrukturierung anhand von Oberflächenkenngrößen.....	75
4.3.1	Pflanzliche Oberflächen	76

4.3.2	Technische Oberflächen	81
4.4	Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf unterschiedlich strukturierte Oberflächen.....	86
4.4.1	Pflanzliche Oberflächen	86
4.4.2	Technische Oberflächen	93
4.5	Beschreibung des Benetzungsverhaltens von Oberflächen anhand von Oberflächenkenngrößen	94
4.5.1	Pflanzliche Oberflächen	94
4.5.2	Technische Oberflächen	97
4.6	Generierung von Fehlstellen und die Auswirkungen von Fehlstellen auf Superhydrophobie und Selbstreinigung.....	100
4.6.1	Generierung von Fehlstellen	101
4.6.2	Auswirkungen auf die Superhydrophobie.....	103
4.6.3	Zusammenhang zwischen dem Kontaminationsgrad und der Fluoreszenz.....	107
4.6.4	Auswirkungen auf die Selbstreinigung	108
4.7	Auswirkungen der Benetzung von unterschiedlichen Tensiden auf superhydrophobe Oberflächen	112
4.7.1	Auswirkungen auf die Superhydrophobie.....	113
4.7.2	Haltbarkeit der Auswirkungen auf die Superhydrophobie.....	115
4.7.3	Auswirkungen auf die Selbstreinigung	118
4.7.4	Benetzung von Fehlstellen	119
4.8	Regeneration der Hydrophobie in Fehlstellen durch Gloss Dryer® ..	121
4.8.1	Hydrophilie verschiedener Oberflächen (Eignung als Testoberfläche für die Untersuchung von Gloss Dryer®).....	122
4.8.2	Hydrophobierungsleistung und Haltbarkeit von Gloss Dryer®	124
4.8.3	Benetzung von Fehlstellen durch Gloss Dryer®.....	126
4.9	Regeneration der Superhydrophobie durch Wiederherstellung der Strukturierung.....	127
4.9.1	Benetzung von Fehlstellen	128
4.9.2	Auswirkungen auf die Superhydrophobie.....	130
4.9.3	Auswirkungen auf die Selbstreinigung	133
5	DISKUSSION	137
5.1	Weißlichtprofilometrie als Methode zur Charakterisierung superhydrophober Oberflächen.....	137
5.1.1	Weißlichtprofilometrie und Rasterelektronenmikroskopie im Vergleich.....	137
5.1.2	Eignung von Oberflächenparametern zur Charakterisierung von superhydrophoben Oberflächen im WP	140

5.2	Einfluss der Mikrostrukturierung auf die Benetzung mit Wasser	146
5.3	Generierung von Fehlstellen und ihre Auswirkungen auf die Selbstreinigung superhydrophober Oberflächen	148
5.4	Regeneration der Hydrophobie in Fehlstellen auf technischen Oberflächen.....	150
5.5	Regeneration der Superhydrophobie in Fehlstellen auf technischen Oberflächen.....	152
6	ZUSAMMENFASSUNG.....	156
7	SUMMARY	158
8	DANKSAGUNG.....	160
9	LITERATURVERZEICHNIS	162
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	174
	ANHANG.....	186

1 VORWORT

Die vorliegende Arbeit, angefertigt am Nees-Institut der Biodiversität der Pflanzen der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, ist eingebunden in das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt „Biomimetische superhydrophobe Oberflächen: Funktionserhaltung durch Regeneration“. Ziel des Projektes war die Entwicklung innovativer funktionsangepasster Dispersionen, die die Reinigung, die Wiederherstellung der Hydrophobie und Strukturreparatur beschädigter mikro- und nanostrukturierter, superhydrophober Oberflächen ermöglichen. Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit verschiedenen industriellen Partnern und Forschungseinrichtungen durchgeführt. Die Forschungsarbeiten wurden hauptsächlich durch zwei Doktorarbeiten, durchgeführt am Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn und am Institut für Physikalische Chemie II der Technischen Universität Dortmund, abgedeckt. Unterstützt wurde das Vorhaben von der CAM-D Technologies GmbH. Es bestanden weitere Kooperationen im Rahmen dieses Projektes mit Partnern aus der Spezialchemie- und Additivforschung (Evonik Industries AG, Geschäftsfeld Chemie) und einem Unternehmen der Haushaltschemie (Werner & Mertz GmbH). Das Unternehmen Evonik Industries AG stellte die Basisdispersionen und die Additive zur Verfügung. Das Unternehmen Werner & Mertz GmbH lieferte die Rezeptur von Standardschmutzen für die an der Technischen Universität Dortmund durchgeführten Versuche.

2 EINLEITUNG

In den Jahrmlionen der Evolution haben Pflanzen eine groÙe Bandbreite an funktionellen Oberflächen entwickelt, deren technische Umsetzung heute für den Menschen uÙerst interessant ist. Ein besonders beeindruckendes Beispiel ist das Phänomen der Selbstreinigung, das man auf den Blattoberflächen einiger Pflanzen, wie z. B. der Lotuspflanze (*Nelumbo nucifera*) beobachten kann. Dieses Phänomen ist schon vor mehr als zweitausend Jahren beschrieben worden und beruht auf der Unbenetzbarkeit der strukturierten superhydrophoben Blattoberfläche (ZIEGENSPECK, 1942; FOGG, 1947; 1948). Der Zusammenhang zwischen dieser Unbenetzbarkeit und der Selbstreinigung von pflanzlichen Oberflächen wurde schlieÙlich von Barthlott und Ehler (1977) nachgewiesen.

In den letzten Jahren wurde das Prinzip der Selbstreinigung erfolgreich auf unterschiedliche technische Oberflächen übertragen. Unter dem Markennamen Lotus-Effect[®] sind mikro- und nanostrukturierte superhydrophobe Oberflächen nach dem Vorbild selbstreinigender Pflanzenoberflächen entstanden, die schmutz- und wasserabweisend sind. Eine Reinigung einer solchen Oberfläche entfällt. Das Problem der Anfälligkeit der hydrophoben Chemie und der Strukturierung dieser Oberflächen gegenüber mechanischer Beschädigung und Maskierung durch ligem Schmutz verhindert jedoch bislang eine breite Anwendung dieser superhydrophoben Oberflächen. Sowohl die Beschädigung der Strukturen, als auch deren Abdeckung durch Schmutz führt zum lokalen Verlust der Selbstreinigungsfähigkeit.

In der vorliegenden Arbeit wird die Empfindlichkeit mikrostrukturierter superhydrophober Oberflächen gegenüber mechanischer Beschädigung und der daraus resultierende Verlust der Fähigkeit zur Selbstreinigung untersucht. Ein Lösungsansatz ist die Entwicklung funktionsangepasster Dispersionen (sog. Reparaturdispersionen), die die Superhydrophobie in den beschädigten Bereichen der Oberfläche lokal wiederherstellen (im Folgenden „Regeneration“ genannt). Dieses Forschungsprojekt ist Ergebnis eines vom BMBF geförderten Verbundvorhabens mit dem Namen „Superhydrophobe Oberflächen: Funktionserhaltung durch Regeneration“. Teil des Verbundvorhabens ist diese Arbeit am Nees-Institut der Biodiversität der Pflanzen, betreut von Professor Barthlott,

der mehr als 30 Jahre Erfahrung auf dem Gebiet pflanzlicher Oberflächen aufweisen kann. Außerdem wird an der Technischen Universität Dortmund eine weitere Dissertation bearbeitet zum Thema Demaskierung von SMO durch Reinigung.

2.1 Benetzungsverhalten von Oberflächen

Benetzung beschreibt das Verhalten von Flüssigkeiten bei Kontakt mit einer Festkörpergrenzfläche (DE GENNES et al., 2004).

In der Technik ist häufig eine geringe Benetzung von Oberflächen erwünscht, so z. B. bei Oberflächen, die starkem Regen ausgesetzt sind, wie Regenjacken oder Windschutzscheiben von Autos (KOCH et al., 2008).

Um die Vorgänge bei der Benetzung von Grenzflächen zu verdeutlichen, wird zunächst die Benetzung einer idealen glatten, d. h. einer glatten, biegefesten, unlöslichen, chemisch homogenen und nicht-reaktiven Festkörperoberfläche (MARMUR, 2006b; QUÉRÉ, 2008), betrachtet. Auf einer solchen Oberfläche lassen sich zwei Benetzungszustände beobachten (QUÉRÉ, 2008; Abbildung 1): Die vollständige Benetzung und die partielle Benetzung.

2.1.1 Vollständige Benetzung

Bei einer vollständigen Benetzung spreitet eine Flüssigkeit komplett, nachdem sie auf der Festkörperoberfläche aufgebracht wurde (Abbildung 1A). Die Energie für diese Art der Oberflächenvergrößerung der Flüssigkeit (Erhöhung der Grenzfläche Flüssigkeit/Gas γ_{LA} und der Grenzfläche Festkörper/Flüssigkeit (γ_{SL}) liefert die Grenzflächenspannung der Grenzfläche Festkörper/Gas (γ_{SA}) (CASSIE, 1948; MARMUR, 2006a; QUÉRÉ, 2008). Der Gleichgewichtszustand der Benetzung ist erreicht, wenn die Kräfte, die von den Grenzflächenspannungen der drei Phasen erzeugt werden, zu Null werden (BERGMANN und SCHAEFER, 1998; MOCK, 2004; FLEMMING, 2006):

$$\gamma_{SA} - \gamma_{SL} - \gamma_{LA} \cos \theta = 0 \quad (1.1)$$

2.1.2 Partielle Benetzung

Der zweite Benetzungszustand ist die partielle Benetzung (Abbildung 1B). In diesem Fall bildet die Flüssigkeit einen Tropfen mit einem charakteristischen Winkel zwischen Flüssigkeit und Festkörper, den sog. Kontaktwinkel θ , aus.

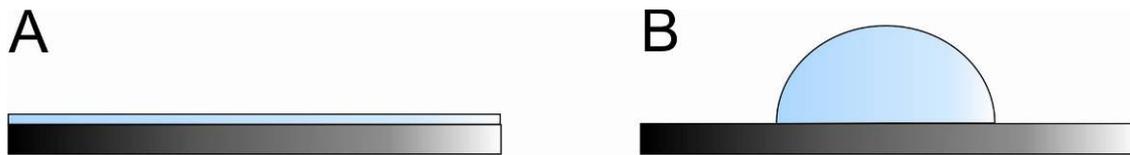


Abbildung 1: Benetzungszustände einer Flüssigkeit auf einer glatten Festkörperoberfläche. A: Komplette Spreitung; B: partielle Benetzung.

Am Dreiphasenkontakt des Kontaktwinkels bilden die unterschiedlichen Grenzflächenspannungen γ_{LA} , γ_{SL} und γ_{SA} ein Gleichgewicht aus (QUÉRÉ, 2008). Dieses kann wie folgt formuliert werden:

$$\gamma_{SA} = \gamma_{SL} + \gamma_{LA} \cos \theta \quad (1.2)$$

Der Kontaktwinkel θ ist definiert als Winkel zwischen der Tangente an der Flüssigkeit/Gas-Phasengrenze und der Tangente an der Festkörperoberfläche an der Kontaktlinie der drei Phasen Gas/Flüssigkeit/Festkörper (MARMUR, 2006b; Abbildung 2).

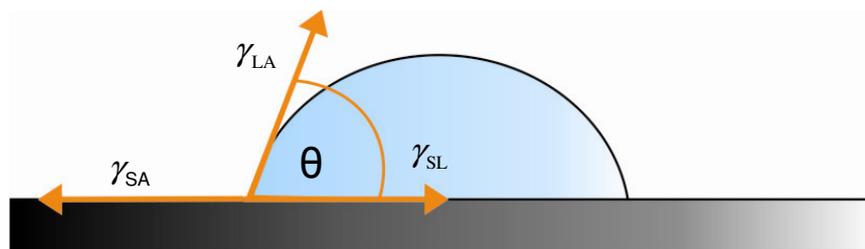


Abbildung 2: Flüssigkeitstropfen auf einer Festkörperoberfläche. Dargestellt sind die Grenzflächenspannungen γ_{LA} (Flüssigkeit/Gas), γ_{SL} (Festkörper/Flüssigkeit) und γ_{SA} (Festkörper/Gas), die an ihrer Dreiphasenkontaktlinie den Kontaktwinkel bestimmen (Young-Gleichung).

Die Gleichung nach Young (1.3) beschreibt die Korrelation zwischen dem Kontaktwinkel θ und der Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Gas,

der Grenzflächenspannung zwischen Festkörper und Flüssigkeit und der Grenzflächenspannung zwischen Festkörper und Gas (YOUNG, 1805):

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SA} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LA}} \quad (1.3)$$

Dabei ist der Kontaktwinkel u. a. von der physiko-chemischen Natur (dem Benetzungsverhalten) der drei Phasen abhängig, die die Form der Grenzflächen bestimmt (DE GENNES, 1985). Da eine direkte Bestimmung der Oberflächenspannung eines Festkörpers nicht möglich ist, wird diese indirekt über die Kontaktwinkelmessung bestimmt. Die Messung des Kontaktwinkels dient der Charakterisierung der Benetzbarkeit von Festkörperoberflächen.

Für biologische Oberflächen können die oben beschriebenen Gleichungen zur Benetzung nur eingeschränkt gelten, da diese niemals ideal glatt und chemisch homogen sind. Vielmehr findet man eine große Anzahl unterschiedlichster Strukturierungen auf diesen Oberflächen.

Eine Übertragung der Gleichung nach Young auf solche raue Oberflächen wurde von Wenzel schon 1936 untersucht (WENZEL, 1936). Er ging aber von der Voraussetzung aus, dass die rauen Oberflächen chemisch homogen sind, und die Strukturen auf der Oberfläche kleiner als der benetzende Wassertropfen sind. Deshalb ergibt sich folgende Gleichung:

$$\cos \theta_m = r \cos \theta \quad (1.4)$$

Die Gleichung beschreibt die Beziehung zwischen dem statischen Kontaktwinkel θ_m einer strukturierten Oberfläche und dem Kontaktwinkel θ auf einer glatten Oberfläche desselben Materials. Der Rauheitsfaktor r ist der Quotient aus tatsächlicher und projizierter Oberfläche und ist immer größer als 1 (WERNER, 2003).

Da mit ansteigendem r die tatsächliche Oberfläche zunimmt, steigt auch die Gesamt-Grenzflächenenergie an. Somit beeinflusst die Dimension der Strukturierung einer Oberfläche den makroskopisch zu messenden (statischen) Kontaktwinkel. Dabei muss diese jedoch kleiner sein als der Flüssigkeitstropfen, um Auswirkungen auf den statischen Kontaktwinkel zu haben (NOSONOVSKY und BHUSHAN, 2005).

Ist der statische Kontaktwinkel auf der Festkörperoberfläche kleiner 90° , so bezeichnet man diese Oberfläche als hydrophil.

Hydrophobe Oberflächen haben einen statischen Kontaktwinkel von über 90° . Somit sind diese beiden Klassen der Benetzung klar definiert.

Durch die Zunahme der Rauheit nimmt der Kontaktwinkel auf einer hydrophilen Festkörperoberfläche ab, sie wird hydrophiler. Auf einer rauen hydrophoben Oberfläche ist der gegenteilige Effekt zu erkennen: Der Kontaktwinkel ist im Vergleich zu dem Kontaktwinkel auf einer glatten Festkörperoberfläche desselben Materials höher, die Oberfläche wird hydrophober.

Für die Gleichung von Wenzel ist Voraussetzung, dass Flüssigkeit zwischen den Rauheit verursachenden Strukturen der Oberfläche dringt (Abbildung 3A).

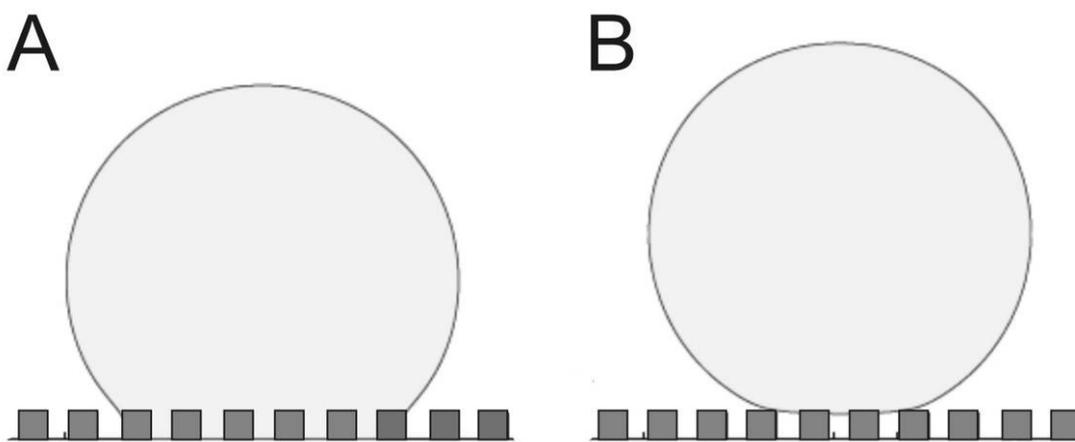


Abbildung 3: Seitenansicht der möglichen Benetzungsstadien von Wasser auf einer superhydrophoben strukturierten Oberfläche. A: Das Wasser ist zwischen die Strukturen der Oberfläche gedrungen (Wenzel-Stadium); B: Das Wasser ist nicht zwischen die Strukturen der Oberfläche eindringen (Cassie-Baxter-Stadium); verändert nach DUPUIS und YEOMANS, 2005.

Nach Wenzel verstärkt die Rauheit von Oberflächen deren Benetzungseigenschaften. Betrachtet man die Gleichung, so ist es theoretisch möglich, mit einem ausreichend hohen Rauheitsfaktor (r) die Oberfläche komplett zu benetzen ($\cos \theta_m > 1$) oder zu entnetzen ($\cos \theta_m < -1$; QUÉRÉ, 2008). Diese Berechnung lässt sich jedoch nicht in der Wirklichkeit beobachten.

Dringt bei Benetzung die Flüssigkeit nicht komplett zwischen die Strukturen der Oberfläche ein, kommt es zu Lufteinschlüssen zwischen Festkörper und Wassertropfen (heterogene Benetzung, Abbildung 3B). Besonders bei hydrophoben Oberflächen kann Wasser aufgrund der Oberflächenspannung und der

Oberflächenrauheit nicht zwischen die Strukturen dringen und diese vollständig benetzen (QUÉRÉ, 2008). Dies hat Auswirkungen auf den statischen Kontaktwinkel, die CASSIE und BAXTER (1944) in folgender Gleichung beschreiben:

$$\cos \theta_m = r' f \cos \theta + f - 1 \quad (1.5)$$

Dabei ist f der Anteil der projizierten Fläche, die tatsächlich benetzt ist, und r' der Rauheitsfaktor des Anteils der benetzten Oberfläche.

Ende der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts untersuchten Forscher der Kao Corporation in Japan die Auswirkungen von Rauheit auf unterschiedlichen fluorinierten Oberflächen (ONDA et al., 1996; SHIBUICHI et al., 1996; 1998). Sie maßen den statischen (makroskopischen) Kontaktwinkel θ_m auf den fraktal rauen Oberflächen und verglichen diesen mit den Kontaktwinkeln θ auf den glatten Oberflächen desselben Materials (mikroskopischer Kontaktwinkel). Auf glatten Oberflächen konnten Kontaktwinkel von 109° nicht überschritten werden. Auf den fraktal strukturierten Oberflächen zeigte sich jedoch, dass der statische Kontaktwinkel θ_m Werte von bis zu 170° erreichen konnte, sobald der Kontaktwinkel θ hohe Werte erreichte ($\cos \theta < 0$). Für hohe Kontaktwinkel musste die strukturierte Oberfläche somit hydrophob sein.

BICO und den Mitautoren (1999) gelang es in Versuchen die wichtigen Parameter für hohe Kontaktwinkel weiter einzugrenzen. So ist nicht nur die Rauheit der Oberfläche entscheidend für einen hohen Kontaktwinkel eines Flüssigkeitstropfens auf einer hydrophoben strukturierten Oberfläche, sondern auch die Kontaktfläche des Tropfens zum Festkörper. Durch die Modifizierung der Oberflächenstrukturierung sind somit Kontaktwinkel von fast 180° möglich.

2.1.3 Benetzung von strukturierten Oberflächen

Wie oben beschrieben, kann es bei der Benetzung strukturierter Oberflächen entweder zu einer homogenen Benetzung (Wenzel-Stadium), oder zu einer heterogenen Benetzung (Cassie-Baxter-Stadium) kommen. Bei der homogenen Benetzung dringt die Flüssigkeit zwischen die Oberflächenstrukturen ein und benetzt somit die komplette Festkörperoberfläche. Bei der heterogenen Benetzung kommt es besonders auf hydrophoben Oberflächen zur Bildung von Lufteinschlüssen in den Vertiefungen zwischen den Oberflächenstrukturen. Die

Oberfläche der Flüssigkeit liegt in diesem Fall auf einer Festkörper-Gas-Grenzschicht auf.

Eine Festkörperoberfläche, auf der eine Flüssigkeit eine kreisrunde sphärische Form annimmt, besitzt einen hohen Kontaktwinkel. Bei welchem Kontaktwinkel man diese Oberfläche als superhydrophob bezeichnet werden kann, ist bis heute umstritten. Eine klare Definition liegt bis heute nicht vor. Aktuelle Publikationen schlagen einen Kontaktwinkel von über 150° für superhydrophobe Oberflächen vor (JUNG und BHUSHAN, 2006; BHUSHAN und JUNG, 2007; ROACH et al., 2008; ZHANG et al., 2008).

Auf leicht hydrophoben strukturierten Oberflächen ist das Cassie-Baxter-Stadium metastabil, d. h. durch Anlegen eines äußeren Druckes, durch Kondensation oder Verdunstung kann die Flüssigkeit zwischen die Strukturen dringen. Es findet ein irreversibler Übergang zum Wenzel-Stadium statt (QUÉRÉ et al., 2003; NARHE und BEYSENS, 2006). Auf Blättern von *Xanthosoma robustum* konnte, nachdem zwischen den Strukturen Flüssigkeit kondensiert ist, an diesen Stellen eine Hydrophilie beobachtet werden (MOCKENHAUPT et al., 2008). Auch WIER und MCCARTHY (2006) zeigten auf geometrisch strukturierten technischen superhydrophoben Oberflächen den Verlust der Unbenetzbarkeit nach Kondensation. MCHALE et al. (2005) konnten das Einsinken von kleinen Wassertropfen auf einer superhydrophoben technischen Oberfläche während der Verdunstung zeigen. Der Tropfen zieht während der Verdunstung die Kontaktlinie auf dem Festkörper zurück und der Benetzungszustand ändert sich vom Cassie-Baxter-Stadium zum Wenzel-Stadium.

Ein mathematisch-thermodynamischer Zusammenhang zwischen der homogenen Benetzung und der heterogenen Benetzung wurde von MARMUR (2003) untersucht. Auch die Bedingungen für einen Übergang von einem zum anderen Benetzungszustand wurden betrachtet.

Einige Autoren (BICO et al., 2002; QUÉRÉ, 2008) nennen neben der homogenen Benetzung (Wenzel-Stadium) und der heterogenen Benetzung (Cassie-Baxter-Stadium) zwei weitere mögliche Benetzungszustände auf strukturierten Oberflächen. So kann sich die Flüssigkeit auf einer nicht-hydrophoben strukturierten Oberfläche zwischen den Strukturen ausbreiten und es bildet sich ein Flüssigkeitsfilm aus (Abbildung 4A). Die Spitzen der Strukturen bleiben dabei trocken. Dringt der Flüssigkeitstropfen jedoch nur teilweise zwischen die Struk-

turen ein, so bleibt die Kontur des Tropfens erhalten (Abbildung 4B). Dieser Tropfen liegt jedoch nicht wie im Cassie-Baxter-Stadium auf einer Festkörper-Gas-Grenzschicht auf.

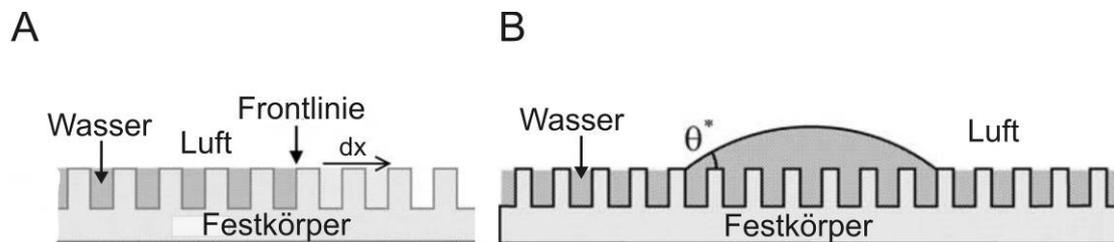


Abbildung 4: Weitere mögliche Benetzungszustände auf strukturierten Oberflächen (neben dem Wenzel-Stadium und dem Cassie-Baxter-Stadium). A: Wasser dringt zwischen die Strukturen ein. Die Wasserfront ist mit einem Pfeil gekennzeichnet; B: Ein Wasserfilm dringt zwischen die Strukturen ein. Der Wassertropfen liegt auf der Wasser-Festkörper-Grenzfläche auf. θ^* ist der sichtbare Kontaktwinkel; verändert nach BICO et al., 2002.

Für Lufteinschlüsse zwischen den Oberflächenstrukturen sind sowohl die Geometrie dieser Strukturen, als auch die mikroskopischen Kontaktwinkel entscheidend (GERMAN, 2007). Der mikroskopische Kontaktwinkel ist im Gegensatz zum statischen Kontaktwinkel nicht von der Strukturierung der Oberfläche abhängig. Er ist der ausschließlich material-, druck- und temperaturabhängige Kontaktwinkel der Young'schen Gleichung (PALZER et al., 2001). Dieser mikroskopische Kontaktwinkel bildet sich an den lokalen mikroskopischen Neigungen der Topographie entlang der Dreiphasenkontaktlinie aus (FLEMMING, 2006). Der statische Kontaktwinkel zeigt im Gegensatz dazu eine Abhängigkeit von der Strukturierung der Oberfläche. So untersuchten LUNDGREN et al. (2003; 2007) Wassertropfen auf Oberflächen mit einer Säulen-Strukturierung. Es zeigte sich eine Abhängigkeit des Benetzungszustandes von der Höhe der Säulen auf den Oberflächen: Wasser konnte zwischen den kleinen Säulen dringen, es lag somit des Wenzel-Stadium vor. Bei zunehmender Höhe der Säulen konnte Wasser nicht mehr in die Zwischenräume eindringen, sondern verblieb auf den Spitzen der Säulen (Cassie-Baxter-Stadium). Auch EXTRAND (2002; 2004) untersuchte einen Zusammenhang zwischen der Höhe der Oberflächenstrukturierung und dem Benetzungsstadium auf der Oberfläche. Er stellte Kriterien auf, die für die Erstellung einer superhydrophoben Oberfläche erfüllt sein müssen (EXTRAND, 2004). Die Kontaktlinien-Dichte (Produkt der Dichte der Strukturen pro Fläche und ihrem Umfang) und die

Höhe der Strukturen sind wichtige Kriterien für die Konzeption einer superhydrophoben Oberfläche.

Die Beziehung zwischen der Oberflächenrauheit r , dem Abrollwinkel α und dem statischen Kontaktwinkel θ_m von Wasser wurde mit Hilfe von Oberflächen mit unterschiedlichen Nadelstrukturierungen von Miwa et al. (2000) näher untersucht:

$$\sin \alpha = \frac{2rk \sin \theta_m (\cos \theta_m + 1)}{g(r \cos \theta + 1)} \left\{ \frac{3\pi^2}{m^2 \rho (2 - 3 \cos \theta_m + \cos^3 \theta_m)} \right\}^{1/3} \quad (1.6)$$

Abrollwinkel: α ; Rauheitsfaktor: r ; Gravitationskraft: g ; Proportionalitätskonstante: k ; Masse des Tropfens: m ; spezifisches Gewicht von Wasser: ρ ; mikroskopischer Kontaktwinkel: θ ; statischer Kontaktwinkel: θ_m

Um dieses Modell zu vereinfachen, wurde für die Rauheit r ein konstanter Wert angenommen, d. h. die Strukturen auf den Oberflächen hatten die gleiche Form. Bei Kontaktwinkeln von 145° bis 154° zeigten die experimentellen Daten eine gute Übereinstimmung mit den über das Modell berechneten Werten für den Abrollwinkel. Bei Oberflächen mit Kontaktwinkeln über 158° zeigten aber die über das Cassie-Baxter-Modell berechneten Werte bessere Übereinstimmungen. Anhand der Gleichung (1.6) schlossen die Autoren, dass ein hoher Anteil an Lufteinschlüssen zwischen den Oberflächenstrukturen sehr wichtig für eine ausgeprägte Superhydrophobie von Oberflächen ist. So lassen sich auch sehr niedrige Abrollwinkel von Wasser auf Oberflächen realisieren.

MARMUR (2004) untersuchte die Superhydrophobie von Oberflächen anhand eines Modell-Systems, welches dem Lotus-Blatt (*Nelumbo nucifera*) ähnelte. Anhand von Berechnungen wurde theoretisch der Einfluss der Oberflächenstrukturen des Festkörpers auf den Kontaktwinkel von Wasser bei einer homogenen Benetzung und einer heterogenen Benetzung berechnet. Die Ergebnisse zeigten, dass in der Natur metastabile Zustände der heterogenen Benetzung als Schlüssel zur Superhydrophobie bevorzugt werden. Diese metastabilen Zustände verringern den Einfluss der Rauheit der Blattoberfläche auf die Superhydrophobie. Somit ist die Unbenetzbarkeit der Blätter auch bei Beschädigungen der Strukturen der Oberfläche gewährleistet.

Ein detailliertes analytische Modell zur Erklärung der Beziehung zwischen der lokalen Rauheit und dem statischen Kontaktwinkel von Wasser ist von NOSONOVSKY und BHUSHAN (2005) aufgestellt worden. Mit Hilfe dieses Modells lässt sich die Rauheit von Oberflächen auf ihre superhydrophoben Eigenschaften hin optimieren. Dazu wurden unterschiedliche Verteilungen von Rauheiten auf zweidimensionalen Oberflächenprofilen und dreidimensionalen Oberflächen untersucht und auf ihre superhydrophoben Eigenschaften getestet. Das entwickelte Modell wurde schließlich für das Blatt von Lotus (*Nelumbo nucifera*) mit den berechneten Werten anderer Autoren angewendet und mit unterschiedlichen experimentellen Daten verglichen. Dabei zeigte der errechnete durchschnittliche makroskopische Kontaktwinkel von Wasser von 165° bei einer berechneten Rauheit R_f (Verhältnis der Festkörper-Flüssigkeit-Grenzfläche zu ihrer Projektion auf der ebenen Oberfläche) von ca. 4 (bei Annahme, die Strukturierung des Lotus-Blattes bestehe aus Strukturen mit halbkugelförmigen Enden) eine gute Übereinstimmung mit den experimentell gemessenen durchschnittlichen Kontaktwinkeln von 156° (NOSONOVSKY und BHUSHAN, 2005) und 162° (NEINHUIS und BARTHLOTT, 1997).

Weitere Untersuchungen zur Beeinflussung des statischen Kontaktwinkels von Wasser durch Strukturierung der Oberfläche des benetzten Festkörpers wurden an unterschiedlich mikro- und nanostrukturierten Polymer-Oberflächen durchgeführt (JUNG und BHUSHAN, 2006). Es wurde ein numerisches Modell entwickelt und anhand von experimentellen Daten überprüft. Demnach ist für die Herstellung einer superhydrophoben Oberfläche die Stabilisierung der Lufteinschlüsse zwischen den Strukturen sehr wichtig. Verschiedene Faktoren wie Kapillar-Wellen, Kondensation von Nanotropfen, Druck des Tropfens und hydrophile Stellen auf der Oberfläche können diese Lufteinschlüsse destabilisieren. Eine zusätzliche Nanostrukturierung, bzw. die hierarchische Strukturierung von Oberflächen können diesen Faktoren entgegenwirken (NOSONOVSKY und BHUSHAN, 2007; BHUSHAN, 2009; 2009a; KOCH und BARTHLOTT, 2009).

Anhand von unterschiedlich strukturierten Silizium-Oberflächen wurde der Einfluss der Oberflächenstrukturierung auf den statischen Kontaktwinkel untersucht (BHUSHAN und JUNG, 2007). Diese Silizium-Oberflächen waren mit zylindrischen Säulen mit flacher Oberseite strukturiert. Diese Säulen unterschieden sich im Durchmesser (D), Höhe (H) und Abstand (P). Wird nun angenommen,

der Wassertropfen benetzt die strukturierte Oberfläche homogen (Wenzel-Stadium), gilt bei einer gegebenen Rauheit R_f von 1 und bekanntem mikroskopischer Kontaktwinkel θ :

$$\cos \theta_m = \left(1 + \frac{\pi D H}{P^2}\right) \cos \theta \quad (1.7)$$

Liegt jedoch bei der Benetzung der Silizium-Oberfläche von Wasser das Cassie-Baxter-Stadium vor, so gilt:

$$\cos \theta_m = \frac{\pi D^2}{4P^2} (\cos \theta + 1) - 1 \quad (1.8)$$

Diese Gleichungen wurden verwendet, um den statischen Kontaktwinkel von Wasser bei Variation des Abstandes der Säulen zu berechnen. Es zeigte sich, dass es einen kritischen Säulen-Abstand gibt, der entscheidet, ob der Wassertropfen auf der Silizium-Oberfläche im Wenzel-Stadium oder im Cassie-Baxter-Stadium vorliegt. Mit Zunahme des Abstandes wechselt der Benetzungszustand des Wassertropfens vom Cassie-Baxter-Stadium zum Wenzel-Stadium.

2.2 Superhydrophobe selbstreinigende Oberflächen in der Natur, ihre Erforschung und Übertragung in die Technik

Das Phänomen der Selbstreinigung beruht auf der Unbenetzbarkeit der Blattoberfläche. Diese Unbenetzbarkeit wird von den epikutikularen Wachsen erzeugt, die der Kutikula aufliegen (BARTHLOTT und WOLLENWEBER, 1981; KOCH et al., 2008). Auf vielen Pflanzen bilden die epikutikularen Wachse eine zweidimensionale Schicht mit aufliegenden dreidimensionalen Wachskristallen. Diese Wachskristalle können sich in der Ultrastruktur und der Chemie stark unterscheiden und eine Größe von wenigen Nanometern bis zu einigen Mikrometern haben (BARTHLOTT et al., 1998; KOCH et al., 2008). Am häufigsten bilden die epikutikularen Wachse Röhrrchen und Schuppen aus (KOCH et al., 2008).

Ende der 30iger Jahre des 20. Jahrhunderts wurde eine Verbindung zwischen der Unbenetzbarkeit und der Selbstreinigungsfähigkeit von Blättern vermutet (ENGEL, 1939). In den 40iger Jahren wurde schließlich ein Zusammenhang zwischen der Unbenetzbarkeit von Pflanzenoberflächen und der Rauheit der

Oberflächen entdeckt (ZIEGENSPECK, 1942; FOGG, 1947; 1948). Holloway deutete eine Bedeutung der Rauheit durch die Nanostrukturierung der epikutikularen Wachse auf die Benetzung von Blattoberflächen an (HOLLOWAY, 1969b; 1970). Ein Zusammenhang zwischen der hydrophoben Chemie der epikutikularen Wachse und der Unbenetzbarkeit von pflanzlichen Oberflächen wurde schließlich von HOLLOWAY untersucht (1969b; 1969a).

Mit der Einführung des Rasterelektronenmikroskops Mitte der 60iger Jahre des vorigen Jahrhunderts konnten biologische Oberflächen zum ersten Mal hochauflösend untersucht und charakterisiert werden (GÜNTHER und WORTMANN, 1966; HOLLOWAY, 1971; GOLDSTEIN et al., 1981). Zunächst wurden hauptsächlich die Oberflächen von unterschiedlichen Pflanzenfamilien taxonomisch-systematisch untersucht (Übersicht in BARTHLOTT und EHLER, 1977; BARTHLOTT, 1990). Mit der Weiterentwicklung des REM wurden Ende der 1980iger auch weitere Einsatzfelder in der Erforschung von Pflanzenoberflächen eröffnet. So entwickelte sich das REM zu einem wichtigen Werkzeug auch in der angewandten Wissenschaft.

Die anfänglichen rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen zur taxonomischen Einordnung unterschiedlicher Vertreter verschiedener Pflanzengruppen anhand der Strukturierung der Epidermisoberflächen führten schließlich auch zur Aufklärung des Zusammenhangs zwischen der Fähigkeit zur Selbstreinigung pflanzlicher Oberflächen und deren Strukturierung (BARTHLOTT und EHLER, 1977, BARTHLOTT und WOLLENWEBER, 1981; BARTHLOTT et al., 1998). Dabei wird die Rauheit auf den untersuchten Pflanzenoberflächen durch eine hierarchische Doppelstrukturierung in Form einer Mikrostrukturierung in Verbindung mit einer aufgelagerten hydrophoben Nanostrukturierung (den epikutikularen Wachskristallen) erzeugt. Die Mikrostrukturierung wird von konvex bis papillös geformten epidermalen Zellen gebildet (BARTHLOTT und EHLER, 1977). Bei superhydrophoben selbstreinigenden Pflanzenoberflächen ist somit sowohl die chemische Zusammensetzung, als auch die Rauheit der Oberfläche Ursache für die extreme Unbenetzbarkeit (NEINHUIS und BARTHLOTT, 1997).

Bei Benetzung mit Wasser wird die Luft, wie in Kapitel 1.2 ausführlich erklärt, zwischen den Strukturen der superhydrophoben selbstreinigenden Oberfläche eingeschlossen, die Kontaktfläche zwischen Wasser und Oberfläche ist stark

reduziert (KOCH et al., 2008; ENSIKAT et al., 2009). Der Wassertropfen bildet mit einem statischen Kontaktwinkel von über 150° eine nahezu kreisrunde sphärische Form auf den Strukturen der Oberfläche (BARTHLOTT und NEINHUIS, 1997; BICO et al., 2001) und rollt schon bei minimaler Neigung ab (Abrollwinkel von weniger als 10°).

Durch die hierarchische Strukturierung der superhydrophoben pflanzlichen Oberflächen ist nicht nur die Kontaktfläche von Wasser reduziert, sondern auch die Adhäsion von Kontaminationspartikeln (CHOW, 2003). Diese haften hauptsächlich durch schwache Van-der-Waals-Kräfte und durch Kontakt-Deformationen auf der Pflanzenoberfläche. Die Hauptursachen für die Selbstreinigungsfähigkeit von pflanzlichen Oberflächen sind somit die Oberflächenstrukturierung, die Unbenetzbarkeit von Wasser und die geringe Adhäsion von Kontaminationspartikeln (BARTHLOTT und NEINHUIS, 1997; WAGNER et al., 2003; BHUSHAN et al., 2009a). Untersuchungen des Zusammenhanges zwischen der Selbstreinigungsfähigkeit und dem Benetzungszustand auf unterschiedlich strukturierten technischen Oberflächen bestätigten dies (FÜRSTNER et al., 2005). Es konnte gezeigt werden, dass auch auf hydrophoben technischen Oberflächen mit dem Verlust der Strukturierung auch die Fähigkeit zur Selbstreinigung verloren geht.

Ende der 80iger und Anfang der 90iger Jahre wurden die ersten Untersuchungen zur technischen Übertragung der selbstreinigenden Eigenschaften superhydrophober pflanzlicher Oberflächen durchgeführt (BARTHLOTT, 1990). Ein umfassende Untersuchung verschiedener unbenetzbarer, anti-adhäsiver, strukturierter Pflanzenoberflächen hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Selbstreinigung erbrachte die Grundkenntnisse für eine spätere technische Übertragung der Selbstreinigung (NEINHUIS und BARTHLOTT, 1997).

Mit der Erteilung des europäischen Patentes auf hierarchisch strukturierte selbstreinigende technische Oberflächen (BARTHLOTT, 1998) und der Einführung des Markennamens „Lotus-Effect[®]“ erwachte das Interesse der Industrie an einer technischen Übertragung der Selbstreinigung pflanzlicher Oberflächen. Es starteten Kooperationsprojekte mit verschiedenen Herstellerfirmen. So konnte eine Firma für Fassaden-Beschichtung eine selbstreinigende Fassadenfarbe entwickeln und 1999 erfolgreich auf den deutschen Markt einführen. Mit Einführung der LKW-Maut auf deutschen Autobahnen im Jahre 2005

wurden auch selbstreinigende strukturierte Gläser vor den optischen Sensoren an den Kontrollbrücken eingesetzt.

Auch andere Industriezweige zeigten ein großes Interesse an der technischen Umsetzung des Phänomens der Selbstreinigung. So entwickelte ein internationaler Industriekonzern sowohl ein Pulver mit Partikeln im Nanometer-Bereich, als auch ein Imprägnierspray (MÜLLER und WINTER, 2004). Mit beiden Produkten lassen sich unstrukturierte Oberflächen nachträglich zu superhydrophoben selbstreinigenden Oberflächen umwandeln. Gefäße lassen sich so nach Behandlung mit diesen Produkten restlos entleeren. Mit dem Imprägnierspray lassen sich auch verschiedene Gegenstände, wie z. B. Gartenmöbel, wetterfest behandeln. Anschließend lässt sich dieser strukturierte Film einfach abwischen. Auch ein Dachbaustoffe-Hersteller stellt selbstreinigende Dachziegel her, die auf dem deutschen Markt erhältlich sind.

Neben den oben aufgezählten Möglichkeiten der Nutzung des biologischen Phänomens der Selbstreinigung lassen sich weitere Einsatzfelder erschließen. Um eine erfolgreiche Selbstreinigung superhydrophober strukturierter Oberflächen zu erreichen, ist lediglich fließendes Wasser nötig. Somit sind die meisten Anwendungen von „Lotus-Effect[®]“-Oberflächen zwar auf den Außenbereich beschränkt, doch auch in diesem Bereich sind viele verschiedene technische Anwendungen möglich. So sind Textilien für Zelte und Markisen in der Entwicklung. Auch selbstreinigende Autolacke oder wasser- und schmutzabweisende Outdoor-Bekleidung wären denkbar (ZIMMERMANN et al., 2008).

2.3 Regeneration superhydrophober Oberflächen

Trotz des hohen Anwendungspotentials sind bislang nur wenige technische Anwendungen superhydrophober Oberflächen erfolgreich auf dem Markt eingeführt worden. Ein Grund dafür ist die mechanische Instabilität der Hydrophobie der Oberflächen und der Nano- und Mikrostrukturierung, z. B. gegenüber Berührung und Reibung, die zu einem Verlust der Hydrophobie und Selbstreinigung der Oberfläche führen kann (CALLIES und QUÉRÉ, 2005; YOUNGBLOOD und SOTTOS, 2008).

Das natürliche Vorbild, die Blattoberfläche des Lotus (*Nelumbo nucifera*), ist relativ unempfindlich gegenüber die Beschädigung der Oberflächenstrukturen

aufgrund des metastabilen Zustandes der heterogenen Benetzung (MARMUR, 2004). Durch die lokal begrenzte Änderung des Benetzungszustandes vom Cassie-Baxter-Stadium in das Wenzel-Stadium, z. B. bei Ausübung von Druck auf den Wassertropfen, benötigen die Mikrostrukturen dieser Oberflächen nur eine geringe Höhe zur Sicherstellung der Funktion. Dieser Umstand sorgt für eine gewisse Unempfindlichkeit dieser Strukturen auf der Blattoberfläche gegenüber mechanischer Beschädigung. Die Nanostrukturierung in Form von epikutikularen Wachskristallen wird bei Verlust durch Beschädigung durch einen Transportprozess durch die Kutikula und anschließende Selbstanordnung wiederhergestellt (RIEDERER und MÜLLER, 2006 ; KOCH et al., 2006). Ein längerfristiger Schutz der Oberflächenstrukturen gegenüber mechanischer Beanspruchung ist jedoch bei der Pflanze nicht vonnöten, da die Blätter in jedem Frühjahr erneuert werden.

Technische superhydrophobe Oberflächen sollten bei Anwendung länger halten als ihr natürliches Vorbild, die Blattoberfläche von Lotus. Deshalb ist ein wirksamer Schutz gegen mechanische Beschädigung sehr wichtig. Entwickelt wurden bislang mehrere Ansätze, um technische Funktionsoberflächen gegen Beschädigungen zu schützen. Der bisherige technische Ansatz ist die Vorbeugung von Beschädigungen (VAN DER ZWAAG et al., 2007). Dies erreicht man durch die Härte des Materials (YOUNGBLOOD und SOTTOS, 2008). Ein anderer Ansatz ist das „Management“ von Beschädigungen (VAN DER ZWAAG et al., 2007). Dieses „Management“ bildet die Grundlage in der Erforschung der Selbstregeneration von Materialien. Zunächst ist entscheidend, dass das selbstregenerierte Material die gleichen funktionellen Eigenschaften aufweist, wie das unbeschädigte Material. Beschädigungen in selbstregenerierendes Material müssen ohne äußere Einwirkung verschwinden, d. h. die Fehlstelle muss aufgefüllt werden und die Funktion an dieser Stelle regeneriert sein. Es müssen sich also im ansonsten festen Material mobile Elemente befinden, die zu der Fehlstelle finden, um dort wiederum eine feste Verbindung mit dem die Fehlstelle umgebenden intakten Material einzugehen. Dieses Umschalten von einer mobilen Phase in eine stationäre stellt eine besondere Herausforderung dar. WHITE und Mitautoren (2001) entwickelten ein Polymer mit eingefügten Mikrokapseln, gefüllt mit einem flüssigen Wirkstoff, und einem Katalysatoren. Bei einem Riss im Polymer brechen diese Mikrokapseln auf, der Wirkstoff wird

in dem Riss freigesetzt, verteilt sich dort und polymerisiert in Verbindung mit den Katalysatoren. Der Riss wird in Folge geschlossen, die Funktion des Polymers ist regeneriert. Diese passive Selbstregeneration in der Fehlstelle wird von der Polymer-Wirkstoff-Interaktion bestimmt (WOOL, 2008). Es können nach Wiederherstellung im Bereich der regenerierten Fehlstelle Mikro- oder Haarrisse entstehen, die trotz Reparatur zu nachfolgenden größeren Schäden führen.

Für eine erfolgreiche Regeneration mit Hilfe eines flüssigen Wirkstoffes muss die Benetzung und die Materialverträglichkeit der Fehlstelle mit dem Wirkstoff berücksichtigt werden (CARUSO et al., 2007; WOOL, 2008). Da die Mikrokapseln mit dem Wirkstoff an der Fehlstellen-Oberfläche zufällig verteilt sind und zunächst zusammenfließen müssen, ist die komplette Benetzung der Beschädigung zeitlich verzögert.

Die Selbstregeneration eines Polymers, d. h. die Reparatur einer Fehlstelle, kann auch von äußeren Faktoren wie Hitze oder Druck induziert werden (VAN DER ZWAAG et al., 2007; YOUNGBLOOD und SOTTOS, 2008).

Die oben beschriebenen Ansätze für die Selbstregeneration gelten für Polymere (CARUSO et al., 2007), es gibt jedoch auch Arbeiten zu der Selbstregeneration von Metallen, Keramik, Beton und Asphalt (Übersicht in VAN DER ZWAAG et al., 2007).

Allen Ansätzen gemeinsam ist die Regeneration der mechanischen Eigenschaften des beschädigten Materials durch das beständige Auffüllen von Fehlstellen, bzw. das Zusammenfügen zweier auseinander gebrochener Hälften.

Für eine erfolgreiche Regeneration superhydrophober selbstreinigender Oberflächen ist neben dem beständigen Auffüllen der Fehlstelle auch die Wiederherstellung der Fähigkeit zur Selbstreinigung, also die Wiederherstellung struktureller und chemischer Eigenschaften der intakten Oberfläche vonnöten. Das Auffüllen von Fehlstellen kann durch Mikrokapseln in Verbindung mit einem Katalysatoren, beides eingebaut innerhalb der zu regenerierenden Oberfläche, erfolgreich erledigt werden. Es kann jedoch auch durch von außen zugeführte Oberflächenbestandteile erfolgen. Die Entwicklung eines selbstregenerierenden Materials ist in diesem Fall nicht notwendig. Das Ersetzen von mechanisch entfernten Mikro- und Nanostrukturen der beschädigten superhydro-

rophoben Oberfläche muss auch durch die Beschaffung der Strukturbestandteile von außen erfolgen. Der Transport dieser „Baumaterialien“ an den Ort der Beschädigung kann durch Tenside erfolgen (Abbildung 5).

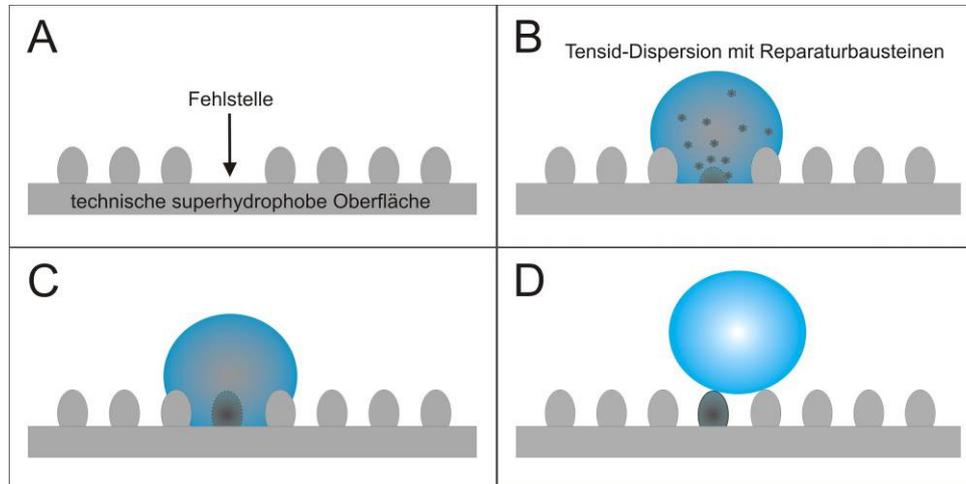


Abbildung 5: Regeneration von zerstörten Strukturen (Fehlstelle) auf einer beschädigten superhydrophoben Oberfläche mit Hilfe einer Tensid-Dispersion mit Reparaturbausteinen.

- A: Auf einer technischen superhydrophoben Oberfläche ist durch mechanische Belastung die Strukturierung zerstört worden.
- B: Eine Tensid-Dispersion (mit Reparaturbausteinen) bleibt an der Fehlstelle haften, die Reparaturbausteine lagern sich in der Fehlstelle zu einer Struktur zusammen.
- C: Die Strukturierung in der Fehlstelle ist regeneriert.
- D: Das überschüssige Tensid kann an der nun wieder superhydrophoben Stelle der Oberfläche entfernt werden (z. B. durch Abwaschen).

Grafik von Zdenek Cerman.

Tenside sind organische Verbindungen und bestehen sowohl aus hydrophilen (polaren), als auch aus hydrophoben (unpolaren) Molekülgruppen. Sie besitzen aufgrund dieser Doppelnatur einen amphiphilen Charakter (DÖRFLER, 2002). Tenside finden deshalb eine breite Anwendung in Industrie und Technik. Auch in biologischen Prozessen spielen sie eine wichtige Rolle (TORN, 2000). Sie besitzen eine starke Grenzflächenaffinität (REHAGE, 2005) und setzen die Grenzflächenspannung von Oberflächen und die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten herab (ROSEN, 2004).

Tenside lassen sich anhand der Art der hydrophilen Gruppe und der Ladung der polaren Kopfgruppe klassifizieren. So unterscheidet man nicht-ionische, anionische, kationische und amphotere Tenside. Die nicht-ionischen Tenside bilden in wässriger Lösung keine Tensidionen, die anionischen Tenside bilden negativ geladene Ionen und die kationischen Tenside positiv geladene Tensi-

dionen. Amphotere Tenside enthalten in ihrem Molekül sowohl anionen-, als auch kationenaktive Gruppen.

In wässriger Phase lagern sich Tenside schon bei niedrigen Konzentrationen an der Oberfläche an (REHAGE, 2005). Es bildet sich eine Tensidadsorptionsschicht an der Grenzfläche Festkörper/ Tensidlösung aus (DÖRFLER, 2002). Dabei tauchen die hydratisierten polaren Gruppen in die Lösung ein, der hydrophobe Rest liegt auf der Oberfläche. Wird die Konzentration eines Tensids in wässriger Lösung erhöht, können sich keine weiteren Moleküle an der Oberfläche anlagern. Die hydrophoben Gruppen lagern sich deshalb zu Aggregaten, den sog. Mizellen zusammen. Die Konzentration des Tensids in wässriger Lösung, ab der sich Mizellen bilden, nennt man kritische Micellenbildungskonzentration (critical micelle concentration, CMC). Die Mizellen können in ihrem Inneren hydrophobe Stoffe einlagern (REHAGE, 2005). So lassen sich diese in polare Flüssigkeiten (z. B. Wasser) lösen. Solch ein Solubilisierungsvorgang ist z. B. bei der Herstellung von Farben und Lacken entscheidend.

Eine Mikroemulsion ist ein kolloidales Mehrkomponentensystem aus Wasser, Öl, Tensid und häufig einem Cotensid. Die charakteristischen Eigenschaften einer Mikroemulsion sind Isotropie, Transparenz bis schwache Opaleszenz, thermodynamische Stabilität und niedrige Viskosität (KRAUSE, 2001). Mikroemulsionen sind strukturell sehr komplex aufgebaut sein, im einfachsten Fall jedoch bestehen diese aus Mizellen (REHAGE, 2005).

2.4 Ziel der Arbeit

Superhydrophobe selbstreinigende technische Oberflächen sind schon seit 10 Jahren auf dem Markt. Beschädigungen der Oberflächen können aber zum Verlust der Unbenetzbarkeit und Selbstreinigung der Oberflächen an diesen Stellen führen. Als Folge kann sich an diesen Beschädigungen Schmutz anlagern, die Selbstreinigung ist an dieser Stelle der Oberfläche zerstört.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Reparaturdispersion, die gezielt an Beschädigungen haftet, dort wirkt und die Selbstreinigungsfähigkeit an dieser Stelle regeneriert.

Als erster Schritt werden zunächst unterschiedlich strukturierte pflanzliche Oberflächen mit dem Weißlichtprofilometer charakterisiert. Die Auswahl an

Pflanzenoberflächen reicht von Oberflächen mit tabularen Epidermiszellen und einer unstrukturierten Wachsschicht, bis zu Oberflächen mit einer papillösen Mikrostrukturierung und aufgelagerten epikutikularen Wachskristallen. Zusätzlich werden technische superhydrophobe Oberflächen mit Hilfe der Weißlichtprofilometrie charakterisiert. Ziel ist die Prüfung der Eignung der Weißlichtprofilometrie zur Charakterisierung und Vermessung von strukturierten superhydrophoben Oberflächen. Es werden zusätzlich definierte Oberflächenkenngrößen, die zur strukturellen Charakterisierung industriell gefertigter Oberflächen dienen, auf superhydrophobe pflanzliche Oberflächen übertragen. Am Ende soll eine schnelle und qualitative Methode zur Verfügung stehen, um die für die Unbenetzbarkeit und Selbstreinigung wichtigen Parameter der Strukturierung bei pflanzlichen Oberflächen zu erfassen. Mit Hilfe dieser Methode lässt sich die Regeneration der beschädigten Strukturierung superhydrophober technischer Oberflächen nach Behandlung mit der Reparaturdispersion kontrollieren.

Zusätzlich wird eine neue genaue quantitative Methode zur Überprüfung der Selbstreinigungsfähigkeit von Oberflächen entwickelt.

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 Material

3.1.1 Pflanzen

Aufgrund der mehr als 30 Jahre langen Vorarbeit am Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen konnte auf ein großes Archiv an rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen unterschiedlicher Pflanzenoberflächen zurückgegriffen werden. Für die vorliegende Arbeit wurden 36 unterschiedlich strukturierte Blattoberflächen, sowohl die Blattoberseite, als auch die Blattunterseite verschiedener Pflanzen aus der Vielzahl der untersuchten Oberflächen ausgesucht (Tab. 1). Die ausgesuchten Pflanzen wurden mit Ausnahme von *Ficus elastica* in den Botanischen Gärten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (BG BONN) kultiviert. *Ficus elastica* wurde in einem Gartenbaubetrieb kultiviert.

Tabelle 1: Untersuchte Pflanzenarten.

Pflanze	Familie	Akzessions-Nr. BG BONN
<i>Alocasia macrorrhiza</i> (L.) G. Don	Araceae	1194
<i>Alocasia robusta</i>	Araceae	4961
<i>Berberis vulgaris</i> L.	Berberidaceae	11754
<i>Brassica oleracea</i> var. <i>gongyloides</i> L. cv. Blauer Speck	Brassicaceae	29156
<i>Clivia nobilis</i> Lindl.	Amaryllidaceae	3203
<i>Cocos nucifera</i> L.	Arecaceae	01196
<i>Coffea arabica</i> L. cv. <i>San Ramon</i>	Rubiaceae	19598
<i>Colocasia esculenta</i> (L.) Schott	Araceae	4069
<i>Drimys winteri</i> J.R. et G. Forst.	Winteraceae	00768
<i>Eschscholzia californica</i> Cham.	Papaveraceae	
<i>Eucalyptus macrocarpa</i> Hook.	Myrtaceae	00612
<i>Euphorbia atropurpurea</i> Brouss.	Euphorbiaceae	08048
<i>Euphorbia myrsinites</i> L.	Euphorbiaceae	08048
<i>Ficus elastica</i> Roxb.	Moraceae	
<i>Glycine max</i> (L.) Merr.	Fabaceae	19241
<i>Hedera helix</i> L.	Araliaceae	10098
<i>Iris germanica</i> L.	Iridaceae	8077
<i>Iris unguicularis</i> Poir.	Iridaceae	16050
<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	Magnoliaceae	12418
<i>Nelumbo nucifera</i> Gaertn.	Nelumbonaceae	11705
<i>Oryza sativa</i> L.	Poaceae	8616
<i>Thalictrum flavum</i> ssp. <i>glaucum</i> (Desf.) Batt.	Ranunculaceae	2700
<i>Triticum aestivum</i> ssp. <i>aestivum</i> L.	Poaceae	7841
<i>Tropaeolum majus</i> L.	Tropaeolaceae	3796

Tabelle 1 (Fortsetzung): Untersuchte Pflanzenarten.

Pflanze	Familie	Akzessions-Nr. BG BONN
<i>Xanthosoma nigrum</i> (Vell.) Mansf.	Araceae	22896
<i>Xanthosoma robustum</i> Schott.	Araceae	1070

3.1.2 Technische Oberflächen

Charakterisierung mit Weißlichtprofilometrie

Es wurden unterschiedliche technische Oberflächen verschiedener Hersteller verwendet (Tabelle 2).

Tabelle 2: technische Oberflächen verschiedener Hersteller.

Probe	Hersteller	Besonderheiten
Kupferfolie (galvanisch mikrostrukturiert)	Bolta Werke GmbH, Gottmadingen	Wurde vor den Untersuchungen mit Fluorkunststoff Antispread F 2/50 FK 60 (Fa. Dr. Tillwich, Horb-Ahldorf) hydrophobiert.
TEGOTOP [®] 210-Muster (partikelhaltiges Aerosol)	Evonik Industries AG, Essen	Wurde aufgesprüht auf Objektträger aus Kalk-Natron-Glas; Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe).
Kunststoff-Muster mit Lotus-Effect [®]	Kunststoff-Institut Lüdenscheid, Lüdenscheid	selbstreinigend
Muster-Glas mit Lotus-Effect [®] („White Frost [®] “)	Ferro GmbH, Frankfurt am Main	selbstreinigend
Fassadenfarbe „Lotusan [®] “	Sto AG, Stühlingen	selbstreinigend
Textil-Muster mit Lotus-Effect [®]	Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF), Denkendorf	selbstreinigend

Generierung von Fehlstellen/ Benetzungsverhalten von Tensid-Dispersionen

Es wurden galvanisierte Kupferfolien (Bolta-Werke GmbH, Gottmadingen), deren Oberfläche zuvor mit dem Fluorkunststoff Antispread F 2/50 FK 60 (Fa. Dr. Tillwich, Horb-Ahldorf) hydrophobiert wurden, verwendet.

Zusätzlich wurden TEGOTOP[®] 210-Oberflächen (Evonik Industries AG, Essen) verwendet. Dazu wurden Glasoberflächen (Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe) vor den Untersuchungen mit dem Konzentrat TEGOTOP[®] 210 gleichmä-

Big eingesprüht, um superhydrophobe, strukturierte und selbstreinigende Oberflächen zu erzeugen.

Außerdem wurden Muster-Glasoberflächen „White Frost[®]“ mit Lotus-Effect[®] (Ferro GmbH, Frankfurt am Main) verwendet.

Regeneration der Hydrophobie in Fehlstellen

Es wurden Voruntersuchungen zur Auswahl verschiedener hydrophiler Versuchsoberflächen durchgeführt. Diese Auswahl bestand aus Schiefer (Schichtsilikat; Beda Bedachungsartikel & Co. KG, Köln), Plexiglas[®]-Kunststoff (Polymethylmethacrylat; Evonik Industries AG, Essen) und Glas (Objektträger aus Kalk-Natron-Glas; Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe). Für die weiteren Versuche wurden schließlich Glasoberflächen (Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe) vor den Untersuchungen mit dem Konzentrat TEGOTOP[®] 210 (Evonik Industries AG, Essen) gleichmäßig eingesprüht, um superhydrophobe, strukturierte und selbstreinigende Oberflächen zu erzeugen.

Auch die Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect[®] (Kunststoff-Institut, Lüdenscheid) wurden verwendet.

Regeneration der Strukturierung in Fehlstellen

Die Untersuchungen wurden an Glas-Oberflächen (Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe) und an Muster-Glasoberflächen „White Frost[®]“ mit Lotus-Effect[®] (Ferro GmbH, Frankfurt am Main) durchgeführt.

3.1.3 Kontaminationspartikel

Zur Kontamination wurde ausschließlich das fluoreszierende Pulver Redwop[™] (Lightning Powder Company, Inc.; Florida, USA) auf Lycopodium-Basis verwendet. Dieses Pulver eignet sich für die Bestimmung der Stärke der Kontamination von Oberflächen mit Hilfe des Puls-Amplituden-Modulations-Fluorometers, da es durch UV-Licht zur Fluoreszenz angeregt werden kann. Das Pulver ist hydrophob und die einzelnen Partikel haben eine Größe von 5 bis 50 µm.

3.1.4 Tenside und Tensid-Dispersionen

Es wurden für die Untersuchungen, soweit nicht anders angegeben, ausschließlich Tenside und Tensid-Dispersionen verwendet, die vom Geschäftsfeld Chemie des Konzerns Evonik Industries AG in Essen zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 3).

Tabelle 3: Dispersionen, die für die Entwicklung einer Reparaturdispersion untersucht wurden.

Probe	Zusammensetzung	Ladung der Kopfgruppe
REWOPOL® SB DO 75	75% Natriumdiisooctylsulfosuccinat	anionisch
TEGOTENS® B 810	40% Fettsäureamidopropylbetain	kationisch
TEGOTENS® DO	30% Decyldimethylaminoxid	kationisch
TEGOTENS® EC 11	Endgruppenverschlossenes Fettalkoholethoxylat	nichtionisch
Gloss Dryer®	Zur Anwendung wurde die Mikroemulsion 1:1000 verdünnt mit Aqua dest.	kationisch
TEGOTOP® 105	Silikon Siloxane Zur Anwendung wurde TEGOTOP® 105 mit Aqua dest. verdünnt	
tu0920a	50 g H ₂ O 10 g TEGOTOP® 105 3,5 g Sorbitanmonolaurat	nichtionisch
tu0920b	50 g H ₂ O 10 g TEGOTOP® 105 3,5 g Sorbitanmonolaurat 7,5 g TEGOTENS® B 810	amphoter
tu0921a	50 g H ₂ O 10 g TEGOTOP® 105 2,5 g Sorbitanmonolaurat 1,5 g Siliconemulgator ABIL Care 85	nichtionisch
tu0921b	50 g H ₂ O 10 g TEGOTOP® 105 2,5 g Sorbitanmonolaurat 1,5 g Siliconemulgator ABIL Care 85 7,5 g TEGOTENS® B 810	amphoter
„kationische Dispersion“	50 g Emulgatormischung (kationisch/ nichtionisch/ amphoter) 40 g H ₂ O 10 g TEGOTENS® B 810 10 g TEGOTOP® 105	kationisch
„GDT105F20“	180 ml 1:1000-Verdünnung Gloss Dryer® 20 ml TEGOTOP® 105 3,3 g Leuchtstoffpulver F20 (Osram GmbH, Schwabmünchen)	

Tabelle 3 (Fortsetzung): Dispersionen, die für die Entwicklung einer Reparaturdispersion untersucht wurden.

Probe	Zusammensetzung	Ladung der Kopfgruppe
„GDT105F20Silmikron“	180 ml 1:1000-Verdünnung Gloss Dryer [®] 20 ml TEGOTOP [®] 105 3,3 g Leuchtstoffpulver F20 (Osram GmbH, Schwabmünchen) 2,5 g Silmikron [®] 795-10/1 (Quarzwerte GmbH, Frechen)	
„GDT105F20Silmikron+T105“	160 ml 1:1000-Verdünnung Gloss Dryer [®] 40 ml TEGOTOP [®] 105 3,3 g Leuchtstoffpulver F20 (Osram GmbH, Schwabmünchen) 2,5 g Silmikron [®] 795-10/1 (Quarzwerte GmbH, Frechen)	

Das Leuchtstoffpulver F20 (Osram GmbH, Schwabmünchen) besitzt eine Partikelgröße von 2 bis 14 µm.

Das Silmikron[®] (Quarzwerte GmbH, Frechen) ist ein weißes Ultrafeinstmehl mit einer Partikelgröße von 0,5 bis 4,0 µm.

Beide Pulver wurden vor Gebrauch mit dem Hydrophobierungsmittel Antispread F2/50 FK 60 (Dr. Tillwisch, Horb) hydrophobiert.

3.2 Methoden

Zur Charakterisierung der pflanzlichen und technischen Oberflächen wurden die Weißlichtprofilometrie und die Rasterelektronenmikroskopie verwendet.

3.2.1 Weißlichtprofilometrie

Die Weißlichtprofilometrie (WP) ist eine Methode zur berührungslosen optischen Vermessung von Oberflächen durch chromatische Abtastung mit fokussiertem Weißlicht. Aufgrund der unterschiedlichen Foki der verschiedenen Wellenlängen wird nur die Wellenlänge zurück in das Gerät gestreut, deren Fokuspunkt genau in der Oberfläche liegt. Mit Hilfe eines Spektrometers wird die Höhe dieses Oberflächenpunktes ermittelt und ein Höhenprofil erstellt.

Es wurde das Weißlichtprofilometer MicroProf® der Firma Fries Research & Technology GmbH (Bergisch-Gladbach) verwendet. Die laterale Auflösung des chromatischen Weißlicht-Sensors beträgt ca. 1 µm, begrenzt durch den Durchmesser des Lichtpunktes des fokussierten Weißlichtes auf der Oberfläche der Probe. Die maximale vertikale Auflösung des Sensors beträgt 10 bis 100 nm.

Vermessen wurden ausschließlich frische Pflanzenblätter. Dazu wurden komplette Blätter verwendet. Bei zu großen Blättern oder bei Blattunebenheiten wurden aus den Blättern Oberflächenproben mit einer Größe von ca. 10 cm² herausgeschnitten und diese auf den Probentisch des Profilometers befestigt. Es wurden auf jeder Probe jeweils 10 zufällig ausgewählte quadratische Messfelder mit einer Fläche von 100 x 100 µm² vermessen. Die Scan-Geschwindigkeit betrug 300 Hz, d. h. der innere lichtempfindliche Sensor (eine CCD-Zeile) wird für 3 ms pro Meßfeld belichtet. Die Pixelanzahl betrug 100 x 100 Pixel mit einer Pixelgröße von 1 µm².

Diese Bilddaten des Weißlichtprofilometers wurden nachfolgend mit der mitgelieferten Software Mark III (Version 3.8.13.3; Fries Research & Technology GmbH, Bergisch-Gladbach) analysiert.

Aus diesen Bilddaten wurden zunächst dreidimensionale Rauheits- und Welligkeitsparameter berechnet, für die es bislang noch keine generelle Definition gibt. Die Berechnung dieser Parameter hielt sich aber an die Vorgaben der Normen für zweidimensionale Oberflächenparameter. Es folgte im Gegensatz dazu aber keine Mittelung über Linien oder Zeilen, sondern aus allen Bildpunkten in einem Berechnungsschritt. Die in dieser Arbeit verwendeten Rauheitsparameter sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: verwendete Rauheitsparameter.

Parameter	Benennung	Beschreibung	Bedeutung	Norm
Ra	Arithmetischer Mittenrauwert	Arithmetischer Mittelwert der absoluten Beträge der Ordinatenwerte des Rauheitsprofils	sehr verbreitete Kenngröße; besitzt schwache Aussagekraft	DIN EN ISO 4287; BS 1134; ANSI B 46.1
Rq	Quadratischer Mittenrauwert	Mittlere quadratische Abweichung der Ordinatenwerte des Rauheitsprofils von der Mittellinie	empfindlicher auf einzelne Spitzen und Riefen; bedeutend bei der statistischen Betrachtung eines Oberflächenprofils	DIN EN ISO 4287

Tabelle 4 (Fortsetzung): verwendete Rauheitsparameter.

Parameter	Benennung	Beschreibung	Bedeutung	Norm
Rz (DIN)	Gemittelte Rautiefe	Mittelwert aus den Einzelrautiefen von fünf gleichen aufeinander folgenden Einzelmessstrecken im Rauheitsprofil	verbreitete Kenngröße	DIN EN ISO 4287
Rmax	Maximale Rautiefe	Größte Einzelrautiefe aus den fünf aufeinander folgenden Einzelrautiefen	verbreitete Kenngröße	DIN 4768:1990
Rp	Mittlere Glättungstiefe	Arithmetischer Mittelwert von fünf Spitzenhöhen entlang der Bezugsstrecke von fünf Grenzwellenlängen	vergleichbar mit Rz, jedoch werden nur die Spitzen betrachtet	DIN EN ISO 4287
Rv	Mittlere Riefentiefe	Mittlerer Abstand zwischen den fünf tiefsten Riefen und der mittleren Linie entlang der Bezugsstrecke von fünf Grenzflächen		DIN EN ISO 4287
Rt	Rautiefe	Abstand zwischen zwei parallelen Geraden, die das gefilterte Rauheitsprofil innerhalb der Bezugsstrecke kleinstmöglich einschließt	Kenngröße zeigt starke Abhängigkeit von der gewählten Filtergrenzwellenlänge	DIN EN ISO 4287
Rsk	Schiefe	Die Schiefe gibt die Symmetrie der Amplitudendichtekurve um die Profilmittelpunkte an	positive Werte kennzeichnen Profile mit hohem Profilspitzenanteil	DIN EN ISO 4287
Rku	Steilheit	Mit dieser Kenngröße wird die Steilheit der Amplitudendichtekurve bewertet	kleine Werte kennzeichnen Profile mit abgeflachten Riefen und Spitzen	DIN EN ISO 4287
Rk	Kernrautiefe	Kenngröße wird aus der Materialanteilskurve des Profils berechnet: Tiefe des Kernprofils	Kenngröße dient der funktionsgerechten Beurteilung von plattentypischen Oberflächen	DIN EN ISO 13565
Rpk	Reduzierte Spitzenhöhe	Kenngröße wird aus der Materialanteilskurve des Profils berechnet: Mittlere Höhe der über das Kernprofil herausragenden Spitzen	Kenngröße dient zur funktionsgerechten Beschreibung von hochbeanspruchten Funktionsoberflächen	DIN EN ISO 13565
Rvk	Reduzierte Riefentiefe	Kenngröße wird aus der Materialanteilskurve des Profils berechnet: Mittlere Tiefe der über das Kernprofil hinausragenden Riefen	Kenngröße dient zur funktionsgerechten Beschreibung von hochbeanspruchten Funktionsoberflächen	DIN EN ISO 13565

In dieser Arbeit wurden zusätzlich zu den in Tabelle 4 aufgeführten Rauheitsparametern die entsprechenden Welligkeitsparameter verwendet. Ein phasenkorrekter Filter nach DIN EN ISO 11562, ASME BE46.1 trennte die langwelligeren Anteile der Primärdaten, die der Welligkeit zugeordnet wurden, von den kurzwelligen Anteilen, die der Rauheit zugeordnet wurden. Die Grenzwellenlänge L_c diente zur Trennung von Rauheit und Welligkeit. Für die dreidimensionalen Messdaten betrug L_c ein Siebtel der Gesamtmessfläche, in diesem Fall $14,286 \mu\text{m}$. Für die Berechnung der Oberflächenparameter wurden fünf dieser sieben Teilflächen verwendet. Die zwei äußeren Teilflächen der Gesamtmessfläche wurden für die Berechnung der Oberflächenparameter als Vor- und Nachlaufflächen verworfen.

Auch zur Berechnung der Höhe der Mikrostrukturen auf den untersuchten Oberflächen wurde die Software Mark III verwendet. Aus den Bilddaten der untersuchten Oberflächen wurden zufällig ausgewählte zweidimensionale Profile extrahiert. In diesen zweidimensionalen Profilen wurden anschließend mit Hilfe des Punkt-zu-Punkt-Abstandes der vertikale Abstand zwischen der Spitze und der Basis der Strukturen auf der Oberfläche vermessen. Insgesamt wurden zwei Strukturen pro Messfeld gemessen.

Die Anzahl an Strukturen pro Messfeld wurde über eine optische Zählung der Strukturen im bearbeiteten Bild bestimmt.

3.2.2 Rasterelektronenmikroskopie

Zur Untersuchung der Oberflächenproben wurde das Rasterelektronenmikroskop LEO 1450 der Firma Carl Zeiss AG (Oberkochen) verwendet. Die Beschleunigungsspannung betrug 10 bis 25 kV, hauptsächlich aber 15 kV. Es wurde eine Wolframkathode verwendet.

Für der Untersuchung von Pflanzenoberflächen im Rasterelektronenmikroskop (REM) wurden frische Pflanzenblätter zunächst mit Hilfe der Glycerinsubstitution präpariert (ENSİKAT und BARTHLOTT, 1993), um der Bildung von Schrumpfungartefakten aufgrund von Austrocknung während der Betrachtung im REM vorzubeugen. Anschließend wurden die Proben auf Aluminium-Probenteller so befestigt, dass die Leitfähigkeit der Proben gewährleistet war.

Die Proben wurden im Sputter Balzer (Union SCD 040, Balzer-Pfeifer GmbH, Asslar) bei einer Stromstärke von 65 mA 30 Sekunden lang mit einer dünnen Schicht Gold bedampft. Die Schichtdicke betrug 35 nm.

3.2.3 Bestimmung von Kontakt- und Abrollwinkel

Die statischen Kontaktwinkel und die Abrollwinkel zur Messung des Benetzungsverhaltens von Oberflächen wurden mit dem Kontaktwinkelmessgerät OCA 30 (Dataphysics GmbH, Filderstadt) gemessen. Dazu wurden schmale Streifen der Proben auf dem Messtisch des Kontaktwinkelmessgerätes befestigt. Anschließend wurde ein 5 µl großer Wassertropfen mit Hilfe der Dosiereinrichtung auf die Oberfläche gegeben. Die Messungen des statischen Kontaktwinkels wurden anhand der „sessile drop“-Methode, die Abrollwinkel wurden durch die Kippung des gesamten Messsystems (maximal bis 90°) ermittelt. Alle Messungen erfolgten bei einer Raumtemperatur von ca. 22°C. Die statischen Kontaktwinkel und die Abrollwinkel wurden mit der Funktion „Young-Laplace-Fitting“ berechnet. Es wurden pro Probe 10 Einzelmessungen durchgeführt und das arithmetische Mittel und die Standardabweichung errechnet.

3.2.4 Erzeugung von Fehlstellen, Kontamination und Benebelung

Erzeugung von Fehlstellen

Die Fehlstellen in der hydrophobierten Kupferoberfläche wurden mit der Spitze einer feinen Nadel erzeugt. Mit der Spitze wurden die Oberflächenstrukturen entfernt. Die Fehlstellen wurden in Form eines Gitters in die Oberfläche eingebracht.

Die Fehlstellen in der TEGOTOP[®] 210-Beschichtung auf der Glasoberfläche wurden mit Hilfe eines weichen und breiten Gummis erzeugt.

Die Fehlstellen in den Lotus-Effect[®]-Musterglas-Oberflächen „White Frost“ wurden mit Armour Etch Glass Etching Cream (Armour Products, Hawthorne, USA) eingebracht. Dazu wurde eine 1 cm² große quadratische Fläche auf der Oberfläche mit der Etching Cream bedeckt und diese nach 2 Stunden abgewaschen.

Kontamination

Die Kontamination der Probenoberflächen erfolgte in einer Kontaminationskammer nach FÜRSTNER (2002). Jedoch wurden die Oberflächen mit dem fluoreszierenden Pulver Redwop™ (Lightning Powder Company, Inc.; Florida, USA) auf Lycopodium-Basis kontaminiert.

Dazu wurden die Proben zunächst am Boden einer Kontaminationskammer (32 x 22 cm) platziert. Anschließend wurde 0,3 g Redwop™ in eine Ladekammer gefüllt und mit 2 bar Druckluft in die Kammer verteilt. Eine Blende im 45°-Winkel vor der Öffnung der Ladekammer ermöglichte eine gleichmäßige Kontamination der Probenoberflächen.

Nach der Kontamination wurden die Proben für 15 min in der Kammer belassen, damit sich die verstäubten Redwop™-Partikel auf die Oberflächen absetzen konnten.

Abreinigung durch Benebelung und Beregnung

Die Benebelung der Probenoberflächen erfolgte, wie bei FÜRSTNER (2002) beschrieben, in einer Nebelkammer. Da in einigen Versuchen eine differenzierte Betrachtung der Selbstreinigungseffizienz wichtig war, wurde deshalb mit zerstäubtem Aqua dest. (Tropfendurchmesser von 8 bis 20 µm) abgereinigt. So kam es nicht zu einer kompletten Abwaschung aller Redwop™-Partikel. In den erzeugten Fehlstellen auf den Probenoberflächen konnten auch nach Abreinigung Redwop™-Partikel nachgewiesen werden.

Die Proben wurden in der Nebelkammer bei einer Neigung von 10° bis 45° für 5 Minuten benebelt (0,17 ml/ cm²). Anschließend verblieben die Proben für eine Stunde in der Benebelungskammer, bis der Nebel abgesunken ist. Danach wurden die Proben in einem Wärmeschrank bei 30 °C getrocknet.

Die Beregnung von Proben erfolgte mit dem Verfahren, beschrieben bei Ceraman (2007). Dazu wurden 850 ml Aqua dest. in ein Gefäß mit 24 Öffnungen gegeben. Der Durchmesser der Öffnungen betrug jeweils 0,9 mm. Das Wasser fiel aus einer Höhe von 15 cm auf die Probenoberflächen, die bei einer Neigung von 45° gelagert wurden. Anschließend wurden die Proben in einem Wärmeschrank bei 30 °C zur Trocknung gelagert.

3.2.5 Quantifizierung der Kontamination

Die Stärke der Kontamination der Proben-Oberflächen mit fluoreszierenden Redwop™-Partikeln wurde mit dem Puls-Amplituden modulierten Fluorometer (IMAGING-PAM M-Series, Heinz Walz GmbH, Effeltrich) gemessen.

Dazu wurde die Fluoreszenz der Redwop™-Partikel auf der kontaminierten Probenoberfläche mit gepulstem Licht angeregt. Diese Illuminationseinheit bestand aus einer Anordnung von blauen Luxeon LED's (450 nm) mit einer mittleren Anregungs-Intensität von $0,5 \mu\text{mol quanta m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR (maximale photosynthetisch aktive Strahlung) und einer maximalen aktinischen Lichtintensität von $1200 \mu\text{mol quanta m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR. Zusätzlich sind rote LED's (660 nm) und NIR LED's (780 nm) zur Messung der von der Probe absorbierten photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR-Wert) in der Einheit installiert. Vor dieser Illuminationseinheit ist eine zusätzliche Filterplatte geschaltet, um Messfehler aufgrund von Reflektionen auf der Probenoberfläche zu verhindern. Die Modulationsfrequenz betrug 8 Hz.

Die Grundfluoreszenz F_0 wurde mit Hilfe einer CCD-Kamera aufgezeichnet und mit dem Analyseprogramm ImagingWin (Heinz Walz GmbH, Effeltrich) berechnet und graphisch in Form eines Falsch-Farben-Bildes dargestellt. Es ließen sich bestimmte Bereiche der Aufnahme auswählen und die Fluoreszenz an dieser Stelle anhand eines Zahlenwertes messen.

3.2.6 Zusammenhang zwischen der Fluoreszenz und dem Kontaminationsgrad

Zu Beginn wurde eine Kontaminationsreihe angefertigt. Dazu wurden Deckgläser der Reihe nach zunehmend mit Redwop™-Partikeln bis zu 8 Mal kontaminiert (nach Methode 2.2.4). Anschließend wurde die Fluoreszenz der Redwop™-Partikel mit dem Puls-Amplituden modulierten Fluorometer (PAM) auf den einzelnen Deckgläsern gemessen (siehe Methode 2.2.5). Zum Vergleich wurde die Belegung mit Kontaminationspartikel auf denselben Deckgläsern im REM untersucht. Dazu wurden pro Deckglas 10 REM-Aufnahmen mit sehr hohem Kontrast aufgenommen, um Binärbilder zu erhalten. Anschließend wurde der Anteil an weißen Pixeln (Kontaminationspartikel) in den einzelnen Aufnahmen mit Hilfe des Bildbearbeitungsprogrammes Scion Image (Scion

Corporation, Maryland, USA) berechnet. Diese Prozentwerte (Anteil weiße Pixel zur Pixel-Gesamtzahl der REM-Aufnahme) wurden mit den Fluoreszenzwerten, die auf denselben Oberflächen gemessen wurden, verglichen.

3.2.7 Statistische Auswertung

Aufgrund der großen Datenmengen war zur Interpretation dieser Ergebnisse eine statistische Auswertung der Daten vonnöten.

Für diese statistische Auswertung der Daten wurde der explorative und konfirmatorische Ansatz gewählt (SACHS und HEDDERICH, 2006). Die Hypothesen wurden hauptsächlich mit Hilfe der Varianzanalyse geprüft. Diese dient der Untersuchung des funktionalen Zusammenhangs zwischen einem quantitativen Merkmal und im Allgemeinen mehrerer nominaler Merkmale, den sog. Faktoren (CLEFF, 2008). Die Varianzanalyse kann als fundamentale Methode zur Auswertung biologischer, insbesondere experimentell ermittelter Daten, angesehen werden (SOKAL und ROHLF, 1995). Vor der ANOVA (ANalysis Of VARIance) wurden die notwendigen Voraussetzungen der Varianzhomogenität (Homoskedastizität) und der Normalverteilung mit Hilfe des Levene-Tests und dem Kolmogoroff-Smirnoff-Test untersucht. Verletzungen dieser Voraussetzungen wurden mit der LOG- und der Quadratwurzeltransformationen versucht zu vermeiden.

Multiple Mittelwertvergleiche wurden mit dem Tuckey-HSD-Test durchgeführt. Dieser ermöglicht den paarweisen Vergleich der Gruppenmittelwerte einer Untersuchung (RASCH et al., 2006). Als ungeplanter Mittelwertvergleich ist dieser Test grundsätzlich nur für den balancierten Fall, d. h. gleiches n, geeignet (SOKAL und ROHLF, 1995). Doch aufgrund der automatischen Bildung des harmonischen Mittels durch das Statistikprogramm kann dieser Test dennoch verwendet werden.

Lag auch nach Datentransformation keine Normalverteilung und Homoskedastizität vor, wurde der nichtparametrische Kruskal-Wallis H-Test, verwendet. Es wurde geprüft, ob zwischen den mittleren Rängen von mehr als zwei unabhängigen Stichproben signifikante Unterschiede bestanden (DIEHL und STAUFENBIEL, 2002). Anschließend wurde ein Post-Hoc-Test, bei gleicher Gruppengröße der Nemenyi-Test, bei unterschiedlicher Gruppengröße der Dunn-Test,

durchgeführt. Dazu wurde ein für MSEXcel geschriebens Makro verwendet (Edwin Martens, Zentrum für Biostatistik, Universität Utrecht, Niederlande).

Die Abstufung der ermittelten Irrtumswahrscheinlichkeit p entsprach dem einheitlichen Sprachgebrauch.

Wurde der funktionale Zusammenhang zwischen einem quantitativen Merkmal und zweier nominaler Merkmale untersucht, wurde der T-Test für unabhängige Stichproben (T-Test nach Student) verwendet.

Die 36 pflanzlichen und 7 technischen Oberflächen wurden mit Hilfe der hierarchischen Clusteranalyse anhand der Variablen „Höhe der Oberflächenstrukturen“ und „Strukturanzahl pro Messfeld“ ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$), gemessen anhand der zweidimensionalen Profile, in Gruppen geordnet. Die Mitglieder der einzelnen Gruppen wiesen eine möglichst ähnliche Variablenausprägungen auf, die Mitglieder verschiedener Gruppen eine unähnliche Variablenausprägung (BÜHL und ZÖFEL, 2002). Dabei ist die Distanz zwischen zwei Gruppen jeweils der Durchschnitt aller Distanzen von jedem möglichen Paar aus beiden Gruppen („Linkage zwischen den Gruppen“). Bei dem hierarchischen Verfahren bildet zunächst jede Oberfläche eine eigene Gruppe. Anschließend werden die nächsten benachbarten Gruppen zusammengefasst, bis am Ende alle Oberflächen in zwei Gruppen vereinigt sind. Die optimale Anzahl der Gruppen zur Zusammenfassung der Oberflächen anhand ihrer Strukturmerkmale erfolgt mit Hilfe des Ähnlichkeitsmaßes des quadrierten Euklidischen Abstandes.

Zur Kontrolle der Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse wurden die „Strukturhöhe“- und „Strukturanzahl“-Messdaten zusätzlich einer Diskriminanzanalyse durchgeführt. Es sollte die Qualität der Daten-Gruppierung überprüft werden.

Die Auswertung der verhältnisskalierten Messwerte der Oberflächenparameter, die mit dem Weißlichtprofilometer gemessen wurden, erfolgte mit Hilfe der Rangkorrelationsberechnung nach Spearman. Dieser Test erfolgte zweiseitig, da die Richtung des Zusammenhangs unbekannt ist.

Es wurden einheitlich gebräuchliche Abstufungen zur Beschreibung der der Größe des Betrags des Korrelationskoeffizienten verwendet:

$\rho < 0,2$ „sehr geringe Korrelation“

$\rho < 0,5$ „geringe Korrelation“

$\rho < 0,7$	„mittlere Korrelation“
$\rho < 0,9$	„hohe Korrelation“
$\rho > 0,9$	„sehr hohe Korrelation“

Da die Berechnung des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman bei ordinalskalierten und nichtnormalverteilten Variablen verwendet werden sollte, wurden die Messwerte zunächst auf eine Normalverteilung mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests untersucht.

Die statistischen Auswertungen wurden mit dem Datenanalyseprogramm SPSS 15.0 für Windows (SPSS Inc., Chicago, USA) durchgeführt. Die Ergebnisse der Auswertung wurden mit Hilfe von SigmaPlot 10.0 (Systat Software Inc., San Jose, USA) graphisch dargestellt.

Zusätzlich wurde zur Analyse einer einseitigen, linearen Beziehung die lineare Regression mit Hilfe von Microsoft Excel 2003 genutzt.

4 ERGEBNISSE

In Kapitel 4.1 werden zunächst die Rasterelektronenmikroskopie und Weißlichtprofilometrie in ihrer Qualität als bildgebende Verfahren miteinander verglichen. Die Vermessung von Oberflächenstrukturen mit Hilfe des Weißlichtprofilometers (WP) wird in Kapitel 4.2 beschrieben. In Kapitel 4.3 werden diverse Oberflächenparameter auf ihre Eignung zur Beschreibung strukturierter Oberflächen und ihrer Benetzungseigenschaften untersucht. Außerdem wird in Kapitel 4.4 die Abhängigkeit zwischen der Höhe der Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser und der Mikrostrukturierung auf unterschiedlich strukturierte pflanzliche und technische Oberflächen berechnet. In Kapitel 4.5 werden die Standardisierung der Fehlstellen-Generierung und die Auswirkungen dieser Fehlstellen auf die Selbstreinigung technischer Oberflächen untersucht. Die Benetzung von unterschiedlichen Tensiden auf superhydrophoben Oberflächen wird in Kapitel 4.6 betrachtet. Kapitel 4.7 behandelt die Regeneration der Hydrophobie in Fehlstellen. Schließlich wird in Kapitel 4.8 die Regeneration der Superhydrophobie beschädigter technischer Oberflächen durch die Wiederherstellung der Strukturierung in den Fehlstellen untersucht.

4.1 Rasterelektronenmikroskopie und Weißlichtprofilometrie

Es wurden unterschiedlich strukturierte Oberflächen mittels der Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Weißlichtprofilometrie (WP) abgebildet und die Qualität und Aussagekraft beider bildgebender Verfahren miteinander verglichen. In Kapitel 4.1.1 werden unterschiedlich strukturierte pflanzliche Oberflächen untersucht. In Kapitel 4.1.2 werden technischen Oberflächen mit Hilfe der beiden Methoden dargestellt.

4.1.1 Pflanzliche Oberflächen

Die untersuchten pflanzlichen Oberflächen zeigten eine große Bandbreite an Oberflächenstrukturen, die aufgrund der hohen Tiefenschärfe des REM sehr gut zu erkennen sind (Abbildung 6 bis 11). Es werden die hierarchischen Ebenen der Skulpturierung auf diesen Oberflächen in den REM-Abbildungen deutlich dargestellt. Zu sehen sind die unterschiedlich ausgeprägten Wölbun-

gen der periklinalen Außenwände epidermaler Zellen und Kutikularfaltungen oder epikutikulare Wachskristalle auf diesen Zellen. Man erhält mit dem REM somit in erster Linie qualitative Daten zur untersuchten Oberfläche.

Auch mit dem WP lassen sich die Wölbungen der periklinalen Außenwände der Epidermiszellen abbilden. Kutikularfaltungen oder epikutikulare Wachskristalle sind in diesen Aufnahmen aber nicht zu erkennen (vergleiche Abbildungen 6 und 8).

Die nun folgende Einteilung der pflanzlichen Oberflächen in einzelne Gruppen bezieht sich auf die Ergebnisse, die in Kapitel 4.2.1 vorgestellt werden. Dabei werden Oberflächen mit möglichst ähnlichen Variablenausprägungen, in diesem Fall die Höhe und die Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche, in eine gemeinsame Gruppe zusammengefasst. Die untersuchten pflanzlichen Oberflächen ließen sich aufgrund ihrer Strukturunterschiede insgesamt in vier Gruppen unterteilen:

- Gruppe 1: Oberflächen mit sehr hohen Mikrostrukturen
- Gruppe 2: Oberflächen mit hohen Mikrostrukturen und höherer Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche im Vergleich zu den Oberflächen der Gruppe 1
- Gruppe 3: Oberflächen mit keinen oder niedrigen Mikrostrukturen
- Gruppe 4: Oberfläche mit hohen Mikrostrukturen (ähnlich der Oberflächen in Gruppe 2) und einer sehr hohen Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche

Gruppe 1 (sehr hohe Mikrostrukturen)

Sowohl die REM-Aufnahmen, als auch die WP-Diagramme zeigen deutlich, dass alle Pflanzenoberflächen der Gruppe 1 eine ausgeprägte Mikrostrukturierung, gebildet durch die Wölbung der periklinalen Epidermiszellen-Außenwände, aufweisen (Abbildung 6 bis 11). Die periklinalen Epidermiszellen-Außenwände der Oberflächen in Gruppe 1 entsprechen dem tabular-konvexen bis konvexen Zelltypen (BARTHLOTT und EHLER, 1977).

Die Blattunterseite von *Alocasia macrorrhiza* weist eine ausgeprägte Mikrostrukturierung auf. Dies ist sowohl in der REM-Aufnahme, als auch im WP-Diagramm deutlich zu erkennen (Abbildung 6 A und 6 B). Die periklinalen

Außenwände der Epidermiszellen sind tabular-konvex geformt mit einer kugeligen Zentralpapille. Nur in der REM-Aufnahme sind jedoch die köpfchenartige Form der Zentralpapillen und das auffällige Faltungsmuster der Kutikula auf den Papillen, das dem Zentralfeld-Typen (Angiospermen-Typen) entspricht, deutlich zu erkennen. Auch die zwei verschiedenen Ausbildungen dieser Kutikularfalten sind in Abbildung 6 A zu erkennen. So verlaufen Falten zur Mitte der Epidermiszelle in Richtung der Zentralpapille. Außerdem befinden sich in der Mitte der Epidermiszell-Oberfläche auf der Papille die Falten des Zentralfeldes. Die Falten dieses Bereiches sind nicht gerichtet. Diese Details sind aufgrund der geringeren Auflösung des WP im entsprechenden Diagramm nicht zu erkennen (Abbildung 6 B). Die gesamte Oberfläche ist von einem Wachsfilm bedeckt (WAGNER et al., 2003), der jedoch in beiden Abbildungen nicht sichtbar ist, da dieser Film glatt ist.

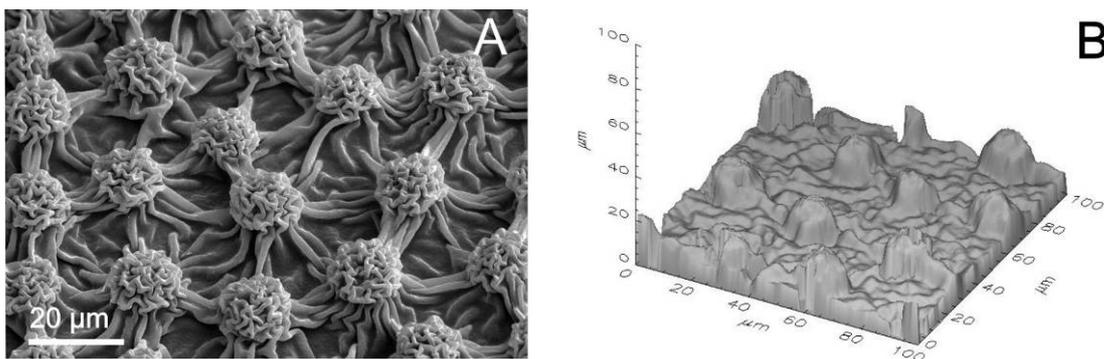


Abbildung 6: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Alocasia macrorrhiza* (Gruppe 1).

Die Blattober- und Blattunterseite von *Euphorbia myrsinites* weisen tabulare Epidermiszellen mit Zentralpapille auf (Abbildung 7 und 8). Die epikutikularen Wachskristalle, die beide Oberflächen bedecken, sind jedoch nur in den REM-Aufnahmen deutlich sichtbar (Abbildungen 7 A und 8 A). Auf beiden Blattseiten bilden diese Wachskristalle Schuppen aus, d. h. Kristalle, die mit der abgeflachten Seite aufstehen. Im WP-Diagramm ist bei beiden Oberflächen die tabular-konvexe Form der periklinalen Epidermiszellaußenwände mit Zentralpapille zu erkennen (Abbildung 7 B und 8 B). Die Wachsschuppen sind im WP-Diagramm nicht zu erkennen.

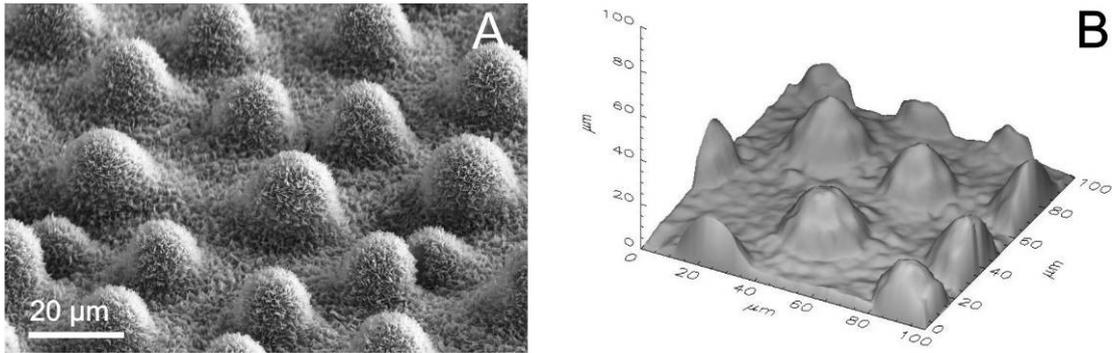


Abbildung 7: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Euphorbia myrsinites* (Gruppe 1).

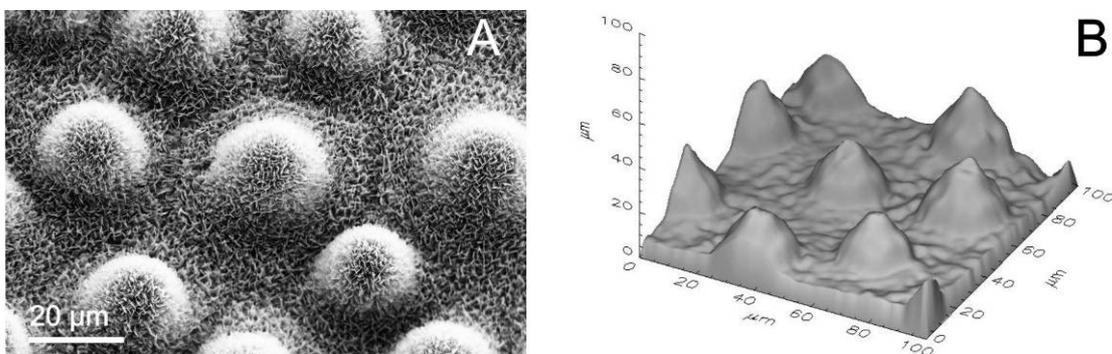


Abbildung 8: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Euphorbia myrsinites* (Gruppe 1).

Die Blattoberseite von *Oryza sativa* besitzt parallel angeordnete Papillen (Abbildung 9), die mit beiden Methoden dargestellt werden konnten. Im REM sind jedoch außerdem Stomata zu erkennen, die von Papillen umgeben werden (Abbildung 9 A). Die Blattoberseite ist mit epikutikularen Wachskristallen in Form von Schuppen bedeckt. Das WP-Diagramm dieser Oberfläche gibt die konvex bis halbkugelig geformten Epidermiszellen wieder (Abbildung 9 B).

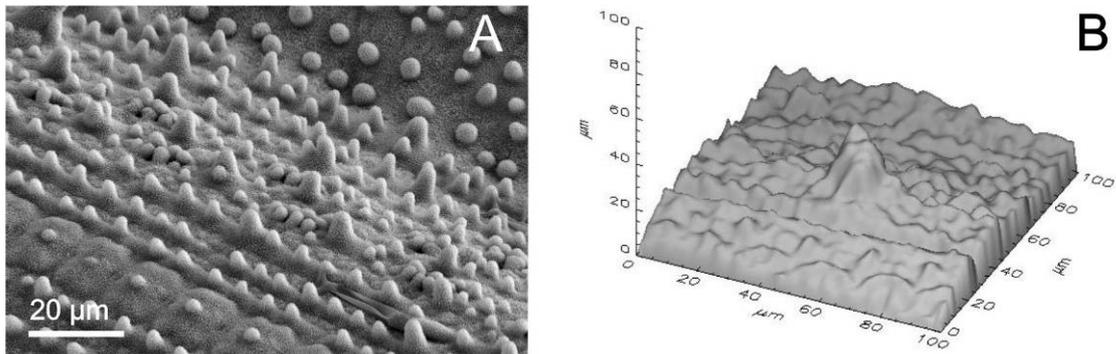


Abbildung 9: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Oryza sativa* (Gruppe 1).

Auf der Blattunterseite von *Oryza sativa* sind die Außenwände der Epidermiszellen konvex bis halbkugelig geformt. Dies ist in der REM-Aufnahme und im WP-Diagramm zu erkennen (Abbildung 10). Die periklinalen Außenwände dieser Epidermiszellen wölben sich zu Papillen in unterschiedlichen Größen. Weitere Einzelheiten sind nur in der REM-Aufnahme zu sehen: Zusätzlich sind im unteren Bereich der REM-Aufnahme einige Stomata zu erkennen (Abbildung 10 A). Diese sind, wie auf der Blattoberseite, von Papillen umgeben. Die Oberfläche ist mit epikutikularen Wachskristallen in Form von Schuppen bedeckt.

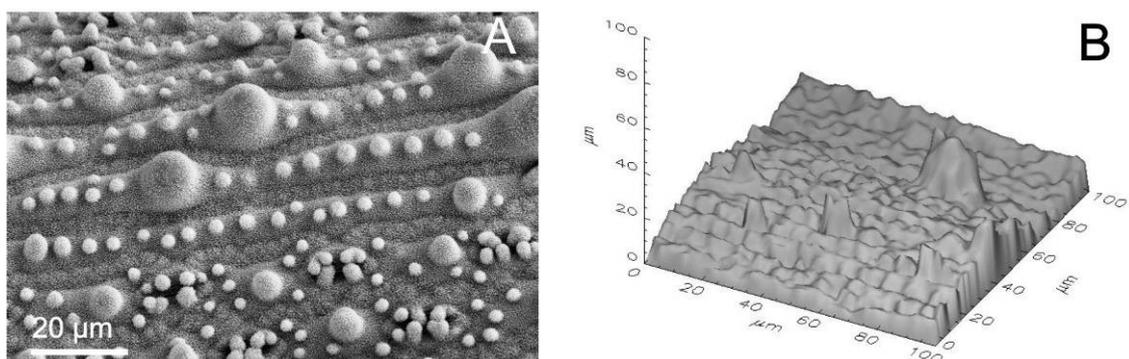


Abbildung 10: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Oryza sativa* (Gruppe 1).

Die epidermalen Zellen der Blattunterseite von *Xanthosoma robustum* sind konvex mit einer kugeligen Zentralpapille (Abbildung 11 A). Die Oberfläche der Blattunterseite ist mit epikutikularen Wachsen in Form von Schuppen bedeckt. Dies ist in der REM-Aufnahme zu erkennen. Mit dem WP lassen sich aufgrund der Reflexionen an den Kanten der Strukturen und der geringen Auflösung die

köpfchenartige Form der Papillen und die epikutikularen Wachskristalle nicht abbilden (Abbildung 11 B).

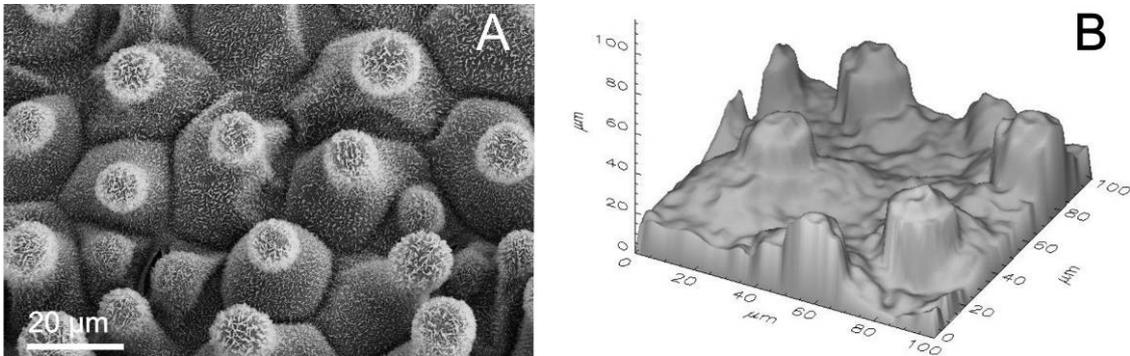


Abbildung 11: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Xanthosoma robustum* (Gruppe 1).

Gruppe 2 (hohe Mikrostrukturen, hohe Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche)

Da sich die nachfolgenden Oberflächen in den Variablen „Strukturhöhe“ und „Strukturanzahl pro Fläche“ von den oben beschriebenen Oberflächen der Gruppe 1 unterscheiden, werden sie in eine eigenständige Gruppe (Gruppe 2) eingeordnet (siehe Kapitel 4.2.1). Insgesamt weisen die Oberflächen in Gruppe 2 im Vergleich zu den Oberflächen der Gruppe 1 niedrigere Mikrostrukturen auf. Jedoch ist im Mittel eine größere Anzahl an Strukturen pro Fläche zu finden.

In den REM-Aufnahmen dieser pflanzlichen Oberflächen sind die verschiedenen Ebenen der Strukturierung, d. h. die Ausformung der periklinalen Außenwände der Epidermiszellen, die Kutikularfaltungen und die epikutikularen Wachskristalle deutlich zu erkennen (Abbildungen 12 bis 16).

Die Abbildungen 12 und 13 der Blattoberseite und -unterseite von *Colocasia esculenta* zeigen konvex geformte Epidermiszellen mit Zentralpapille. Diese Zentralpapille ist auf beiden untersuchten Blattseiten, wie in der REM-Aufnahmen zu erkennen, köpfchenförmig (Abbildung 12 A und 13 A). Auf der gesamten Oberfläche, aber besonders ausgeprägt auf den Papillen, sind epikutikulare Wachse in Form von Schuppen zu sehen, die ungeordnet netzartig die Oberfläche bedecken. In den WP-Diagrammen sind weder die köpf-

chenförmigen Papillenspitzen, noch die epikutikularen Wachse zu erkennen (Abbildung 12 B und 13 B).

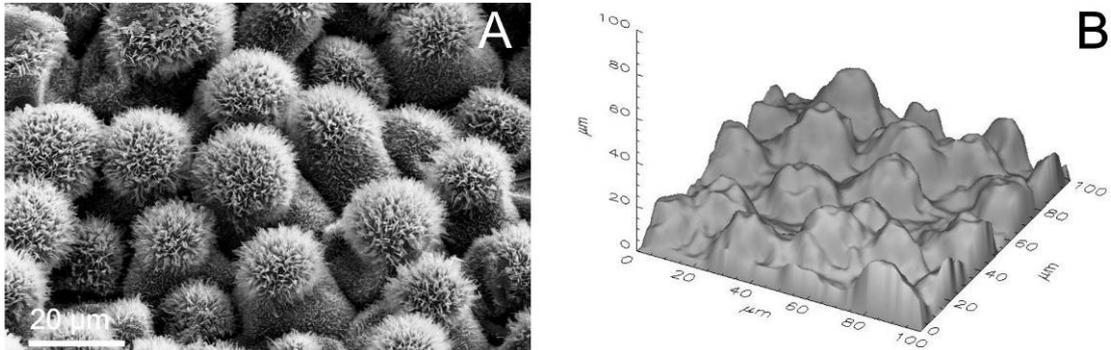


Abbildung 12: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Colocasia esculenta* (Gruppe 2).

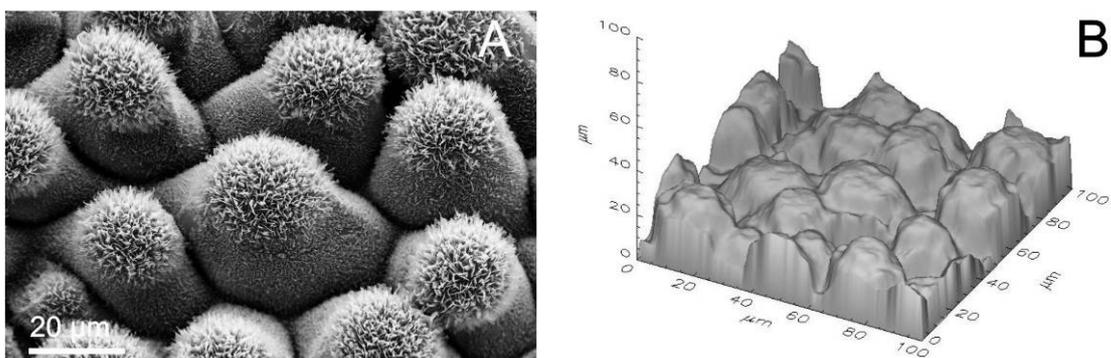


Abbildung 13: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Colocasia esculenta* (Gruppe 2).

Die Blattoberseiten und -unterseiten von *Euphorbia atropurpurea* weisen halbkugelige bis kuppelförmige Epidermiszellen auf (Abbildung 14 und 15). Bedeckt sind die Oberflächen mit epikutikularen Wachsstrukturen in Form von Schuppen (Abbildung 14 A und 15 A), die in den WP-Diagrammen nicht zu erkennen sind (Abbildung 14 B und 15 B).

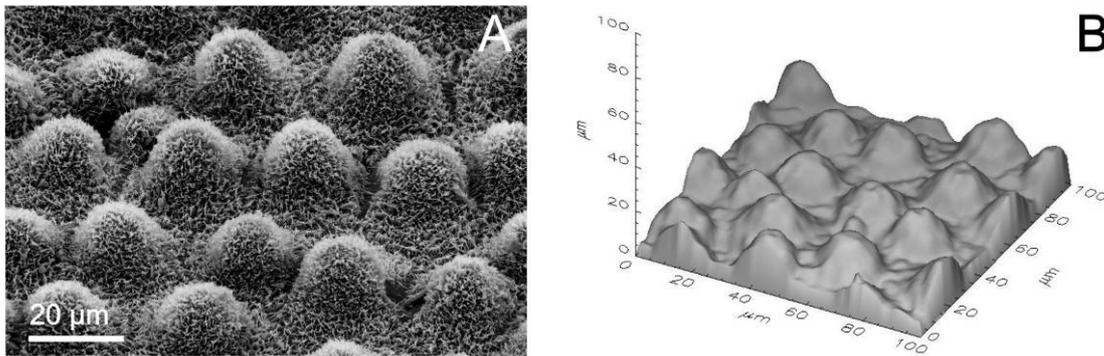


Abbildung 14: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Euphorbia atropurpurea* (Gruppe 2).

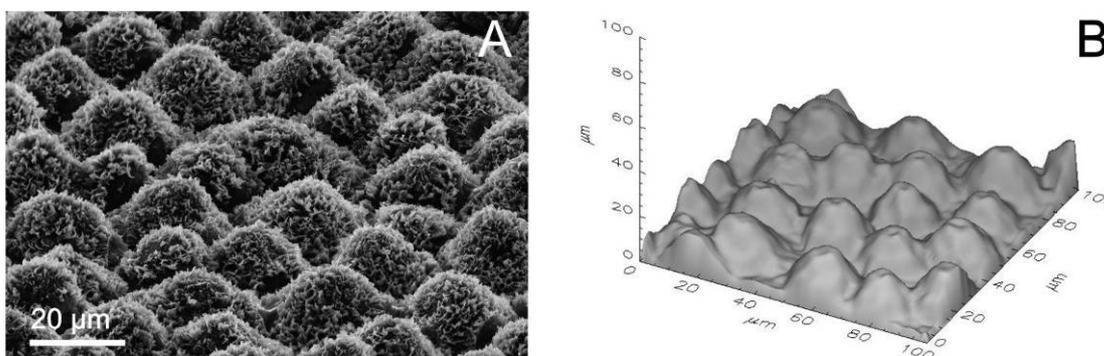


Abbildung 15: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Euphorbia atropurpurea* (Gruppe 2).

Die Blattunterseite von *Xanthosoma nigrum* (Abbildung 16) zeigt Ähnlichkeiten zur Blattunterseite von *Alocasia macrorrhiza* (Abbildung 6). Auch hier ist eine ausgeprägte Mikrostrukturierung in Form von papillös geformten periklinalen Epidermiszellaußenwänden zu erkennen. Diese sind köpfchenförmig. Epikutikulare Wachskristalle sind auf der REM- und der WP-Aufnahme nicht erkennbar. In der REM-Aufnahme ist zusätzlich zu der Mikrostrukturierung eine aufgelagerte Strukturierung, gebildet von Kutikularfaltungen des Zentralfeld-Typs, zu erkennen (Abbildung 16 A). Diese können in zwei Bereiche, dem Antiklinalfeld und dem Zentralfeld, unterteilt werden. Im Antiklinalfeld verlaufen die Kutikularfalten gerichtet zur Papille im rechten Winkel über die Antiklinalgrenzen. Auf der köpfchenförmigen Papille, dem Zentralfeld, verlaufen die Falten ungerichtet.

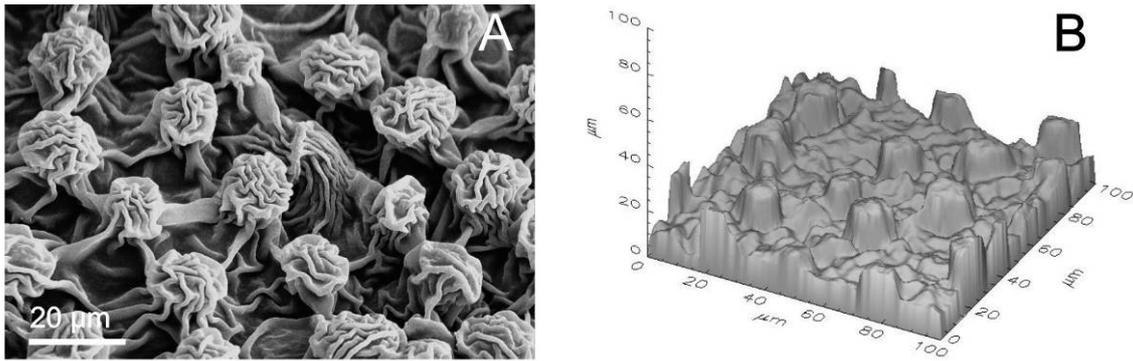


Abbildung 16: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Xanthosoma nigrum* (Gruppe 2).

Gruppe 3 (keine bis niedrige Mikrostrukturen)

Die pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 3 zeigen insgesamt im Vergleich zu den pflanzlichen Oberflächen der Gruppen 1 und 2 eine schwach ausgeprägte Mikrostrukturierung. Die periklinale Außenwände der Epidermiszellen sind tabular bis konvex ausgebildet (Abbildungen 17 bis 40). Papillen werden von den Epidermiszellen nicht gebildet. Die Pflanzenoberflächen dieser Gruppe weisen entweder unterschiedlich geformte epikutikuläre Wachskristalle oder eine glatte Wachsschicht auf.

Die Epidermiszellen der Blattoberseite von *Eschscholzia californica* sind elongiert-polygonal geformt, die Antiklinalgrenzen versenkt, wie in der REM-Aufnahme und dem WP-Diagramm zu erkennen (Abbildung 17). Die periklinale Außenwände sind konvex gewölbt. In der REM-Aufnahme ist zusätzlich zu sehen, dass die Epidermiszellen mit epikutikulären Wachsröhrchen bedeckt sind, die z. T. zu Gruppen aggregiert sind.

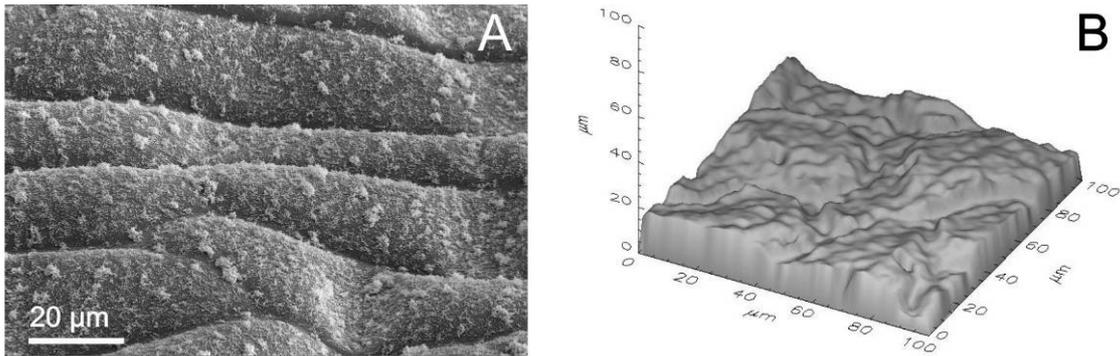


Abbildung 17: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Eschscholzia californica* (Gruppe 3).

Die Blattunterseite von *Eschscholzia californica* weist konvex geformte Epidermiszellen auf, was in der REM-Aufnahme und dem WP-Diagramm erkennbar ist (Abbildung 18). Diese sind mit epikutikularen Wachsröhrchen bedeckt, die wie auf der Blattoberseite teilweise in Gruppen aggregiert sind (Abbildung 18 A). Diese Wachsröhrchen lassen sich im WP-Diagramm nicht erkennen (Abbildung 18 B).

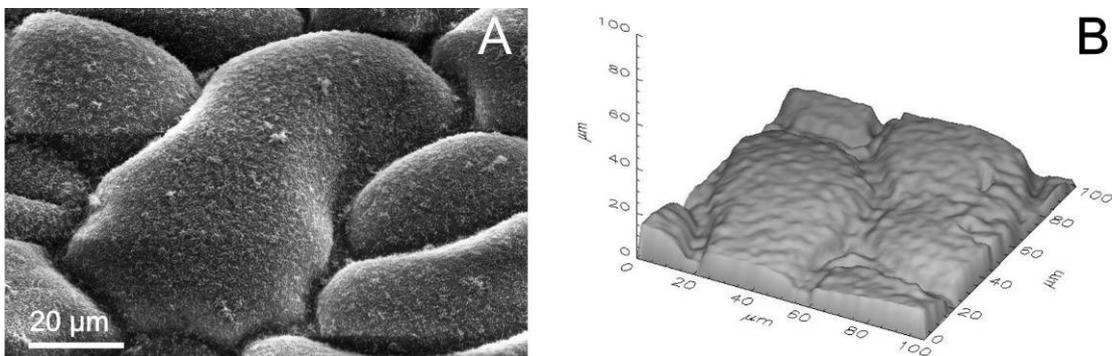


Abbildung 18: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Eschscholzia californica* (Gruppe 3).

Die REM-Aufnahme und das WP-Diagramm der Blattoberseite von *Alocasia robusta* zeigen leicht konvex geformte periklinale Epidermiszellaußenwände (Abbildung 19). Die Epidermiszellen haben eine elongiert-hexagonale Grundform. Die Oberfläche ist mit epikutikularen Wachskristallen überzogen, die in der Literatur als Schuppen beschrieben werden (Abbildung 19 A). Diese Wachskristalle sind in der REM-Aufnahme kaum, in der WP-Aufnahme nicht zu sehen (Abbildung 19 B).

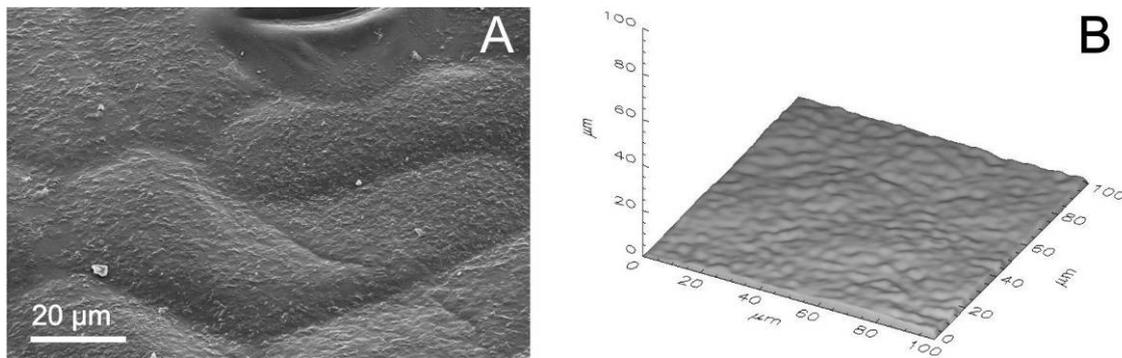


Abbildung 19: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Alocasia robusta* (Gruppe 3).

Die periklinale Außenwände der epidermalen Zellen auf der Blattunterseite von *Alocasia robusta* sind nur leicht konvex geformt (Abbildung 20). In der REM-Aufnahme sind die eng beieinander stehenden epikutikularen Wachsschuppen deutlich zu erkennen (Abbildung 20 A). Nur der Bereich um die Stomata ist frei von Wachsschuppen. Der Verlauf der Antiklinalwände ist nicht sichtbar. Sowohl die epikutikularen Wachsschuppen, als auch Stomata sind im WP-Diagramm nicht abgebildet worden (Abbildung 20 B).

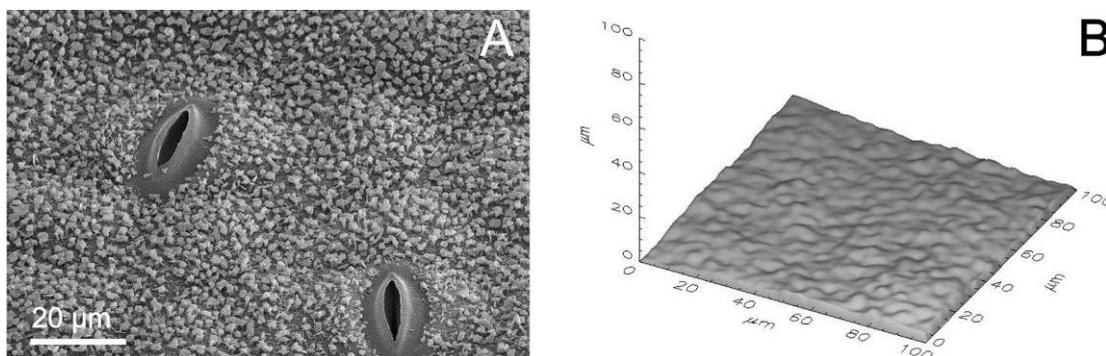


Abbildung 20: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Alocasia robusta* (Gruppe 3).

Die Blattoberseite von *Alocasia macrorrhiza* ist tabular geformt (Abbildung 21). Epikutikulare Wackskristallen, wie in der Literatur beschrieben, sind in der REM-Aufnahme nicht zu erkennen (Abbildung 21 A). Im WP-Diagramm ist der Verlauf der Antiklinalwände der Epidermiszellen auf der Blattoberseite deutlich zu sehen, da die Antiklinalgrenzen versenkt sind (Abbildung 21 B). Die Epidermiszellen sind isodiametrisch-hexagonal geformt, wie in beiden Aufnahmen zu erkennen.

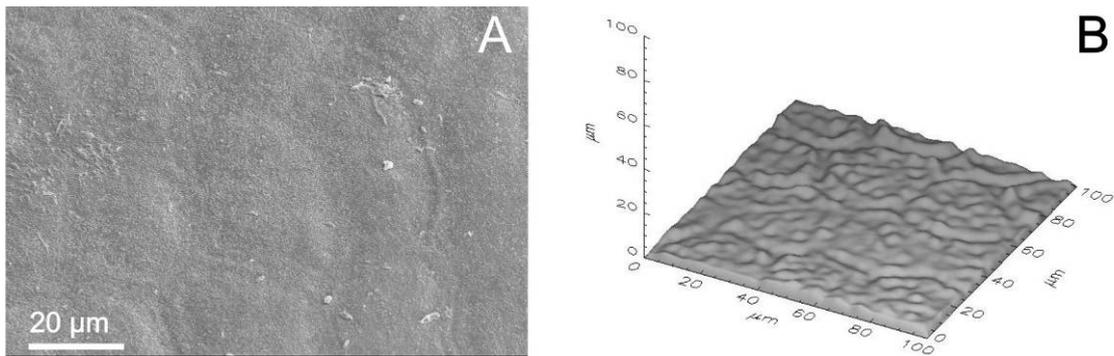


Abbildung 21: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Alocasia macrorrhiza* (Gruppe 3).

Die periklinalen Außenwände der Epidermiszellen auf der Blattoberseite von *Berberis vulgaris* sind konvex gewölbt (Abbildung 22). Die Oberfläche ist bedeckt mit epikutikularen Wachsröhrchen, wie ausschließlich in der REM-Aufnahme zu sehen ist. Die Antiklinalgrenzen sind weder in der REM-Aufnahme, noch im WP-Diagramm zu erkennen.

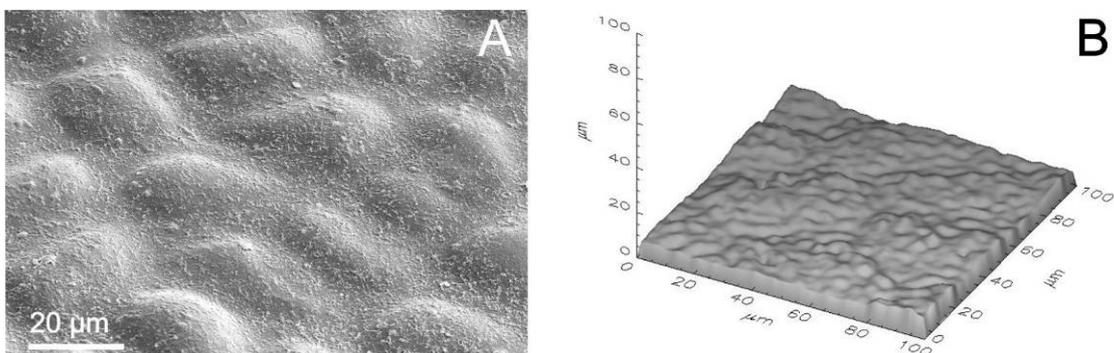


Abbildung 22: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Berberis vulgaris* (Gruppe 3).

Die Epidermiszellen der *Brassica oleracea*-Blattoberseite sind konvex gewölbt und dicht mit epikutikularen Wachskristallen in Form von Stäbchen bedeckt (Abbildung 23 A). Die Antiklinalgrenzen sind in der REM-Aufnahme nicht zu erkennen. Auch in der WP-Aufnahme sind diese nur undeutlich zu sehen (Abbildung 23 B).

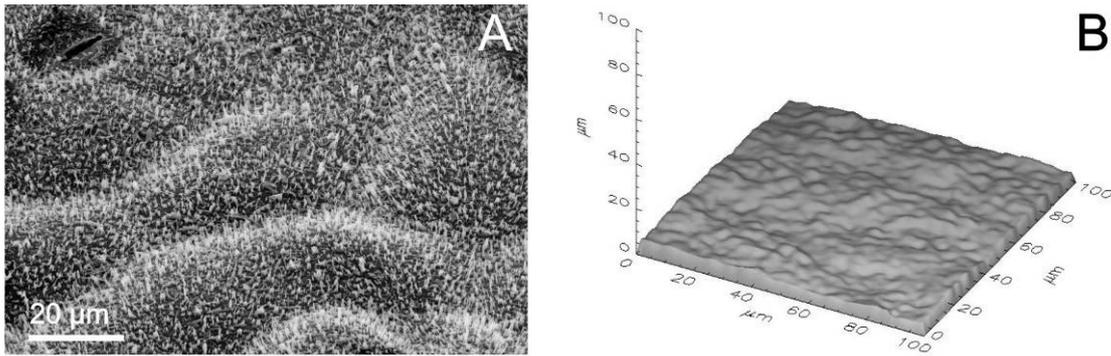


Abbildung 23: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Brassica oleracea* (Gruppe 3).

Die REM-Aufnahme und das WP-Diagramm der Blattoberseite von *Drimys winteri* zeigen eine nur schwach mikrostrukturierte Oberfläche (Abbildung 24). Wie in der REM-Aufnahme undeutlich zu erkennen, werden diese Strukturen von Kutikularfaltungen gebildet (Abbildung 24 A). Diese Faltungen werden durch die leicht erhabenen Antiklinalgrenzen gebildet, die aber sowohl in der REM-Aufnahme, als auch im WP-Diagramm nur schwer zu erkennen sind. Außerdem wird die Oberfläche der Blattoberseite von irregulär verteilten epikutikularen Wachskristallen in Form von Röhrenchen bedeckt (Abbildung 24 A). Diese Wachskristalle sind im WP-Diagramm nicht zu sehen (Abbildung 24 B).

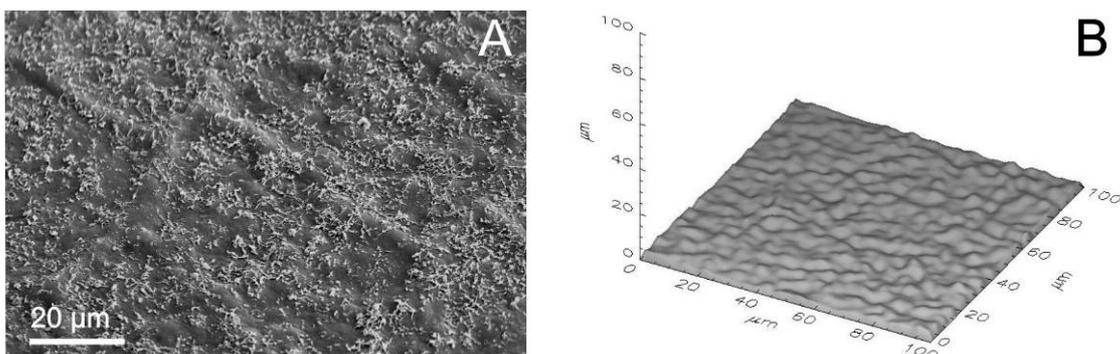


Abbildung 24: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Drimys winteri* (Gruppe 3).

Die Mikrostrukturierung der Blattoberseite von *Eucalyptus macrocarpa* ist in der REM-Aufnahme nur schwer zu erkennen, da die Oberfläche dicht mit langen epikutikularen Wachsröhrenchen bedeckt ist (Abbildung 25 A). Das WP-Diagramm zeigt jedoch deutlich die konvex kuppelartige Wölbung der Außenwände der epidermalen Zellen (Abbildung 25 B).

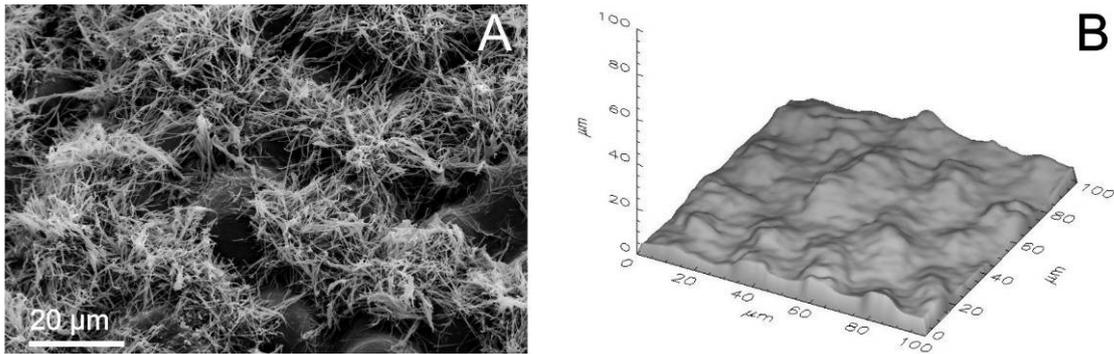


Abbildung 25: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Eucalyptus macrocarpa* (Gruppe 3).

Die epidermalen Zellen auf der Blattoberseite von *Glycine max* sind konvex gewölbt (Abbildung 26). Nur in der REM-Aufnahme ist der Verlauf der Antiklinalwände deutlich zu erkennen (Abbildung 26 A). Die Antiklinen der Epidermiszellen sind U-förmig miteinander verzahnt (U-unduliert). In der REM-Aufnahme sind außerdem vereinzelt epikutikulare Wachskristalle in Form von Schuppen dargestellt. Im WP-Diagramm sind diese Wachsschuppen nicht zu erkennen (Abbildung 26 B).

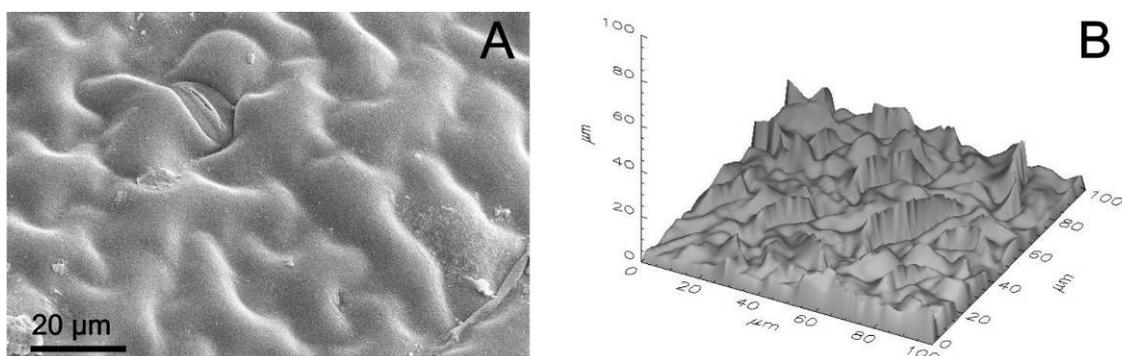


Abbildung 26: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Glycine max* (Gruppe 3).

Die Epidermiszellen auf der Blattoberseite von *Iris unguicularis* sind elongiert-tetragonal geformt (Abbildung 27). Die periklinalen Außenwände sind konvex ausgeformt, mit einzelnen papillösen Strukturen jeweils in der Mitte jeder Zelle. Die komplette Oberfläche ist mit parallel angeordneten epikutikularen Wachsschuppen bedeckt, die ausschließlich in der REM-Aufnahme zu erkennen sind (Abbildung 27 A). Im WP-Diagramm sind die Wachsschuppen nicht abgebildet (Abbildung 27 B). Die wachsschuppenfreien Spitzen der Papillen, wie in der

REM-Aufnahme zu sehen, sind ein Artefakt, der bei der Probenpräparation entstanden sein dürfte.

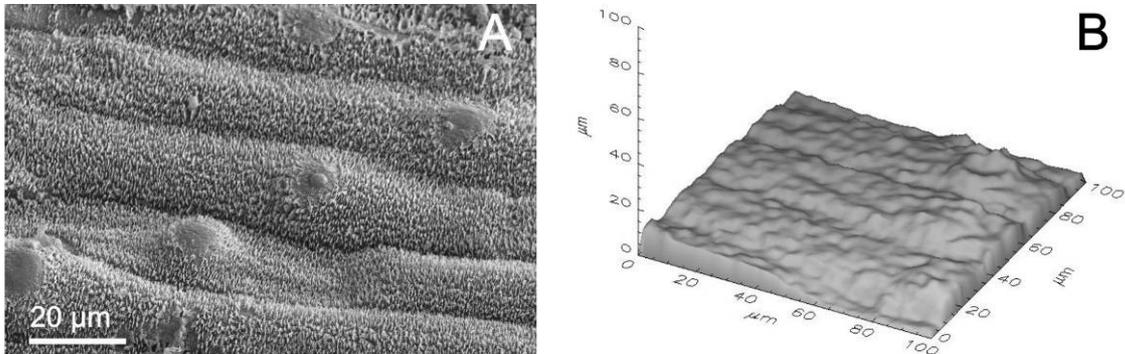


Abbildung 27: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Iris unguicularis* (Gruppe 3).

Die Epidermiszellen der Blattoberseite von *Iris germanica* sind leicht konvex geformt, wie in der REM- und in der WP-Aufnahme zu erkennen (Abbildung 28). Die Oberfläche ist dicht mit parallel angeordneten epikutikularen Wachsschuppen bedeckt. Diese sind nur in der REM-Aufnahme aufgelöst (Abbildung 28 A).

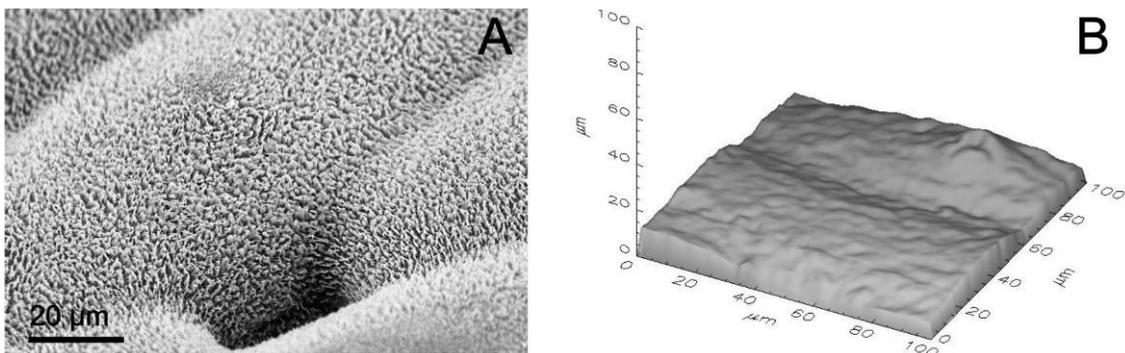


Abbildung 28: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Iris germanica* (Gruppe 3).

Die Mikrostrukturierung der Blattoberseite von *Liriodendron tulipifera* wird durch die konvex geformten periklinale Außenwände der Epidermiszellen gebildet (Abbildung 29). Die Antiklinen verlaufen S-unduliert. In der REM-Aufnahme ist zusätzlich zu sehen, dass die Blattoberfläche bedeckt ist mit epikutikularen Wachskristallen, die die Form von Stäbchen besitzen (Abbildung 29 A). Diese sind im WP-Diagramm nicht zu erkennen (Abbildung 29 B).

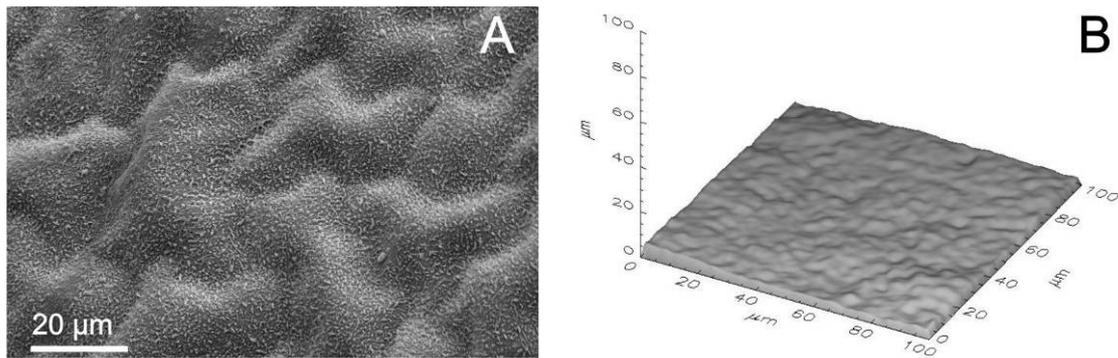


Abbildung 29: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Liriodendron tulipifera* (Gruppe 3).

Wie in der REM-Aufnahme und in der WP-Aufnahme zu erkennen, weist die Blattunterseite von *Liriodendron tulipifera* im Vergleich zur Blattoberseite eine höhere Mikrostrukturierung auf (Abbildung 30). Die periklinale Außenwände der epidermalen Zellen sind konvex mit Zentralpapille. Ausschließlich in der REM-Aufnahme sind die stäbchenförmigen epikutikularen Wachskristalle auf der Oberfläche zu sehen (Abbildung 30 A).

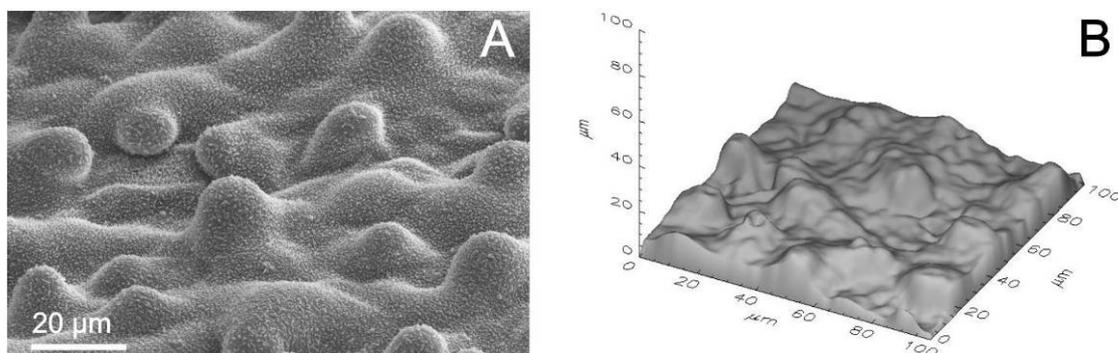


Abbildung 30: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Liriodendron tulipifera* (Gruppe 3).

Die Blattoberseite von *Thalictrum flavum* weist epidermale Zellen mit konvex geformten periklinale Außenwänden auf (Abbildung 31). Die Oberfläche ist, wie in der REM-Aufnahme zu erkennen, mit epikutikularen Wachskristallen bedeckt, die röhrenförmig und in Gruppen aggregiert sind (Abbildung 31 A). Diese Einzelheiten sind im WP-Diagramm nicht zu sehen (Abbildung 31 B).

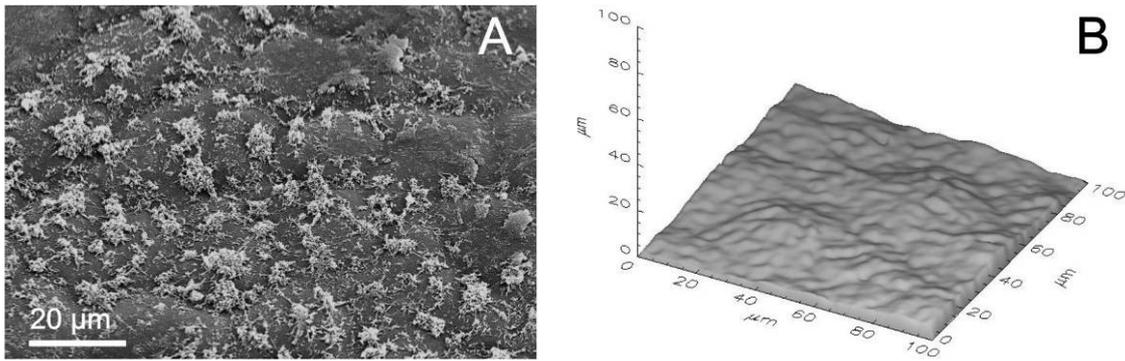


Abbildung 31: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Thalictrum flavum* (Gruppe 3).

Die Blattoberseite von *Tropaeolum majus* besitzt, wie ausschließlich in der REM-Aufnahme zu erkennen, konvex geformte Epidermiszellen, die eine elongiert-hexagonale Grundform aufweisen (Abbildung 32 A). Die Oberfläche ist mit Wachsröhrchen bedeckt, die zu Gruppen aggregiert sind. In der WP-Aufnahme ist die konvexe Wölbung der periklinalen Epidermiszell-Außenwände, nicht aber die elongiert-hexagonale Grundform der Epidermiszellen zu erkennen (Abbildung 32 B). Auf diesen konvexen Epidermiszellen sind in der WP-Aufnahme weitere Strukturen in Form von Faltungen zu erkennen, die von den epikutikularen Wachsstrukturen gebildet werden.

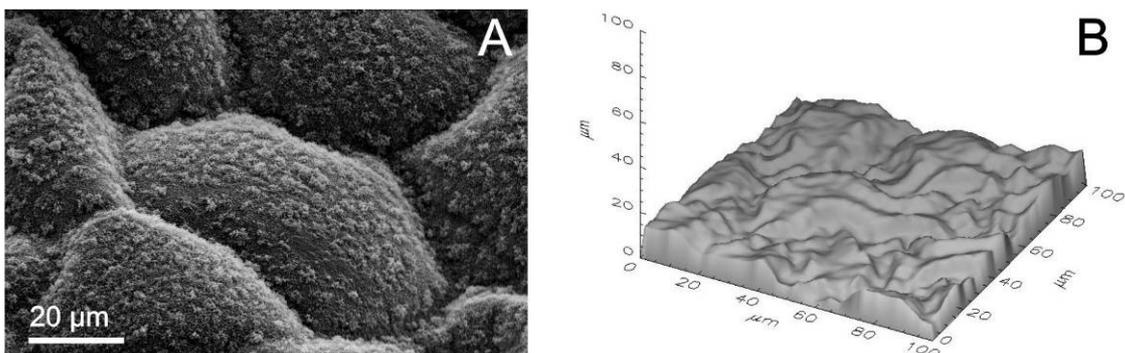


Abbildung 32: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Tropaeolum majus* (Gruppe 3).

Die REM- und die WP-Aufnahme zeigen, dass die Außenwände der Epidermiszellen auf der Blattoberseite von *Xanthosoma robustum* nur leicht konvex gewölbt sind (Abbildung 33). Diese sind jedoch dicht mit unregelmäßig netzartig orientierte epikutikularen Wachsstrukturen bedeckt, wie ausschließlich in der REM-Aufnahme zu erkennen (Abbildung 33 A).

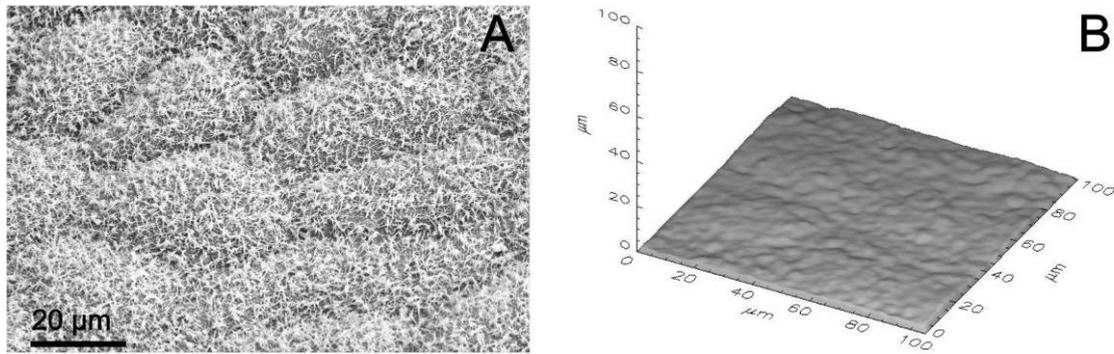


Abbildung 33: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Xanthosoma robustum* (Gruppe 3).

Auch die Blattoberseite von *Xanthosoma nigrum* weist ähnlich leicht konvex gewölbte Epidermiszellen auf, die eine hexagonale Grundform besitzen, wie in der REM- und der WP-Aufnahme abgebildet ist (Abbildung 34). In der REM-Aufnahme ist zusätzlich zu sehen, dass die Oberfläche mit Wachsschuppen überzogen ist (Abbildung 34 A). Diese Wachsschuppen besitzen jedoch im Vergleich zu den epikutikularen Wachsschuppen auf der Blattoberseite von *Xanthosoma robustum* eine geringere Größe, wie in den REM-Aufnahmen gut zu sehen ist (Abbildungen 33 A und 34 A). Im WP-Diagramm sind die epikutikularen Wachsschuppen nicht zu erkennen (Abbildung 34 B).

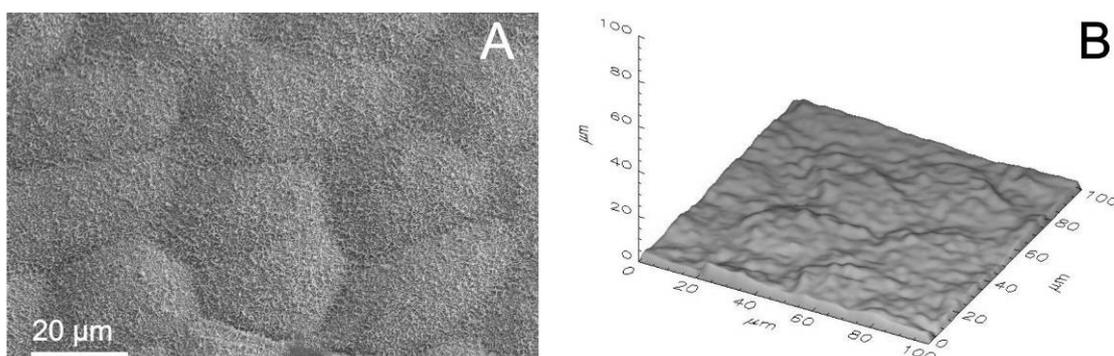


Abbildung 34: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Xanthosoma nigrum* (Gruppe 3).

Die Blattoberseite von *Triticum aestivum* ist komplex strukturiert, wie in beiden Aufnahmen erkennbar ist (Abbildung 35). Die periklinale Außenwände der isodiametrisch-tetragonalen Epidermiszellen sind konvex gewölbt. Es treten in regelmäßigem Abstand Papillen und längere stachelförmige Haarpapillen auf, wie in der REM-Aufnahme deutlich zu sehen (Abbildung 35 A). Auch die epiku-

tikularen Wachskristalle weisen unterschiedliche Formen auf. So treten neben netzartig angeordneten Wachsschuppen auch in Gruppen angeordnete fadenförmige Wachse auf. Im WP-Diagramm sind die stachelförmigen Haarpapillen und die unterschiedlich geformten epikutikularen Wachskristalle nicht zu erkennen (Abbildung 35 B).

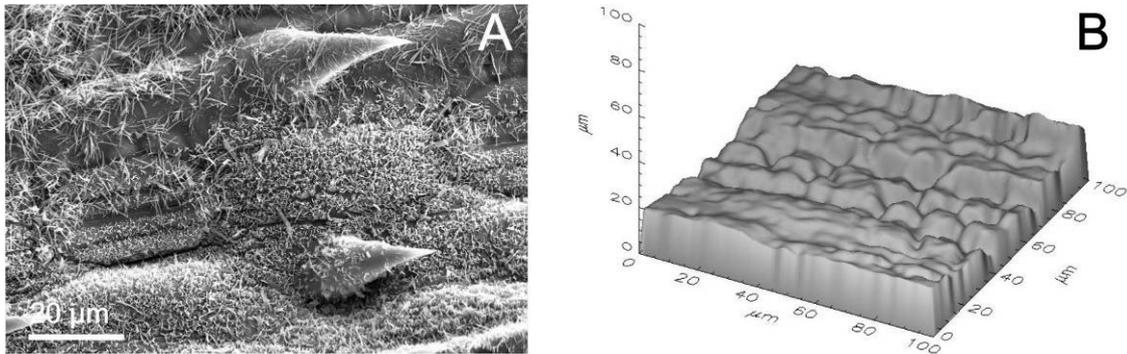


Abbildung 35: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Triticum aestivum* (Gruppe 3).

Die Epidermiszellen der Blattoberseite von *Clivia nobilis* weisen eine isodiametrisch-tetragonale Grundform auf, wie ausschließlich in der REM-Aufnahme zu sehen (Abbildung 36 A). Die periklinale Außenwände sind leicht konvex ausgeformt. Epikutuläre Wachskristalle auf der Oberfläche sind weder in der REM-Aufnahme, noch in der WP-Aufnahme erkennbar (Abbildung 36 A und B).

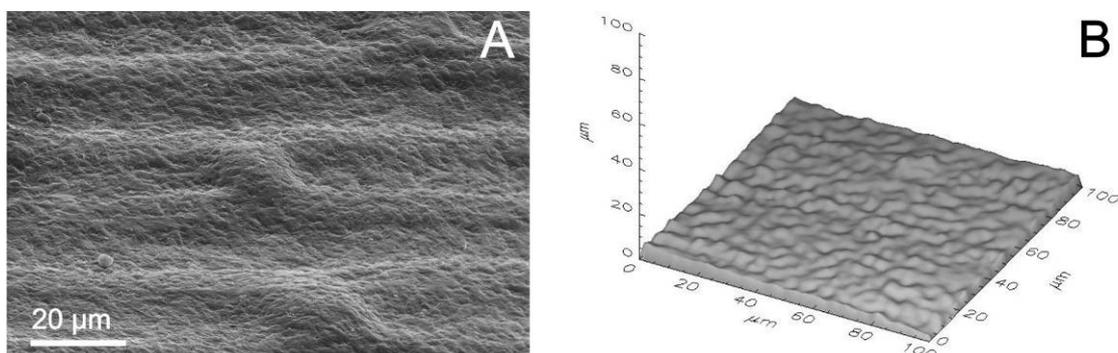


Abbildung 36: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Clivia nobilis* (Gruppe 3).

Die REM-Aufnahme der Blattoberseite von *Cocos nucifera* zeigt leicht konvex gewölbte periklinale Epidermiszellen-Außenwände (Abbildung 37 A). Außer-

dem ist eine glatte Wachskruste zu erkennen. Im WP-Diagramm ist die konvexe Wölbung der epidermalen Zellen kaum, die Wachskruste nicht zu erkennen (Abbildung 37 B).

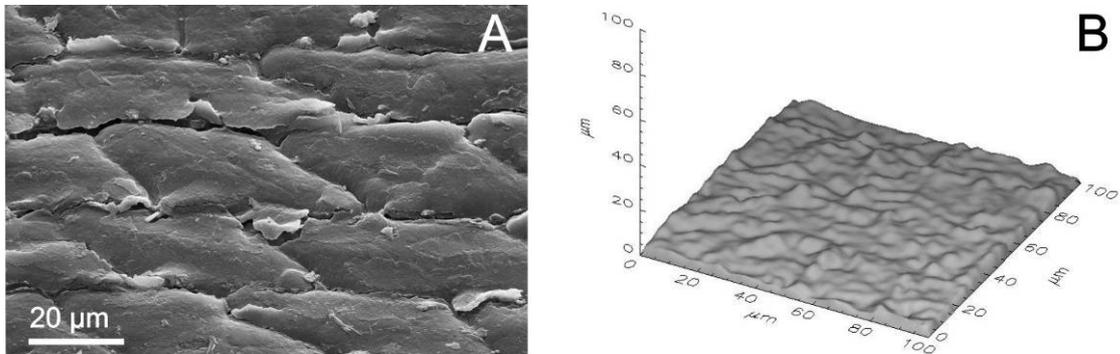


Abbildung 37: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Cocos nucifera* (Gruppe 3).

Die Blattoberseite von *Coffea arabica* weist eine schwache Mikrostrukturierung auf (Abbildung 38). Nur feinere Unregelmäßigkeiten sind in der REM-Aufnahme und dem WP-Diagramm zu sehen. Diese werden durch einen amorphen Wachsfilm bedingt, der die Oberfläche überzieht. Epikutuläre Wachskristalle sind in der REM-Aufnahme und im WP-Diagramm nicht sichtbar. Auch die Antiklinalgrenzen sind in beiden Aufnahmen kaum zu erkennen.

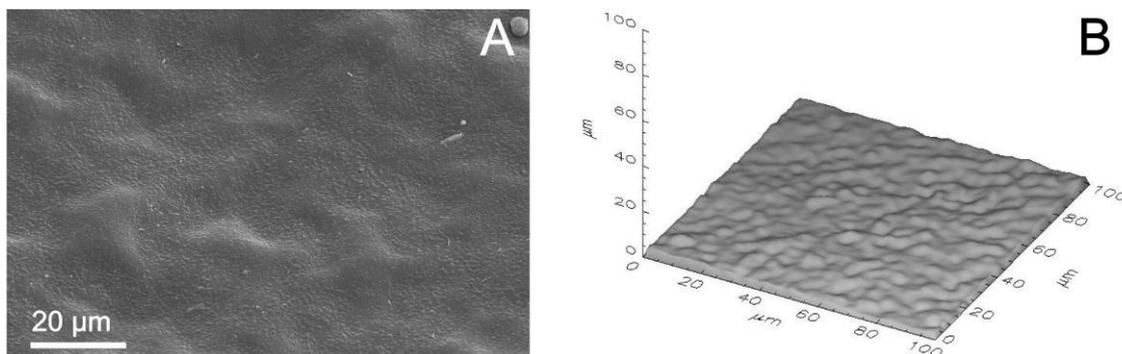


Abbildung 38: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Coffea arabica* (Gruppe 3).

In der REM-Aufnahme der Blattoberseite von *Ficus elastica* ist eine Wachsschicht mit granulären Einlagerungen zu erkennen (Abbildung 39 A). Diese ist in der WP-Aufnahme nicht zu sehen (Abbildung 39 B). Die Antiklinalgrenzen

auf den Blattoberseiten von *Coffea arabica* und *Ficus elastica* sind nur undeutlich ausgebildet.

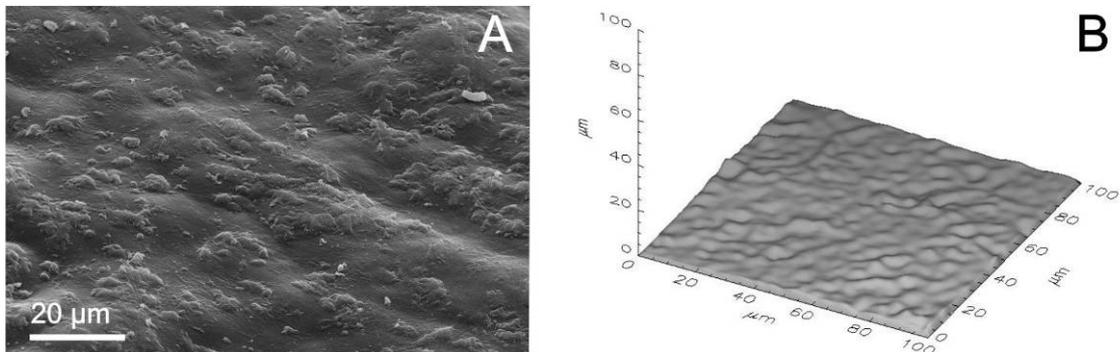


Abbildung 39: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Ficus elastica* (Gruppe 3).

In der REM-Aufnahme und dem WP-Diagramm der Blattoberseite von *Hedera helix* sind epikutikulare Wachskristallen nicht zu erkennen (Abbildung 40). Nur in der REM-Aufnahme sind aber deutlich Kutikularfaltungen auf den Epidermiszellen zu sehen (Abbildung 40 A). In der WP-Aufnahme sind diese Kutikularfaltungen nicht klar zu erkennen (Abbildung 40 B).

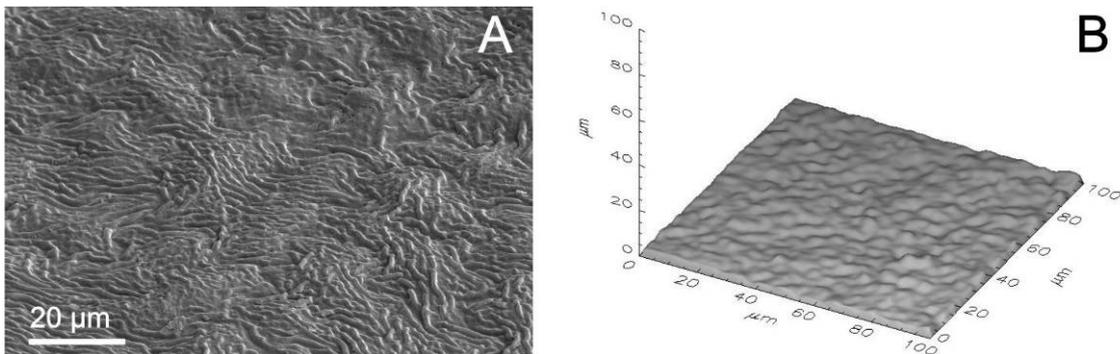


Abbildung 40: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Hedera helix* (Gruppe 3).

Gruppe 4 (hohe Mikrostrukturen, sehr hohe Anzahl an Mikrostrukturen Pro Fläche)

Die Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* bildet aufgrund ihrer Oberflächenstrukturmerkmale eine eigenständige Gruppe 4 (Abbildung 41). Die Gruppe 4 umfasst nur diese Oberfläche.

Sowol in der REM-Aufnahme, als auch im dreidimensionalen WP-Diagramm sind die konvex geformten periklinalen Außenwände der Epidermiszellen mit Zentralpapille deutlich zu erkennen (Abbildung 41 A und B). In der REM-Aufnahme sind zusätzlich die epikutikularen Wachsröhrchen zu sehen, die die Oberfläche bedecken (Abbildung 41 A). Diese Wachsröhrchen sind zu Gruppen aggregiert. Diese Details sind im WP-Diagramm nicht zu erkennen (Abbildung 41 B).

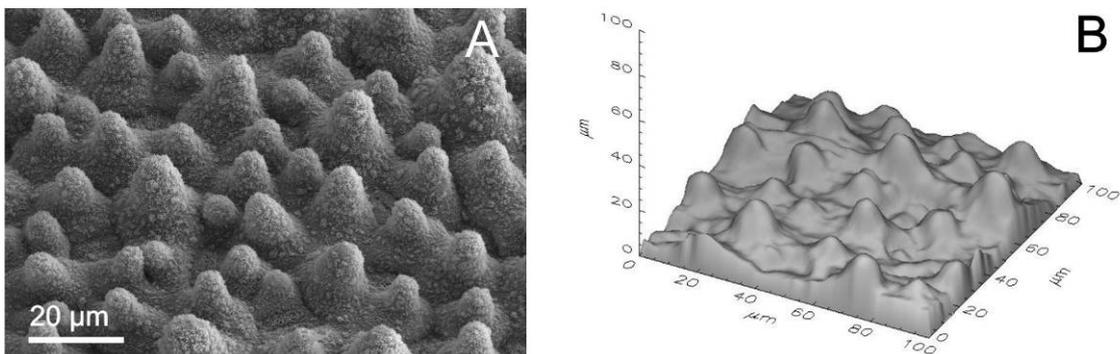


Abbildung 41: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* (Gruppe 4).

4.1.2 Technische Oberflächen

Die untersuchten technischen Oberflächen waren mit Ausnahme der Referenz-Glasoberfläche strukturiert (Abbildung 42 bis 48). Einige dieser Oberflächen wiesen eine Mikrostrukturierung auf (Abbildung 43), andere waren ausschließlich mit Nanostrukturen bedeckt (Abbildung 45).

Die Einteilung der untersuchten technischen Oberflächen in Gruppen folgt den Ergebnissen, die in Kapitel 4.2.2 vorgestellt werden. Dabei werden Oberflächen mit möglichst ähnlichen Variablenausprägungen in eine gemeinsame Gruppe zusammengefasst. Die untersuchten technischen Oberflächen wurden aufgrund ihrer Strukturunterschiede in 3 Gruppen unterteilt:

- Gruppe 1: Oberflächen ohne Mikrostrukturen bis hohen Mikrostrukturen, niedrige Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche.
- Gruppe 2: Oberflächen mit hohen Mikrostrukturen und hoher Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche.
- Gruppe 3: Oberfläche mit sehr hohen Mikrostrukturen.

Gruppe 1 (keine bis hohe Mikrostrukturen, niedrige Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche)

In der REM-Aufnahme und der WP-Aufnahme ist zu erkennen, dass die Muster-Kunststoffoberfläche mit Lotus-Effect[®] Mikrostrukturen aufweist, die jedoch die Oberfläche unregelmäßig bedecken (Abbildung 42). In der REM-Aufnahme sind zusätzlich Strukturen im Nanometerbereich zu sehen, die wiederum diese Mikrostrukturen bedecken (Abbildung 42 A).

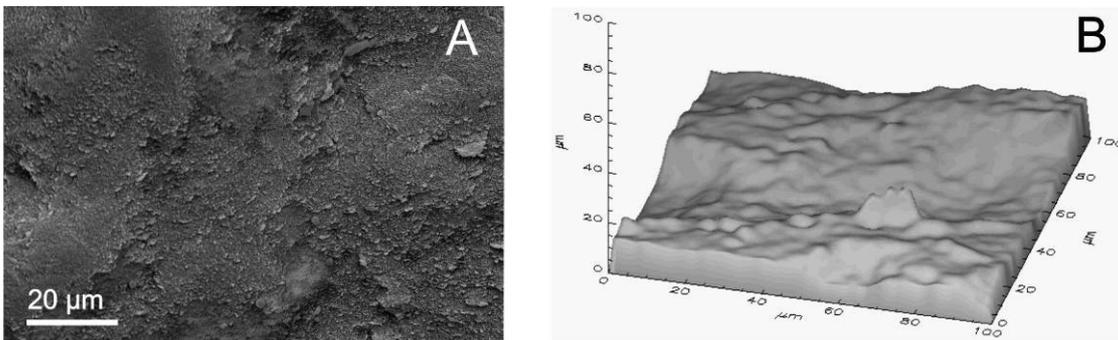


Abbildung 42: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der Muster-Kunststoffoberfläche mit Lotus-Effect[®] (Kunststoffinstitut Lüdenscheid, Gruppe 1).

Die Muster-Glasoberfläche „White Frost“ mit Lotus-Effect[®] ist ungleichmäßig und grob strukturiert, wie in beiden Aufnahmen erkennbar (Abbildung 43). Nur in der REM-Aufnahme ist sichtbar, dass diese groben Strukturen wiederum unvollständig mit einer Nanostruktur (Fluoroalkylsilanen) überzogen sind (Abbildung 43 A).

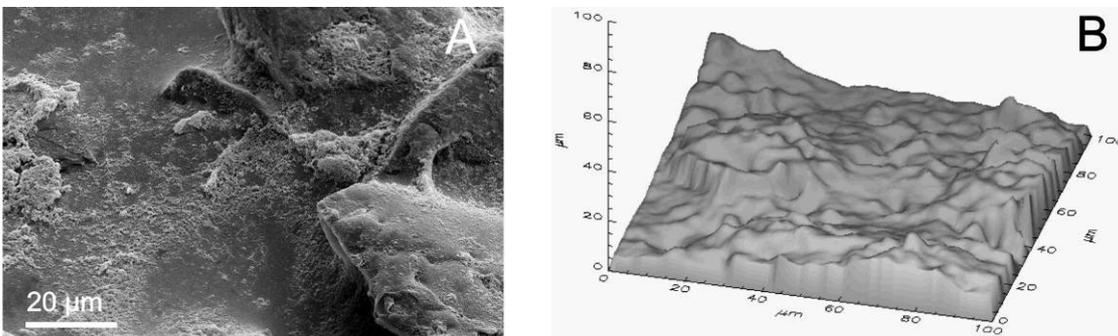


Abbildung 43: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der Muster-Glasoberfläche „White Frost“ mit Lotus-Effect[®] (Ferro GmbH, Gruppe 1).

Die Oberfläche des Lotusan[®]-Fassadenanstrichs, in diesem Fall auf einer Styropor-Oberfläche aufgetragen, ist unregelmäßig strukturiert und zusätzlich von einer feineren Strukturierung bedeckt, wie in der REM-Aufnahme erkennbar (Abbildung 44 A). In dem WP-Diagramm dieser Oberfläche lassen sich Strukturen erkennen, die den konvexen Wölbungen der periklinalen Außenwände der Epidermiszellen von niedrig strukturierten pflanzlichen Oberflächen aus der Gruppe 3 sehr ähnlich sind (Abbildung 44 B).

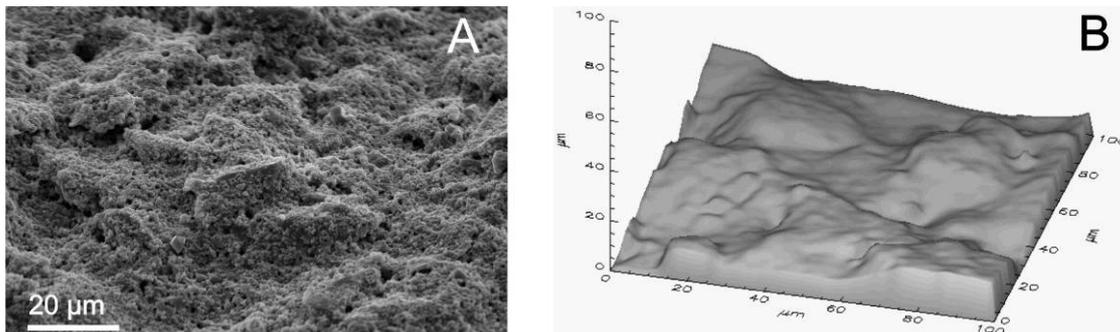


Abbildung 44: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der Lotusan[®]-Oberfläche (Sto AG, Gruppe 1).

In der REM-Aufnahme der TEGOTOP[®] 210-Oberfläche ist ausschließlich eine gleichmäßige Nanostrukturierung erkennbar (Abbildung 45 A). Das Vorhandensein von Mikrostrukturen wird vom darunter liegenden Trägermaterial bestimmt, auf dem TEGOTOP[®] 210 appliziert wird. In diesem Fall ist in der REM-Aufnahme keine Mikrostrukturierung zu sehen, da TEGOTOP[®] 210 auf Glas aufgetragen wurde (Abbildung 45 A). Im WP-Diagramm sind jedoch einige Unebenheiten im Mikrometerbereich zu erkennen, die durch eine Agglomeration von Partikeln des TEGOTOP[®] 210-Aerosols entstanden sind (Abbildung 45 B).

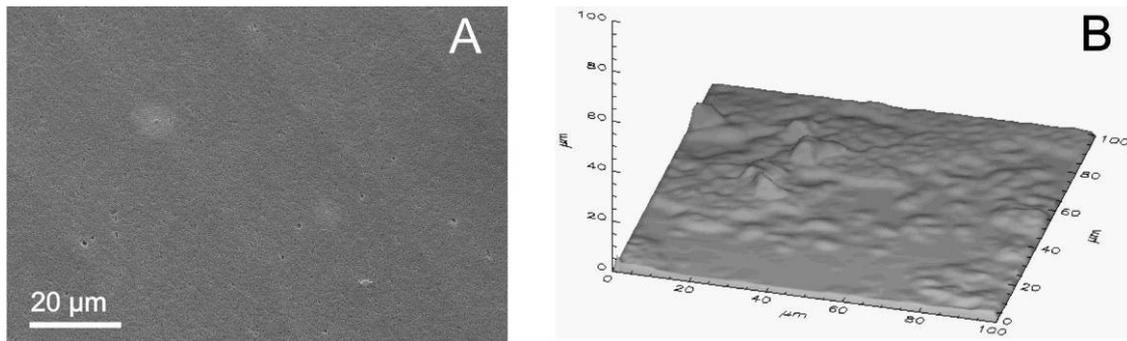


Abbildung 45: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der TEGOTOP® 210-Oberfläche (Evonik Industries AG, Gruppe 1).

Die Glasoberfläche zeigt in beiden Aufnahmen keine Strukturierung (Abbildung 46). In der REM-Aufnahme sind jedoch einzelne Partikel zu erkennen, bei denen es sich Verunreinigungen handeln dürfte (Abbildung 46 A).

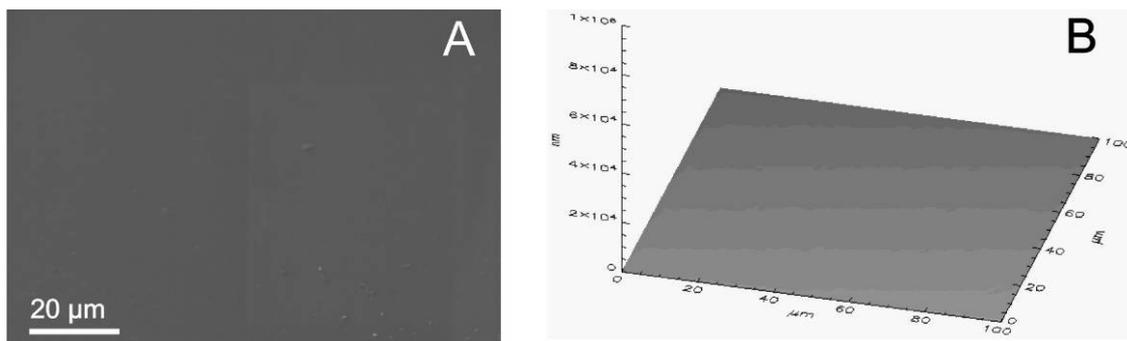


Abbildung 46: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der unbehandelten Glasoberfläche (Kontrolle, Gruppe 1).

Gruppe 2 (hohe Mikrostrukturen, hohe Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche)

Die galvanisch hergestellte und nachträglich hydrophobierte Kupferoberfläche besitzt ungleichmäßig angeordnete Mikrostrukturen, die aus unterschiedlich großen globulären Einheiten aufgebaut sind und wiederum mit Kupfermonoxid-Nadeln bedeckt sind, wie in der REM-Aufnahme deutlich zu erkennen (Abbildung 47 A). Außer der Mikrostrukturierung sind diese Details im WP-Diagramm nicht zu sehen (Abbildung 47 B).

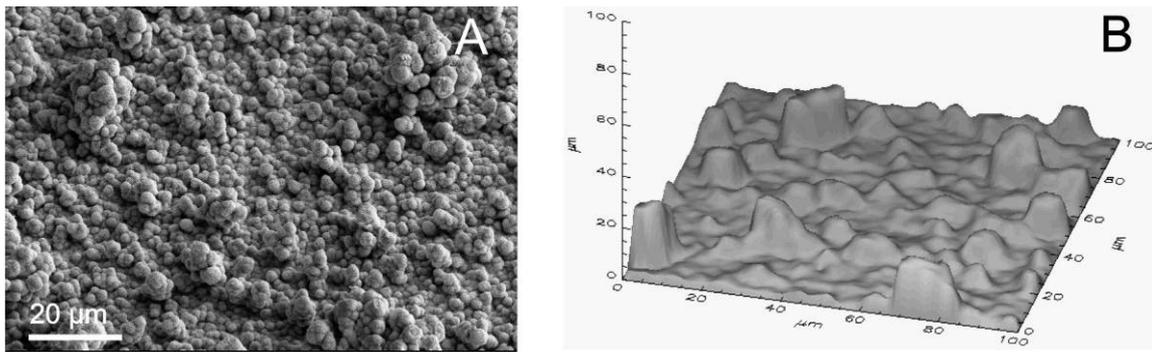


Abbildung 47: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der hydrophobierten Kupferoberfläche (Bolta-Werke, Gruppe 2).

Gruppe 3 (sehr hohe Mikrostrukturen)

In der REM-Aufnahme erkennt man deutlich den gerichteten Verlauf des Faserverbundes auf der Muster-Textiloberfläche mit Lotus-Effect[®], der quer zur Laufrichtung der Fasern die Mikrostrukturierung bildet (Abbildung 48 A). Die einzelnen Fasern sind zusätzlich von einer feinen Strukturierung bedeckt. Auch im WP-Diagramm ist der Verlauf von Faserverbänden zu erkennen (Abbildung 48 B). Auch werden in dieser Aufnahme die Dimensionen der Strukturen auf dem Textil von durchschnittlich 30 µm deutlich.

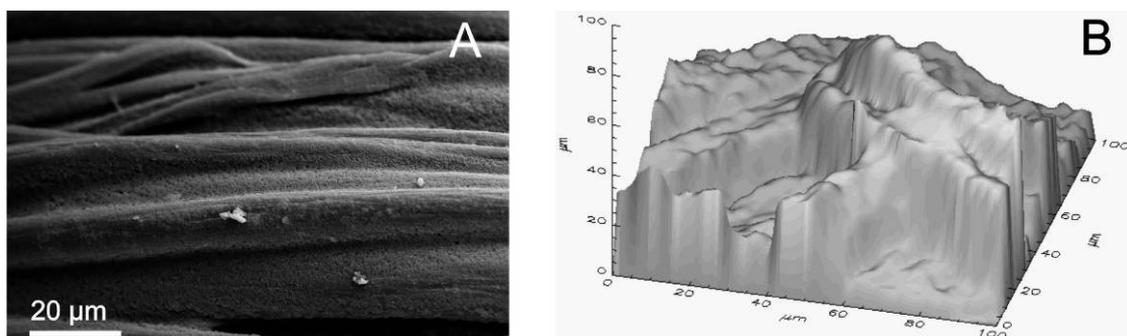


Abbildung 48: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der Muster-Textiloberfläche mit Lotus-Effect[®] (ITV Denkendorf, Gruppe 3).

4.2 Weißlichtprofilometrie zur Vermessung der Oberflächenstrukturen

Neben der bildlichen Darstellung von Oberflächen in Form von dreidimensionalen Diagrammen lässt sich das WP zusätzlich zur quantitativen Vermessung

von Strukturmerkmalen und zur Charakterisierung von Oberflächen anhand von verschiedenen Oberflächenparametern verwenden (siehe Kapitel 4.3). Zunächst werden in Kapitel 4.2.1 die Ergebnisse der Vermessung von Mikrostrukturen auf pflanzlichen Oberflächen anhand der mit dem WP erzeugten Bilddaten dargestellt und miteinander verglichen. In Kapitel 4.2.2 werden schließlich die WP-Vermessungsergebnisse der Mikrostrukturen auf technischen Oberflächen dargestellt. Die Einteilung der pflanzlichen und technischen Oberflächen in Gruppen erfolgte anhand der Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse.

4.2.1 Pflanzliche Oberflächen

Die hierarchische Clusteranalyse der untersuchten pflanzlichen Oberflächen anhand der Strukturhöhe und -anzahl pro Messfeld (gemessen mit Hilfe der Bilddaten des WP) ergab, dass die Einteilung der 36 pflanzlichen Oberflächen anhand ihrer Strukturmerkmale in 4 homogene Gruppen die optimale Zusammenfassung ist:

- Gruppe 1: Oberflächen mit sehr hohen Mikrostrukturen.
- Gruppe 2: Oberflächen mit hohen Mikrostrukturen und höherer Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche im Vergleich zu den Oberflächen der Gruppe 1.
- Gruppe 3: Oberflächen mit keinen bis niedrigen Mikrostrukturen.
- Gruppe 4: Oberfläche mit hohen Mikrostrukturen (ähnlich der Oberflächen in Gruppe 2) und einer sehr hohen Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche.

Gruppe 1 (sehr hohe Mikrostrukturen)

Die pflanzlichen Oberflächen der Gruppen 1 weisen in ihrer Gesamtheit hohe Mikrostrukturen auf. So betrug die gemessene Höhe der Mikrostrukturen in Gruppe 1 im Mittel 21 μm (Abbildung 50; Tabelle A1). Die Höhe dieser Strukturen variierte stark in dieser Gruppe. So wurden auf der Blattunterseite von *Xanthosoma robustum* die höchsten Strukturen mit durchschnittlich 29,16 μm gemessen. Die niedrigsten Mikrostrukturen der Gruppe 1 wurden mit 14,54 μm auf der Blattunterseite von *Oryza sativa* gemessen.

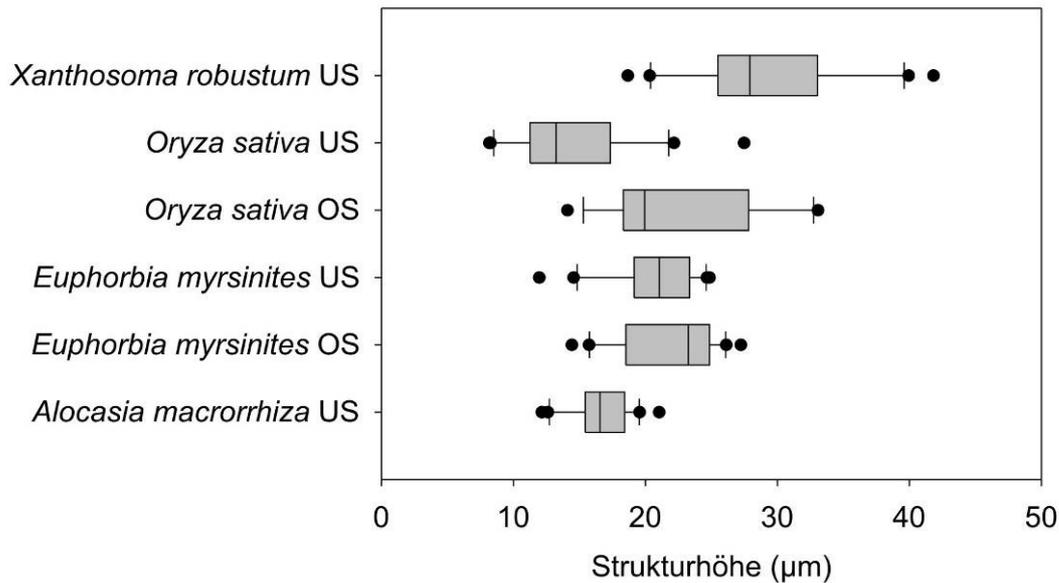


Abbildung 49: Höhe der Mikrostrukturen auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 1. OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 12 bis 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Auf den Oberflächen der Gruppe 1 wurden im Durchschnitt 8 Mikrostrukturen in einem $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ -Messfeld gezählt (Abbildung 51; Tabelle A1).

Die Anzahl an Mikrostrukturen pro ausgezählte Fläche auf den pflanzlichen Oberflächen variierte stark innerhalb der Gruppe 1. So wurde auf der Blattober- und -unterseite von *Oryza sativa* mit durchschnittlich 1 bzw. 6 Strukturen pro Fläche eine geringere Anzahl an Strukturen pro Fläche gezählt. Diese Zählung steht jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen der vergleichenden Darstellung der Oberflächen mit dem REM und dem WP (siehe Kapitel 4.1.1, Abbildung 9 A und 10 A). Die REM-Aufnahmen zeigten eine höhere Anzahl an Papillen in unterschiedlicher Größe. Besonders die kleineren Papillen waren auf diesen Aufnahmen in einer größeren Anzahl zu erkennen. Diese kleinen Papillen wurden bei der Auszählung der Strukturen nicht berücksichtigt.

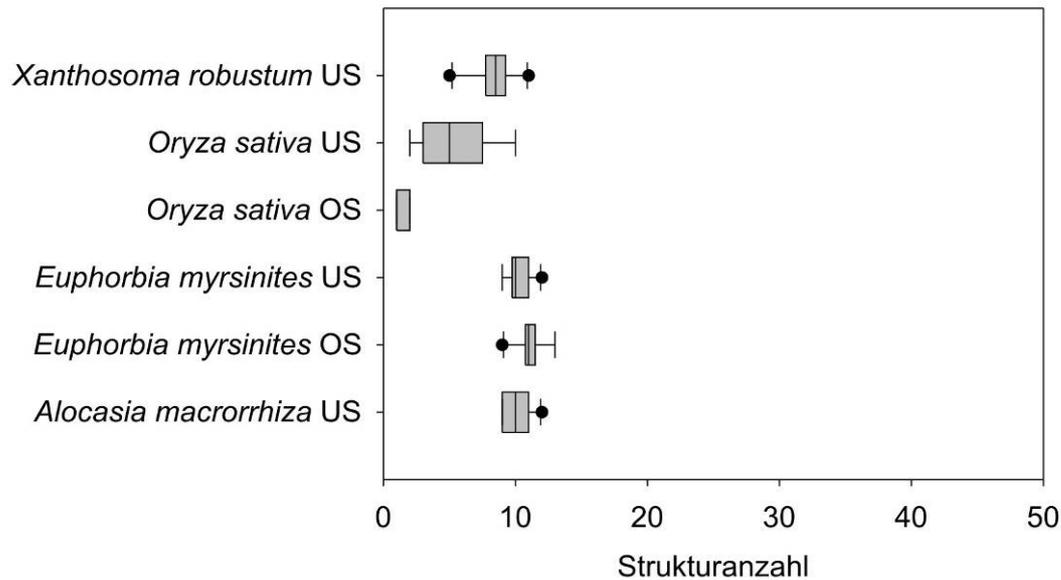


Abbildung 50: Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 1. OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 9 bis 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Gruppe 2 (hohe Mikrostrukturen, hohe Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche)

Die Mikrostrukturen der Oberflächen in Gruppe 2 wiesen im Vergleich zu den Oberflächenstrukturen in Gruppe 1 mit durchschnittlich $16 \mu\text{m}$ eine geringere Höhe auf (Abbildung 52; Tabelle A2).

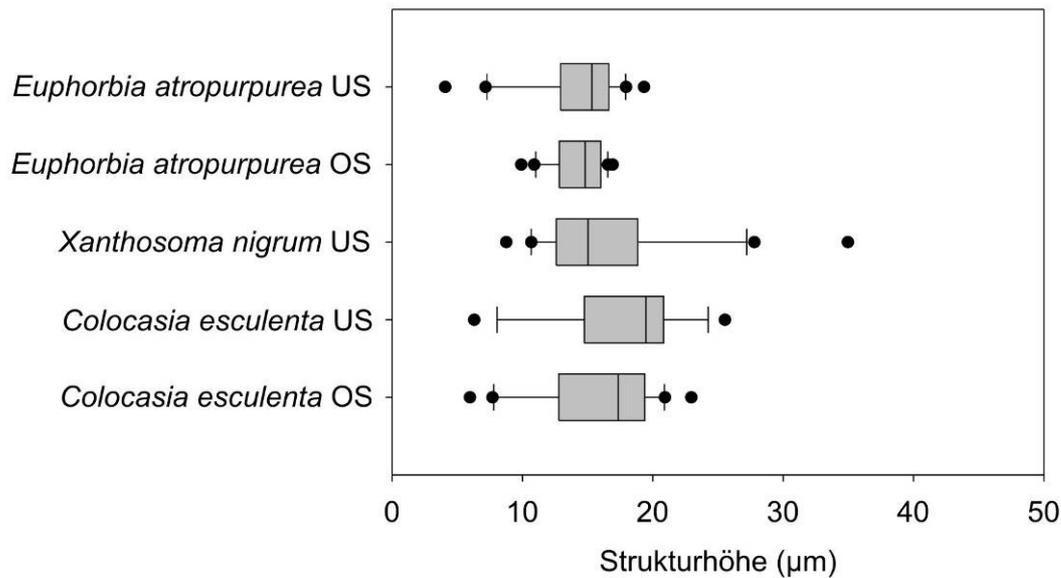


Abbildung 51: Höhe der Mikrostrukturen auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 2. OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 18 bis 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Die Durchschnittshöhen der Mikrostrukturen auf den einzelnen Oberflächen variierten im Vergleich zu den mittleren Oberflächenstrukturhöhen in Gruppe 1 nicht so stark. So wies die Blattunterseite von *Euphorbia atropurpurea* die niedrigsten Strukturhöhen der Gruppe 2 mit durchschnittlich 14,18 µm auf. Die höchsten Strukturen wurden auf der Blattunterseite von *Colocasia esculenta* mit 17,73 µm im Mittel gemessen.

Die durchschnittliche Strukturanzahl pro Fläche auf den Oberflächen in Gruppe 2 betrug 19 Strukturen (Abbildung 53; Tabelle A2).

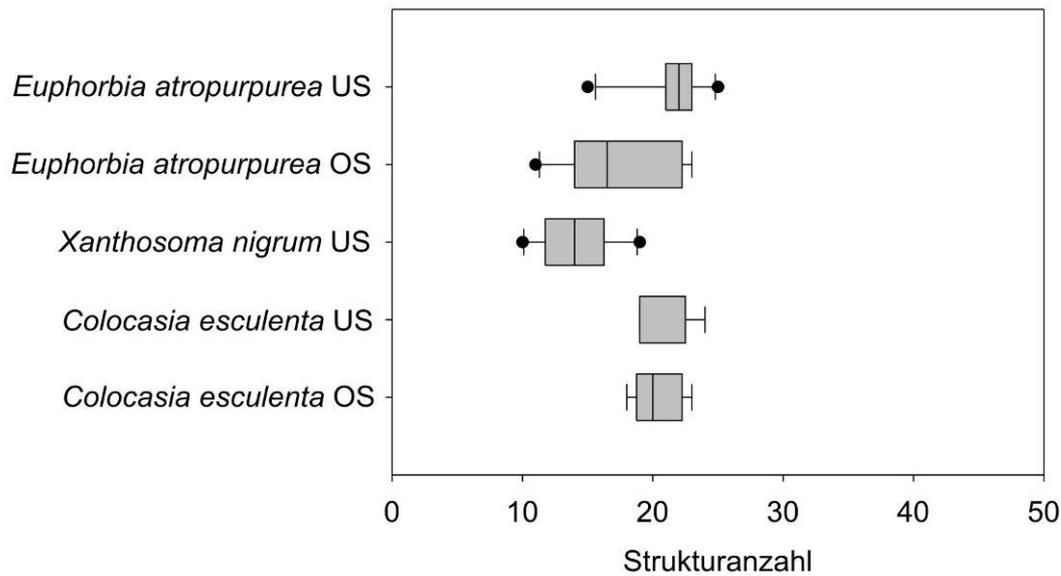


Abbildung 52: Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 2. OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 9 bis 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Die Anzahl der gemessenen Mikrostrukturen pro Fläche unterschieden sich auf den pflanzlichen Oberflächen innerhalb der Gruppe 2 nur geringfügig. Die Blattunterseite von *Xanthosoma nigrum* und die Blattoberseite von *Euphorbia atropurpurea* wiesen mit durchschnittlich 14 und 17 Strukturen pro Messfeld eine geringere Anzahl auf. Die meisten Strukturen pro Fläche wurden mit 22 Strukturen im Mittel auf der Blattunterseite von *Euphorbia atropurpurea* gezählt.

Gruppe 3 (keine bis niedrige Mikrostrukturen)

Die Oberflächen in Gruppe 3 wiesen im Vergleich zu den Oberflächen der übrigen Gruppen mit durchschnittlich $5 \mu\text{m}$ eine geringere Höhe der Mikrostrukturen auf (Abbildung 54; Tabelle A3).

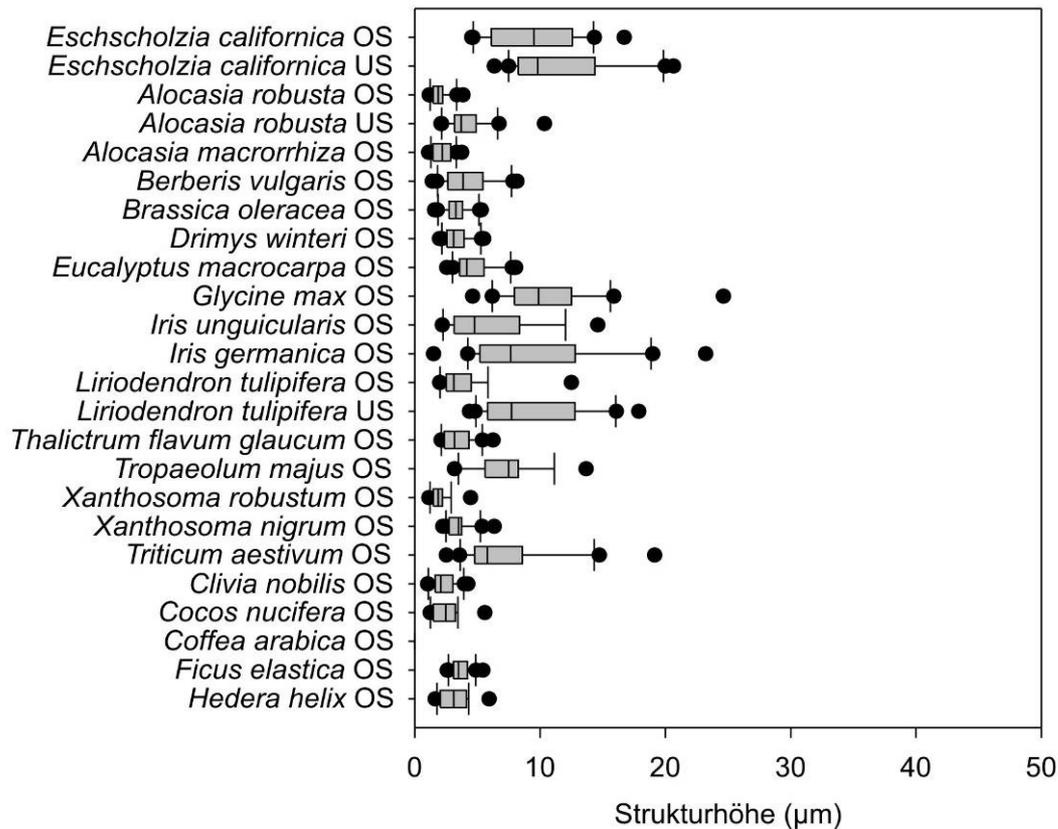


Abbildung 53: Höhe der Mikrostrukturen auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 3. OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 18 bis 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Die untersuchten pflanzlichen Oberflächen in Gruppe 3 zeigten trotz der geringen Strukturhöhen eine große Bandbreite der gemessenen Höhen. Die höchsten Oberflächenstrukturen wurden auf der Blattunterseite von *Eschscholzia californica* mit durchschnittlich 11,51 µm gemessen. Die Strukturen auf der Blattoberseite von *Glycine max* wiesen eine Höhe von 10,58 µm im Mittel auf. Die periklinale Außenwände der Epidermiszellen vieler untersuchter Oberflächen der Gruppe 3 sind jedoch konvex bis tabular geformt (Abbildungen 17 bis 40). Diese Oberflächen besitzen also nur eine niedrige bis keine Mikrostrukturierung. So wiesen die Strukturen der Blattoberseiten von *Clivia nobilis* und *Cocos nucifera* eine Höhe von durchschnittlich 2,33 µm und 2,50 µm auf. Auf der Blattoberseite von *Coffea arabica* konnten keine Mikrostrukturen vermessen werden.

Auch bei der Anzahl an Strukturen pro Fläche unterschieden sich die untersuchten pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 3 von den Oberflächen der übrigen Gruppen. Im Durchschnitt wiesen die Oberflächen der Gruppe 3 nur 7 Strukturen pro Messfeld auf (Abbildung 55; Tabelle A3).

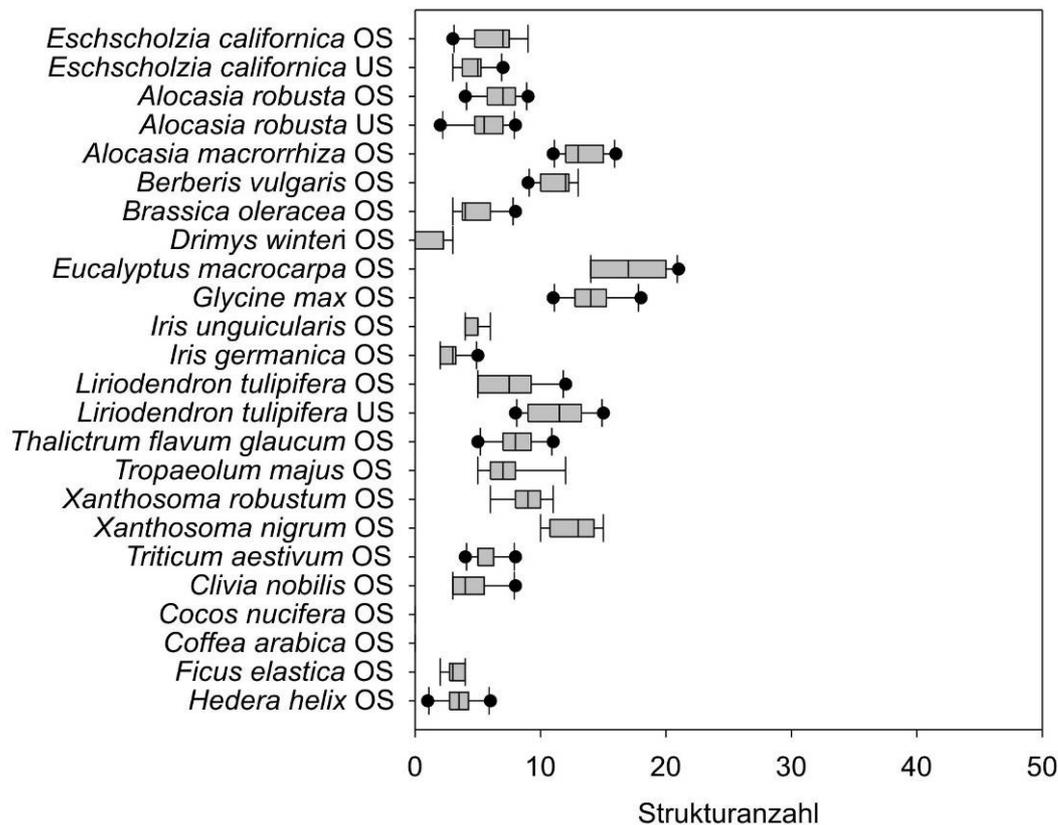


Abbildung 54: Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 3. OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 9 bis 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Jedoch zeigten die Oberflächen eine hohe Variabilität in der Strukturanzahl pro Fläche. So wies die Blattoberseite von *Eucalyptus macrocarpa* mit durchschnittlich 17 gezählten Strukturen pro Fläche die höchste Anzahl auf. Auf der Blattoberseite von *Coffea arabica* wurden keine Mikrostrukturen in den untersuchten Messfeldern gefunden.

Gruppe 4 (hohe Mikrostrukturen, sehr hohe Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche)

Die Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* unterschied sich von den Oberflächen der oben genannten 3 Gruppen anhand der Strukturmerkmale deutlich und bildet deshalb eine eigene Gruppe. Die durchschnittliche Höhe der gemessenen Oberflächenstrukturen lag mit $14,65\ \mu\text{m}$ im Bereich der gemessenen Mikrostrukturhöhen der Oberflächen der Gruppe 1 und 2 (Abbildung 56; Tabelle A4).

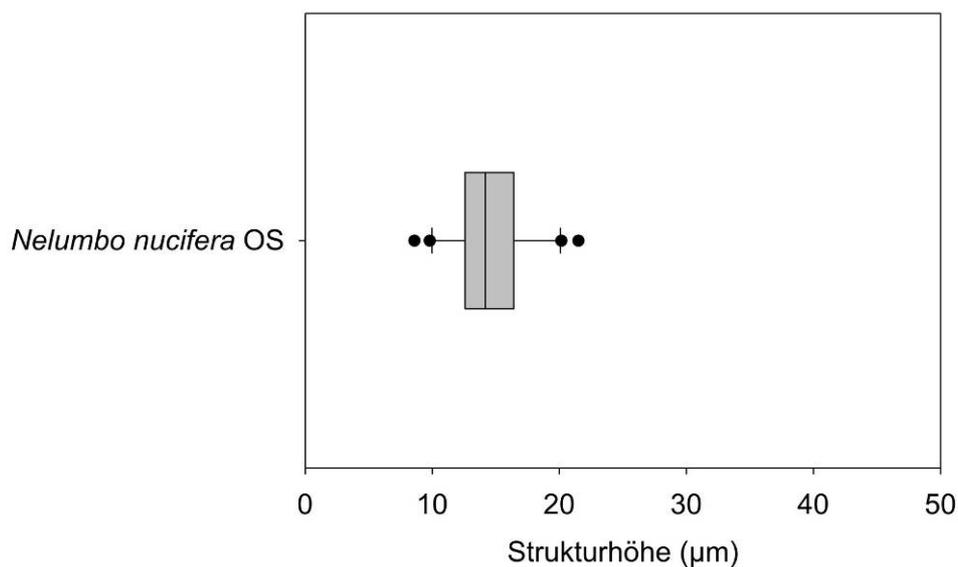


Abbildung 55: Höhe der Mikrostrukturen auf der Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* (Gruppe 4). Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Jedoch wurden auf der Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* mit durchschnittlich 38 Strukturen eine weitaus größere Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche gezählt als auf den übrigen vermessenen Oberflächen (Abbildung 57; Tabelle A4).

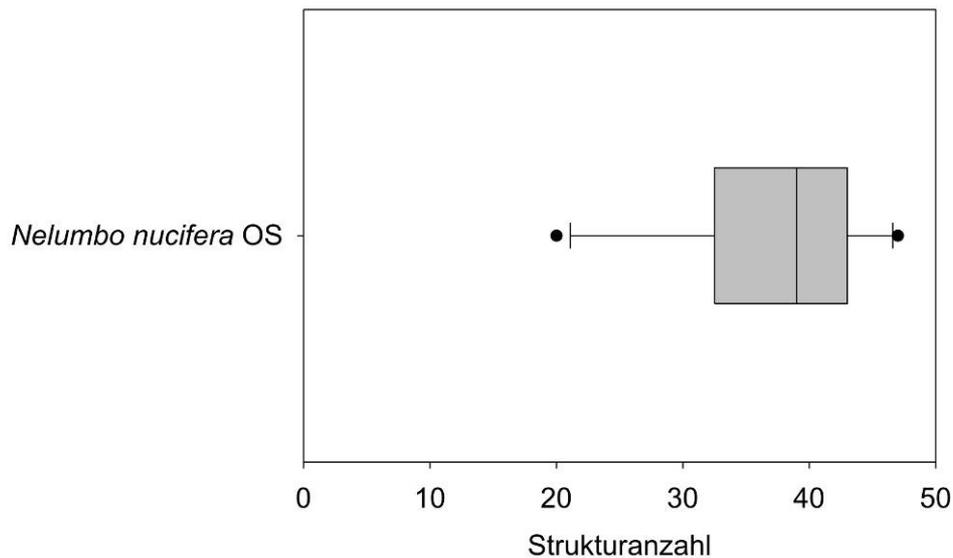


Abbildung 56: Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf der Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* (Gruppe 4). Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Zur Kontrolle wurde die Gruppenzugehörigkeit der untersuchten pflanzlichen Oberflächen anhand der Merkmale „Höhe der Mikrostrukturen“ und „Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche“ mit Hilfe der Diskriminanzanalyse untersucht. Das Ergebnis bestätigte weitgehend die Gruppenbildung anhand der hierarchischen Clusteranalyse.

4.2.2 Technische Oberflächen

Auch die unterschiedlichen technischen Oberflächen wurden auf die gleiche Weise wie die pflanzlichen Oberflächen mit Hilfe der Bilddaten des WP vermessen und die Oberflächen anschließend mit Hilfe der hierarchischen Clusteranalyse anhand ihrer Strukturmerkmale in 3 homogene Gruppen zusammengefasst:

- Gruppe 1: Oberflächen ohne Mikrostrukturen bis hohen Mikrostrukturen, niedrige Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche.
- Gruppe 2: Oberflächen mit hohen Mikrostrukturen und hoher Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche.
- Gruppe 3: Oberfläche mit sehr hohen Mikrostrukturen.

Gruppe 1 (keine bis hohe Mikrostrukturen, niedrige Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche)

Die technischen Oberflächen der Gruppe 1 wiesen im Durchschnitt eine Höhe von 7,37 μm der Mikrostrukturen auf (Abbildung 58).

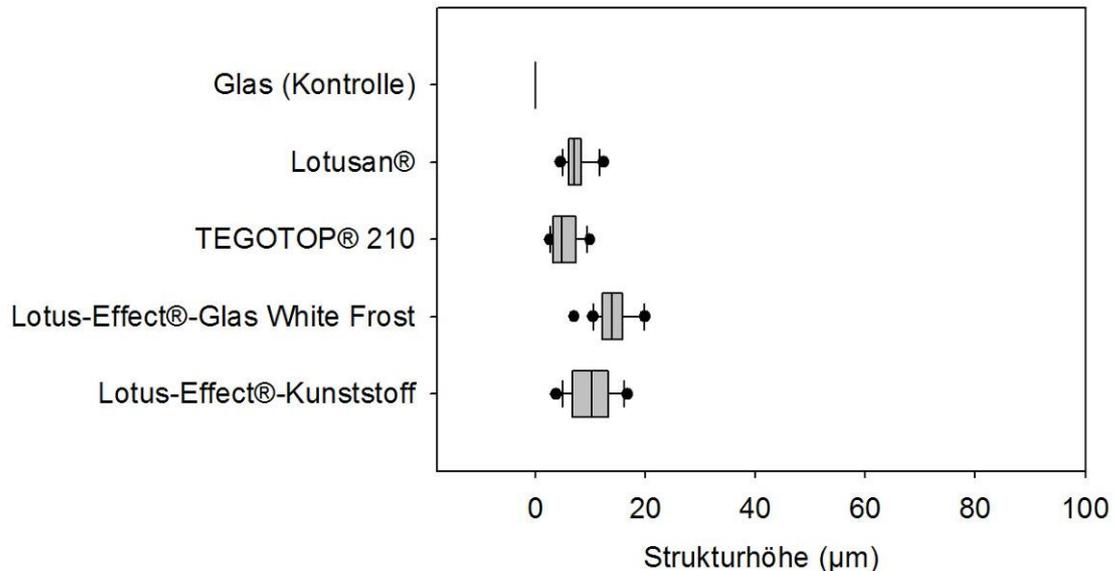


Abbildung 57: Höhe der Mikrostrukturen auf technischen Oberflächen der Gruppe 1. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 12 bis 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Die höchsten Mikrostrukturen mit durchschnittlich 14,26 μm wurden auf Muster-Glasoberflächen „White Frost®“ mit Lotus-Effect® gemessen. Auf den Kontroll-Glasoberflächen konnten keine Mikrostrukturen gemessen werden.

Die Oberflächen der Gruppe 1 unterschieden sich mit Ausnahme der Kontroll-Glasoberfläche nicht sehr stark in der Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche (Abbildung 59). Die Kontroll-Glasoberfläche wies keine Mikrostrukturen auf. Auf der Oberfläche des Fassadenanstrichs Lotusan® konnten im Mittel 8 Mikrostrukturen in einem 100 x 100 μm^2 -Messfeld gezählt werden.

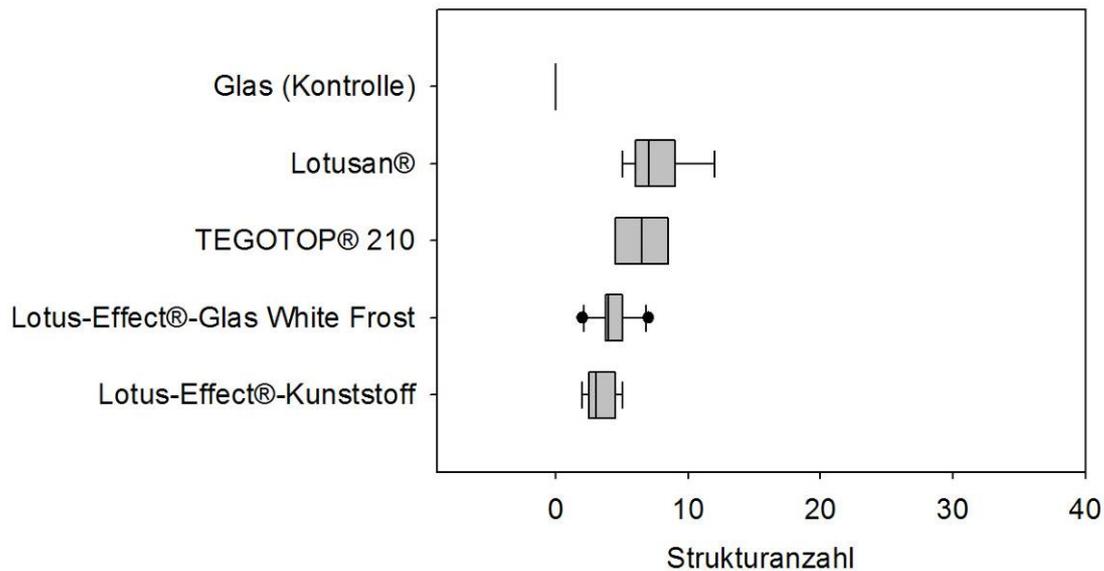


Abbildung 58: Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf technischen Oberflächen der Gruppe 1. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 6 bis 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Gruppe 2 (hohe Mikrostrukturen, hohe Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche)

Die hydrophobierte Kupferfolie ist der einzige Vertreter der Gruppe 2. Im Gegensatz zu den Oberflächen der Gruppe 1 besitzt diese Oberfläche eine dichte Mikrostrukturierung (vergleiche Abbildung 47). Die durchschnittliche Höhe der Mikrostrukturen betrug $12,46 \mu\text{m}$ (Abbildung 60). Dies entspricht den gemessenen Strukturhöhen auf den Oberflächen der Gruppe 1.

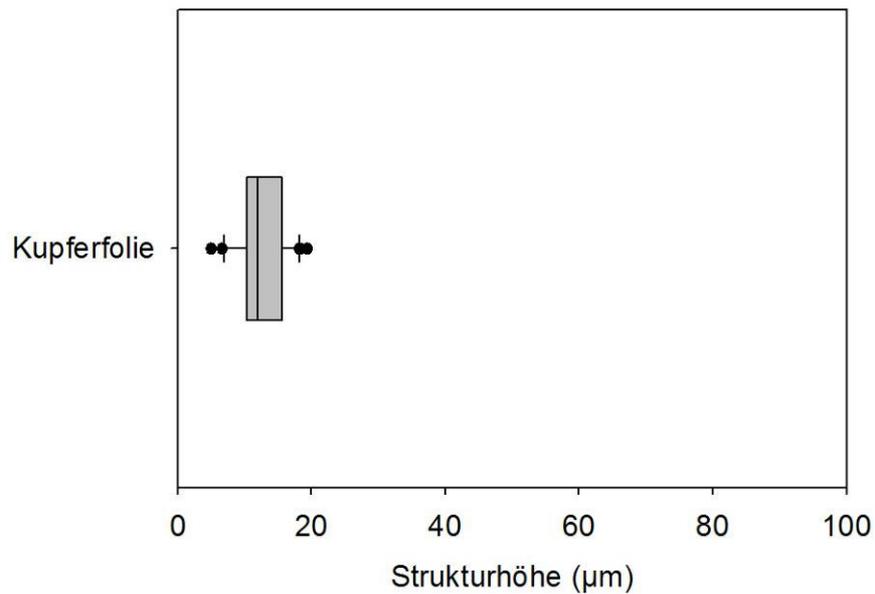


Abbildung 59: Höhe der Mikrostrukturen auf hydrophobierten Kupferoberflächen (Gruppe 2). Dargestellt ist der Boxplot von jeweils 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Auf den Kupferoberflächen wurden durchschnittlich 28 Mikrostrukturen pro Messfeld gezählt (Abbildung 61). Somit wies diese Oberfläche eine höhere Anzahl an Mikrostrukturen auf als die technischen Oberflächen der Gruppe 1.

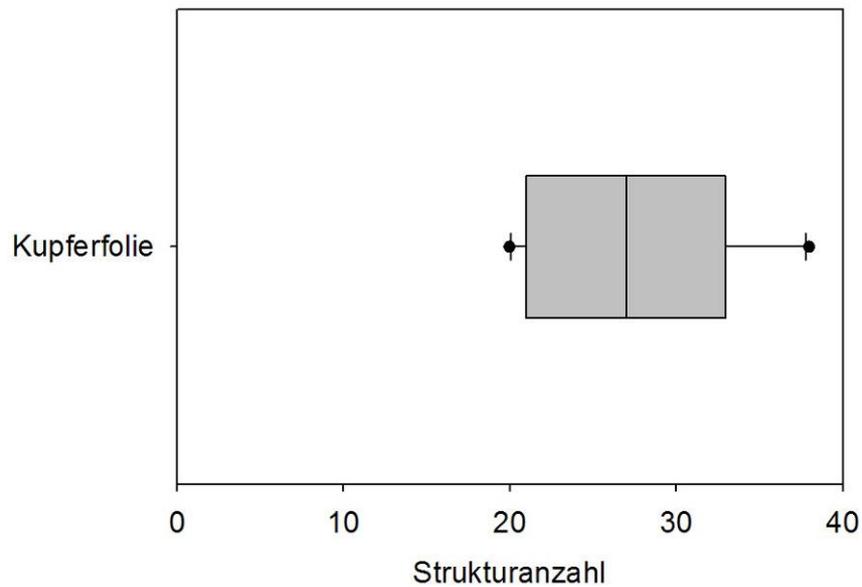


Abbildung 60: Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf hydrophobierten Kupferoberflächen (Gruppe 2). Dargestellt ist der Boxplot von jeweils 6 bis 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Gruppe 3 (sehr hohe Mikrostrukturen)

Auch die Gruppe 3 wies mit der Muster-Textiloberfläche mit Lotus-Effect[®] nur einen Vertreter auf. Diese Oberfläche besaß mit durchschnittlich $34,74 \mu\text{m}$ die höchsten Mikrostrukturen der untersuchten technischen Oberflächen (Abbildung 62). Erzeugt werden die Mikrostrukturen durch die Bindung der Fäden, d. h. durch die Verkreuzung der Fäden im Gewebe (vergleiche Abbildung 48).

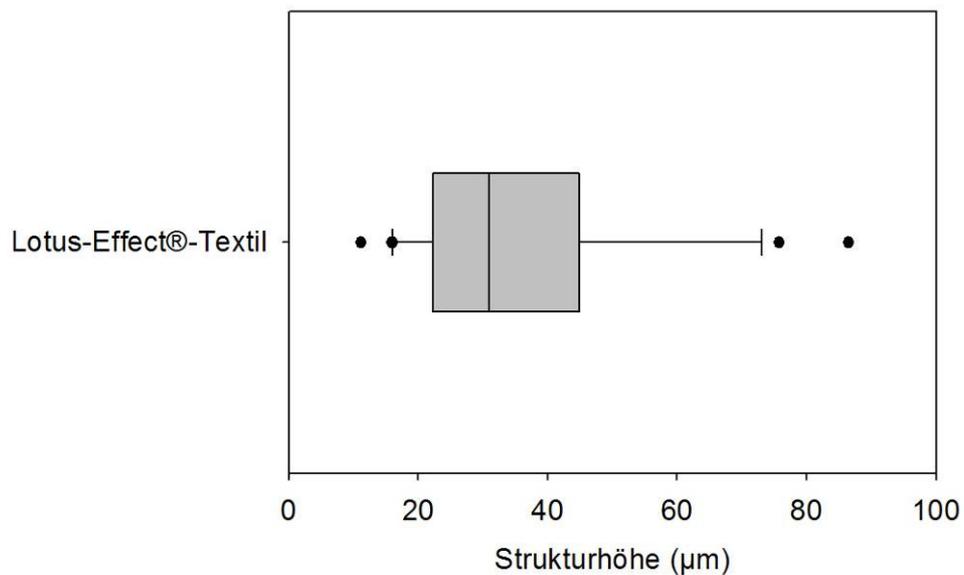


Abbildung 61: Höhe der Mikrostrukturen auf der Muster-Textiloberflächen mit Lotus-Effect® (Gruppe 3). Dargestellt ist der Boxplot von jeweils 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Auf den Muster-Textiloberflächen mit Lotus-Effect® wurden durchschnittlich 4 Mikrostrukturen pro Messfeld gezählt (Abbildung 63). Eine ähnliche Anzahl an Mikrostrukturen wiesen die Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect® und die Muster-Glasoberflächen „White Frost®“ mit Lotus-Effect® (siehe Abbildung 59).

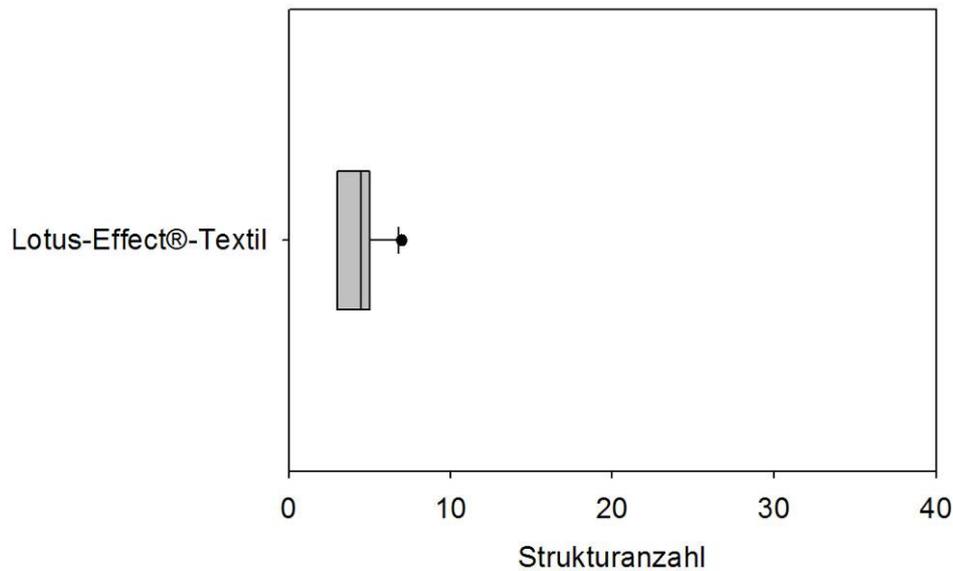


Abbildung 62: Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf der Muster-Textiloberflächen mit Lotus-Effect® (Gruppe 3). Dargestellt ist der Boxplot von jeweils 6 bis 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Die Zuordnung der technischen Oberflächen anhand der Ausprägung ihrer Merkmale „Höhe der Mikrostrukturierung“ und „Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche“ in einzelne Gruppen wurde anschließend mit Hilfe der Diskriminanzanalyse überprüft. Diese Analyse bestätigte die Gruppenbildung anhand der hierarchischen Clusteranalyse.

4.3 Beschreibung der Oberflächenstrukturierung anhand von Oberflächenkenngrößen

Anhand der WP-Messdaten der untersuchten Oberflächen wurden verschiedene definierte Oberflächenparameter berechnet. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Oberflächenparametern und der Strukturmerkmale der entsprechenden pflanzlichen und technischen Oberflächen, beschrieben in Kapitel 4.2, wurde mit Hilfe der Rangkorrelation nach Spearman berechnet. Zusätzlich wurde eine lineare Regressionsanalyse mit ausgewählten Variablen durchgeführt.

4.3.1 Pflanzliche Oberflächen

In diesem Kapitel wird der Zusammenhang zwischen den einzelnen definierten Oberflächenparametern und den gemessenen Strukturmerkmalen (Anzahl pro Fläche und Höhe der Mikrostrukturen) von pflanzlichen Oberflächen untersucht.

Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche

Der Rangkorrelationskoeffizient ρ nahm insgesamt Werte unterhalb von 0,6 an. Somit wiesen die einzelnen mit dem WP auf den pflanzlichen Oberflächen gemessenen Oberflächenparameter nur eine geringe bis mittlere bivariate Korrelation zu der Anzahl der Oberflächenstrukturen pro Fläche auf ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$, Tabelle 5).

Tabelle 5: Berechnung des bivariaten Zusammenhangs zwischen den Mittelwerten der Variablen „Rauheitsparameter“ (R) bzw. „Welligkeitsparameter“ (W) und den Mittelwerten der „Strukturanzahl“ von jeweils 36 charakterisierten pflanzlichen Oberflächen (Rangkorrelationskoeffizient ρ nach Spearman). Aufgeführt sind zusätzlich die Signifikanzen. Die Berechnung der Oberflächenparameter erfolgte aus dreidimensionalen Messdaten, gemessen mit dem WP.

Oberflächenparameter	Strukturanzahl	
	Korrelationskoeffizient ρ	Signifikanz (2-seitig)
Ra	0,561	< 0,001
Rq	0,515	0,001
Rz(DIN)	0,410	0,013
Rmax	0,388	0,019
Rp	0,335	0,046
Rv	0,427	0,009
Rt	0,387	0,02
Rsk	-0,096	0,576
Rku	-0,102	0,555
Rk	0,568	< 0,001
Rpk	0,39	0,019
Rvk	0,394	0,017
Wa	0,474	0,003
Wq	0,484	0,003
Wz(DIN)	0,572	< 0,001
Wmax	0,488	0,003
Wp	0,457	0,005
Wv	0,415	0,012
Wt	0,478	0,003
Wsk	0,319	0,058
Wku	-0,275	0,105
Wk	0,501	0,002
Wpk	0,475	0,003
Wvk	0,182	0,289

Höhe der Mikrostrukturen

Es zeigte sich jeweils zwischen den einzelnen Welligkeitsparameter Wa, Wq, Wz, Wmax, Wp, Wv, Wt, Wpk und der gemessenen Höhe der Mikrostrukturierung auf den pflanzlichen Oberflächen ein signifikanter sehr hoher positiver Zusammenhang. In diesen Fällen nahm der Rangkorrelationskoeffizient ρ Werte von über 0,9 an (Tabelle 6). Somit herrscht eine hohe Rangkorrelation,

d. h. mit der Höhe der Mikrostrukturen auf den untersuchten pflanzlichen Oberflächen nahm auch die Höhe des gemessenen Wertes dieser Welligkeitsparameter zu.

Tabelle 6: Berechnung des bivariaten Zusammenhangs zwischen den Mittelwerten der Variablen „Rauheitsparameter“ (R) bzw. „Welligkeitsparameter“ (W) und den Mittelwerten der „Strukturhöhe“ von jeweils 36 charakterisierten pflanzlichen Oberflächen (Rangkorrelationskoeffizient ρ nach Spearman). Aufgeführt sind zusätzlich die Signifikanzen. Die Berechnung der Oberflächenparameter erfolgte aus dreidimensionalen Messdaten, gemessen mit dem WP.

Oberflächenparameter	Strukturhöhe	
	Korrelationskoeffizient ρ	Signifikanz (2-seitig)
Ra	0,794	< 0,001
Rq	0,811	< 0,001
Rz(DIN)	0,773	< 0,001
Rmax	0,747	< 0,001
Rp	0,777	< 0,001
Rv	0,686	< 0,001
Rt	0,748	< 0,001
Rsk	0,159	0,356
Rku	0,048	0,78
Rk	0,786	< 0,001
Rpk	0,797	< 0,001
Rvk	0,781	< 0,001
Wa	0,917	< 0,001
Wq	0,928	< 0,001
Wz(DIN)	0,922	< 0,001
Wmax	0,936	< 0,001
Wp	0,946	< 0,001
Wv	0,819	< 0,001
Wt	0,941	< 0,001
Wsk	0,485	0,003
Wku	0,161	0,349
Wk	0,865	< 0,001
Wpk	0,918	< 0,001
Wvk	0,617	< 0,001

Die oben aufgeführten Welligkeitsparameter entsprechen den phasenkorrekt gefilterten Rauheitsparametern (siehe Kapitel 3.2.1).

Der Rangkorrelationskoeffizient ρ nahm bei den Rauheitsparametern R_a , R_q , R_z , R_{max} , R_p , R_t , R_k , R_{pk} , R_{vk} und den Welligkeitsparametern W_v und W_k Werte von 0,7 bis 0,9 an. Zwischen diesen einzelnen Oberflächenparametern und der gemessenen Höhe der Mikrostrukturen der entsprechenden Oberfläche bestand somit ein signifikant hoher positiver Zusammenhang.

Es wurde zusätzlich eine lineare Regressionsanalyse zwischen den Welligkeitsparametern, die eine sehr hohe Korrelation zu den Mikrostrukturhöhen aufwiesen, und der Höhe der Mikrostrukturierung durchgeführt. Dazu wurden diese Variablen in Gruppen entsprechend der hierarchischen Clusteranalyse (siehe Kapitel 4.2.1) eingeteilt und diese Gruppen einzeln dieser Analyse unterzogen (Abbildung 64).

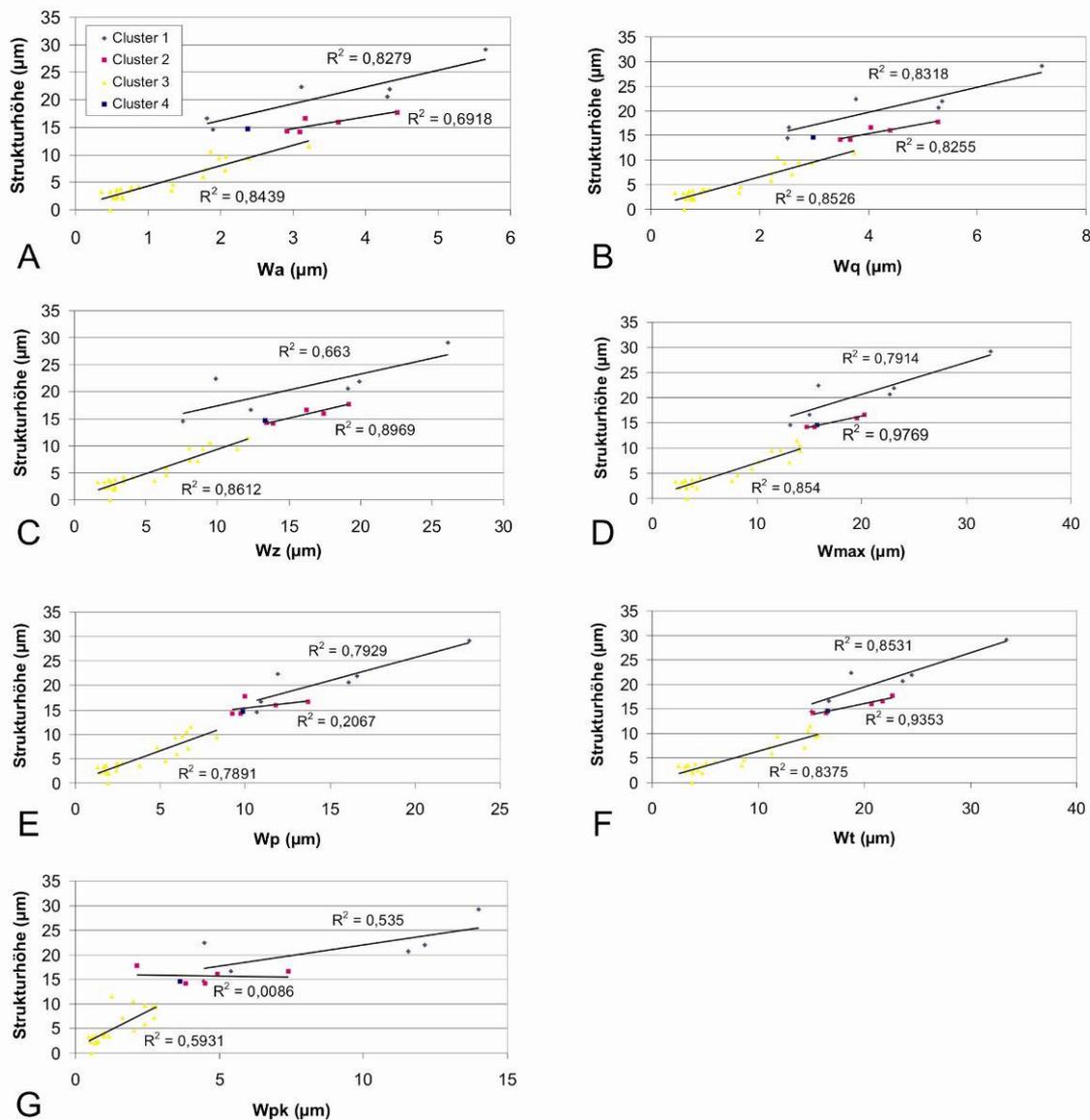


Abbildung 63: Die Strukturhöhe pflanzlicher Oberflächen (Mittelwerte der 2D-Profil-Vermessung) in Abhängigkeit von ausgesuchten Welligkeitsparametern (Mittelwerte der Berechnung der gefilterten WP-Daten). A: Wa (arithmetischer Mittelwert der Welligkeit), B: Wq (Quadratischer Mittenwert der Welligkeit), C: Wz (Summe aus der Höhe der größten Spitze und der Tiefe des größten Tales innerhalb einer Einzelmessstrecke), D: Wmax (maximale Tiefe der Welligkeit), E: Wp (Höhe der größten Spitze innerhalb der Einzelmessstrecke), F: Wt (Wellentiefe), G: Wpk (reduzierte Spitzenhöhe auf Ebene der Welligkeit); Schwarze Kurve: Lineare Regression der Mittelwerte ($y = mx + b$); R^2 : Bestimmtheitsmaß (Maß für die Güte der Anpassung durch die Regressionsgerade); Dunkelblaue Raute: Werte der Pflanzen aus Gruppe 1; Rosa Quadrat: Werte der Pflanzen aus Gruppe 2; Gelbes Dreieck: Werte der Pflanzen aus Gruppe 3; Blaues Quadrat: Wert der Pflanze aus Gruppe 4.

Man erkennt einen linearen Zusammenhang zwischen den ausgewählten Welligkeitsparametern und den Strukturhöhen der entsprechenden Pflanzenoberflächen innerhalb der Gruppen 1, 2 und 3. Innerhalb der Gruppe 4 konnte aufgrund der niedrigen Mitglieder-Anzahl von nur einer Oberfläche (Blattober-

te von *Nelumbo nucifera*) keine lineare Regressionsanalyse durchgeführt werden.

Die lineare Regression zeigte innerhalb der einzelnen Gruppen einen positiven linearen Zusammenhang zwischen den Welligkeitsparametern und der Höhe der Oberflächenstrukturen der einzelnen Pflanzenoberflächen. Einzig die lineare Regression mit den Mittelwerten des Welligkeitsparameters W_{pk} und der Strukturhöhe ergab bei den einzelnen Gruppen ein Bestimmtheitsmaß R^2 von unter 0,6 (Abbildung 64 G). Auch der lineare Zusammenhang zwischen dem Welligkeitsparameter W_p und der Strukturhöhe ist in Gruppe 2 bei einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,21 nicht sehr hoch (Abbildung 64 E). Das Bestimmtheitsmaß R^2 der Welligkeitsparameter W_q , W_{max} , W_t und W_z weist innerhalb der einzelnen Gruppen einen hohen Wert auf (Abbildung 64 B, D, F). Diese Oberflächenparameter zeigen somit auch innerhalb der einzelnen Gruppen eine hohe lineare Korrelation zur Strukturhöhe.

4.3.2 Technische Oberflächen

In diesem Kapitel wird der Zusammenhang zwischen den definierten Oberflächenparametern und den gemessenen Strukturmerkmalen (Anzahl pro Fläche und Höhe der Mikrostrukturen) von technischen Oberflächen untersucht.

Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche

Die Rangkorrelationskoeffizienten ρ wiesen hauptsächlich Werte unterhalb von 0,5 auf (Tabelle 7). Somit zeigten die meisten untersuchten Oberflächenparameter eine nichtsignifikante sehr geringe bis geringe bivariate Korrelation zu der Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche auf den technischen Oberflächen.

Tabelle 7: Berechnung des bivariaten Zusammenhangs zwischen den Mittelwerten der Variablen „Rauheitsparameter“ (R) bzw. „Welligkeitsparameter“ (W) und den Mittelwerten der „Strukturanzahl“ von jeweils 7 charakterisierten technischen Oberflächen (Rangkorrelationskoeffizient ρ nach Spearman). Aufgeführt sind zusätzlich die Signifikanzen. Die Berechnung der Oberflächenparameter erfolgte aus dreidimensionalen Messdaten, gemessen mit dem WP.

Oberflächenparameter	Strukturanzahl	
	Korrelationskoeffizient ρ	Signifikanz (2-seitig)
Ra	0,324	0,478
Rq	0,288	0,531
Rz(DIN)	0,288	0,531
Rmax	0,288	0,531
Rp	0,288	0,531
Rv	0,198	0,67
Rt	0,288	0,531
Rsk	0,234	0,613
Rku	0,18	0,699
Rk	-0,087	0,87
Rpk	-0,145	0,784
Rvk	-0,145	0,784
Wa	-0,072	0,878
Wq	-0,036	0,939
Wz(DIN)	-0,036	0,939
Wmax	0,324	0,478
Wp	0,324	0,478
Wv	-0,072	0,878
Wt	0,198	0,67
Wsk	0,775	0,041
Wku	0,667	0,105
Wk	-0,072	0,878
Wpk	0,577	0,175
Wvk	-0,216	0,641

Nur der Rangkorrelationskoeffizient ρ des Welligkeitsparameters Wsk und Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche zeigt mit 0,775 einen hohen Wert. Somit lag ein signifikant hoher positiver Zusammenhang zwischen dem Parameter Wsk und der gemessenen Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche vor.

Höhe der Mikrostrukturen

Die Rangkorrelationskoeffizienten ρ zwischen den einzelnen Oberflächenparametern R_a , R_q , R_z , R_{max} , R_p , R_v , R_t , R_k , W_{max} , W_p , W_t und der gemessenen Höhe der Mikrostrukturen wiesen Werte von über 0,9 auf (Tabelle 8). Somit lag ein signifikanter sehr hoher positiver Zusammenhang zwischen diesen einzelnen Oberflächenparametern und der Höhe der Mikrostrukturen der jeweiligen technischen Oberfläche vor.

Tabelle 8: Berechnung des bivariaten Zusammenhangs zwischen den Mittelwerten der Variablen „Rauheitsparameter“ (R) bzw. „Welligkeitsparameter“ (W) und den Mittelwerten der „Strukturhöhe“ von 7 charakterisierten technischen Oberflächen (Rangkorrelationskoeffizient ρ nach Spearman). Aufgeführt sind zusätzlich die Signifikanzen. Die Berechnung der Oberflächenparameter erfolgte aus dreidimensionalen Messdaten, gemessen mit dem WP.

Oberflächenparameter	Strukturhöhe	
	Korrelationskoeffizient ρ	Signifikanz (2-seitig)
Ra	0,964	< 0,001
Rq	0,929	0,003
Rz(DIN)	0,929	0,003
Rmax	0,929	0,003
Rp	0,929	0,003
Rv	1,000	-
Rt	0,929	0,003
Rsk	-0,393	0,383
Rku	0,464	0,294
Rk	0,943	0,005
Rpk	0,886	0,019
Rvk	0,886	0,019
Wa	0,821	0,023
Wq	0,893	0,007
Wz(DIN)	0,893	0,007
Wmax	0,964	< 0,001
Wp	0,964	< 0,001
Wv	0,821	0,023
Wt	1,000	-
Wsk	0,393	0,383
Wku	0,179	0,702
Wk	0,821	0,023
Wpk	0,857	0,014
Wvk	0,786	0,036

Die Rangkorrelationskoeffizienten ρ zwischen den einzelnen Oberflächenparametern R_{pk} , R_{vk} , W_a , W_q , W_z , W_v , W_k , W_{pk} , W_{vk} und der Höhe der Mikrostrukturierung auf den entsprechenden technischen Oberflächen hatten Werte zwischen 0,7 und 0,9. Somit lag ein signifikant hoher positiver Zusammenhang zwischen diesen Oberflächenparametern und der gemessenen Höhe der Mikrostrukturen auf den entsprechenden technischen Oberflächen vor.

Einige ausgesuchte Rauheits- und Welligkeitsparameter, die einen hohen Rangkorrelationskoeffizienten ρ besaßen, wurden mittels der linearen Regressionsanalyse untersucht. Auf eine Regressionsanalyse der einzelnen Gruppen (Ergebnis der hierarchischen Clusteranalyse, siehe Kapitel 4.2.2) wurde in diesem Fall aufgrund der niedrigen Anzahl an Oberflächen innerhalb einiger Gruppen verzichtet. Alle ausgesuchten Parameter zeigten einen hohen linearen Zusammenhang zur Strukturhöhe, da die Bestimmtheitsmaße R^2 Werte von über 0,9 aufwiesen (Abbildung 65).

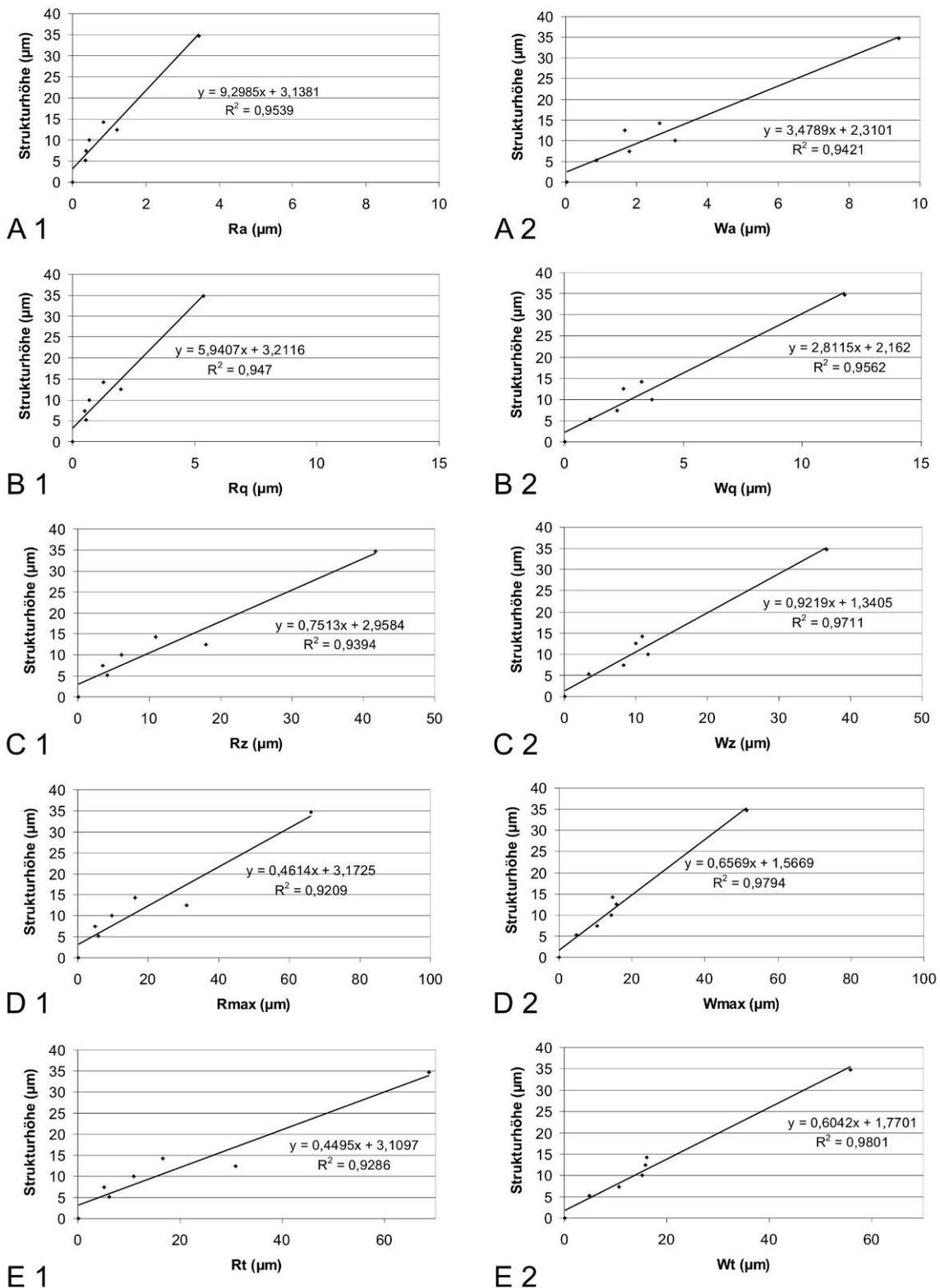


Abbildung 64: Die Strukturtherhöhe technischer Oberflächen (Mittelwerte der 2D-Profil-Vermessung) in Abhängigkeit von ausgesuchten Rauheits- und Welligkeitsparametern (Mittelwerte der Berechnung der gefilterten Primärdaten). A 1: Ra (Arithmetischer Mittenrauwert), B 1: Rq (Quadratischer Mittenrauwert), C 1: Rz (Gemittelte Rautiefe), D 1: Rmax (Maximale Rautiefe), E 1: Rt (Rautiefe), A 2-E 2: Der dem jeweiligen Rauheitsparameter (A 1-E 1) entsprechenden Welligkeitsparameter; schwarze Kurve: Lineare Regression der Mittelwerte ($y = mx + b$); R²: Bestimmtheitsmaß (Maß für die Güte der Anpassung durch die Regressionsgerade).

4.4 Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf unterschiedlich strukturierte Oberflächen

Auf den ausgewählten pflanzlichen und technischen Oberflächen wurden Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser gemessen. Anschließend wurde der Zusammenhang zwischen diesen Werten und den Oberflächenparametern der entsprechenden Oberflächen mit Hilfe der Rangkorrelation nach Spearman untersucht.

4.4.1 Pflanzliche Oberflächen

Die Messungen wurden auf 34 der 36 pflanzlichen Oberflächen durchgeführt. Auf den Blattober- und Unterseiten von *Oryza sativa* war die Messung aufgrund der geringen Größe der Blätter nicht möglich.

Gruppe 1 (sehr hohe Mikrostrukturen)

Die Pflanzenoberflächen der Gruppe 1 zeigten einen durchschnittlichen Kontaktwinkel von 140° (Abbildung 66).

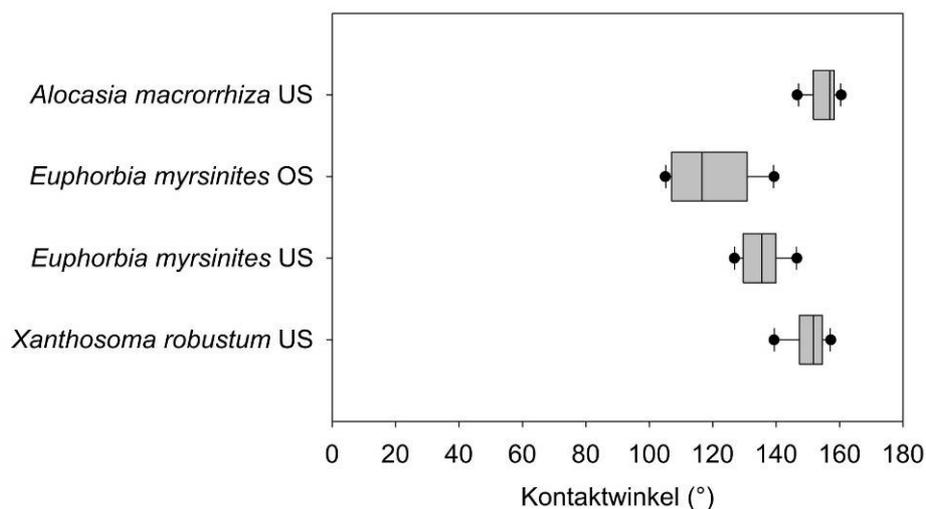


Abbildung 65: Kontaktwinkel von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen mit sehr hohen Oberflächenstrukturen (Gruppe1). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilsabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Die Durchschnittswerte der Kontaktwinkel auf diesen Oberflächen weisen eine ähnliche Höhe auf. So wies die Blattoberseite von *Euphorbia myrsinites* einen Kontaktwinkel von Wasser von im Mittel 119° , die Blattunterseite von *Alocasia macrorrhiza* einen Kontaktwinkel von durchschnittlich 155° auf.

Die Abrollwinkel auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 1 betrug im Durchschnitt 38° (Abbildung 67).

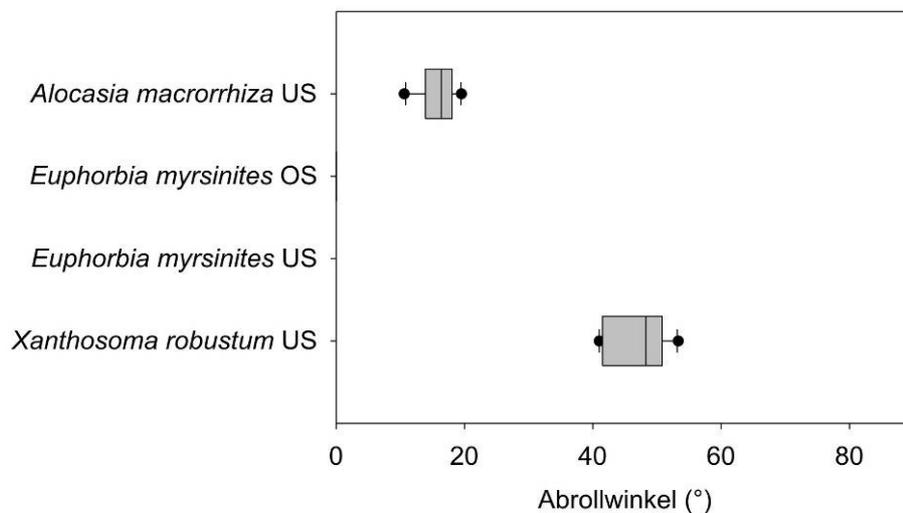


Abbildung 66: Abrollwinkel von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen mit sehr hohen Oberflächenstrukturen (Gruppe1). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Die Abrollwinkel der Oberflächen in Gruppe 1 zeigten größere Unterschiede. So betragen alle Messwerte auf der Blattoberseite von *Euphorbia myrsinites* 0° , d. h. jeder Wassertropfen ist nach Auftragung sofort bei einer Neigung der Oberfläche von 0° abgerollt. Auf der Blattunterseite von *Euphorbia myrsinites* war ein gegenteiliges Verhalten von Wasser zu beobachten. Alle Messwerte auf diesen Oberflächen betragen mehr als 90° . Somit sind auf dieser Oberfläche selbst bei einer Neigung von 90° alle Wassertropfen nicht abgerollt.

Gruppe 2 (hohe Mikrostrukturen, hohe Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche)

Die Oberflächen aus Gruppe 2 zeigten bei den gemessenen Kontaktwinkeln eine große Bandbreite (Abbildung 68).

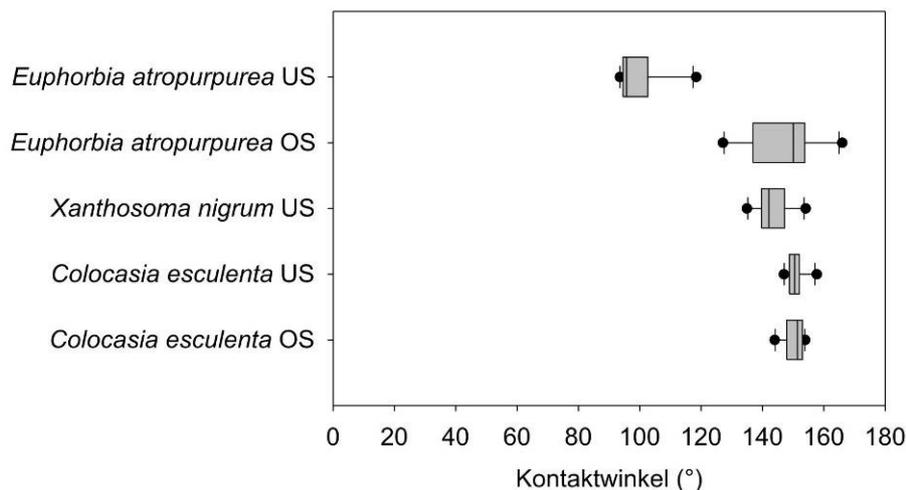


Abbildung 67: Kontaktwinkel von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen mit hohen Oberflächenstrukturen (Gruppe 2). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Die Kontaktwinkel der Pflanzenoberflächen dieser Gruppe betragen im Mittel 138°. Jedoch wich der mittlere Kontaktwinkel auf der Blattunterseite von *Euphorbia atropurpurea* mit durchschnittlich 99° stark von den Kontaktwinkeln auf den übrigen Oberflächen der Gruppe 2 ab.

Auch die Abrollwinkel auf den Oberflächen der Gruppe 2 variierten stark sowohl auf der einzelnen Oberfläche, als auch in der Gruppe (Abbildung 69).

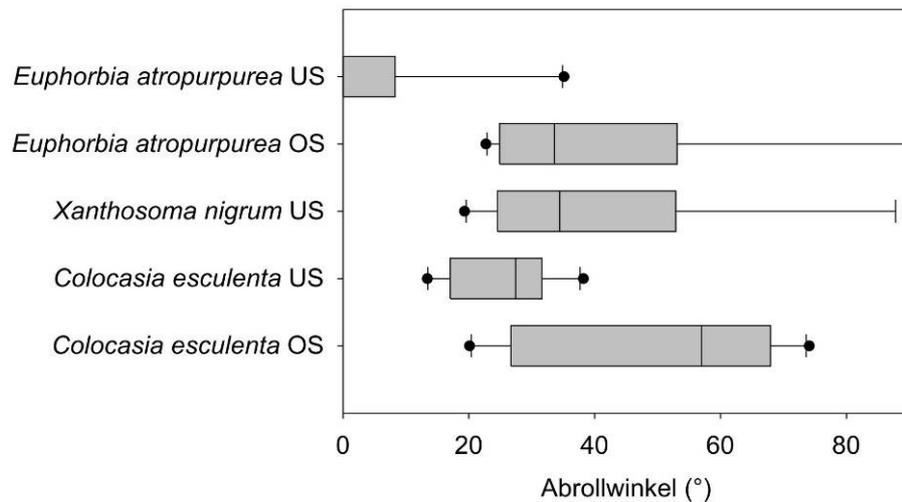


Abbildung 68: Abrollwinkel von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen mit hohen Oberflächenstrukturen (Gruppe 2). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Den niedrigsten durchschnittlichen Abrollwinkel wies die Blattunterseite von *Euphorbia atropurpurea* mit 7° auf. Auf der Blattoberseite von *Colocasia esculenta* rollte der Wassertropfen bei einer Neigung der Oberfläche von im Mittel 49° ab.

Gruppe 3 (keine bis niedrige Mikrostrukturen)

Die durchschnittlichen Kontaktwinkel auf den Pflanzenoberflächen der Gruppe 3 waren sehr heterogen sowohl auf den einzelnen Oberflächen, als auch in der Gruppe (Abbildung 70).

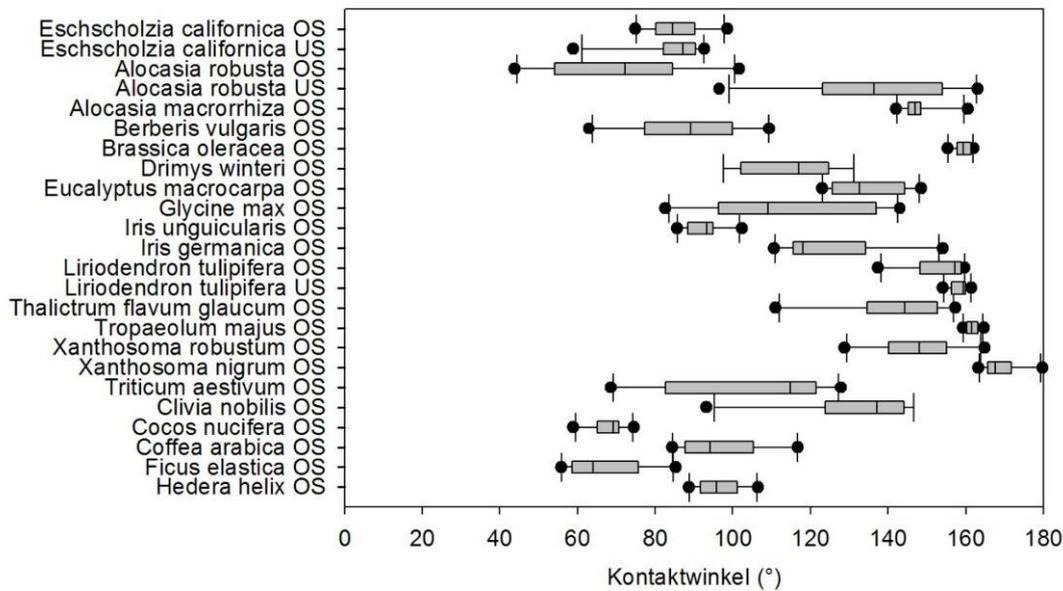


Abbildung 69: Kontaktwinkel von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen mit niedrigen bis glatten Oberflächenstrukturen (Gruppe 3). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

So wiesen die Blattoberseiten von *Cocos nucifera* und *Ficus elastica* Kontaktwinkel von unter 70° im Mittel auf. Auf den Blattoberseiten von *Alocasia macrorrhiza*, *Brassica oleracea*, *Liriodendron tulipifera*, *Thalictrum flavum*, *Tropaeolum majus*, *Xanthosoma robustum*, *Xanthosoma nigrum* und der Blattunterseite von *Liriodendron tulipifera* wurden Kontaktwinkel von über 140° gemessen.

Auf 13 Oberflächen innerhalb der Gruppe 3 rollte Wasser selbst bei einer Neigung von 90° nicht ab (Abbildung 71). Diese Oberflächen waren die Blattober- und -unterseite von *Eschscholzia californica*, die Blattoberseite von *Alocasia robusta*, *Eucalyptus macrocarpa*, *Glycine max*, *Iris unguicularis*, *Triticum aestivum*, *Clivia nobilis*, *Cocos nucifera*, *Coffea arabica*, *Ficus elastica* und *Hedera helix*.

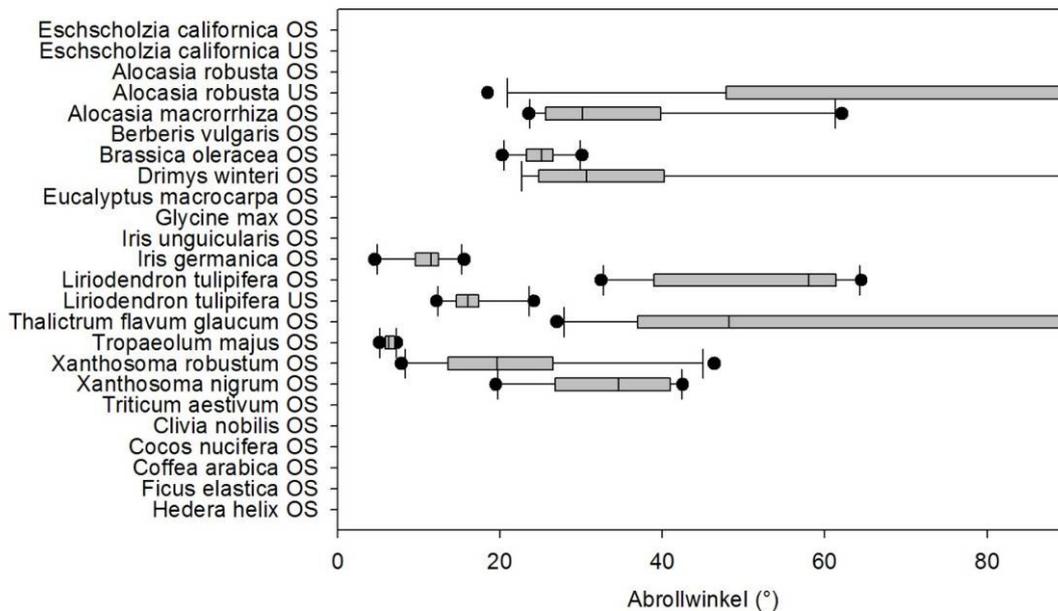


Abbildung 70: Abrollwinkel von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen mit niedrigen bis glatten Oberflächenstrukturen (Gruppe 3). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Auf der Blattoberseite von *Tropaeolum majus* rollte ein Wassertropfen schon ab einer durchschnittlichen Neigung von 6° ab. Die übrigen durchschnittlichen Abrollwinkel innerhalb einer Pflanzenoberfläche waren sehr heterogen.

Gruppe 4 (hohe Mikrostrukturen, sehr hohe Anzahl an Mikrostrukturen pro Fläche)

Die Blattoberseite von *Nelumbo nucifera*, einziger Vertreter der Gruppe 4, hatte einen durchschnittlichen Kontaktwinkel von 156° (Abbildung 72).

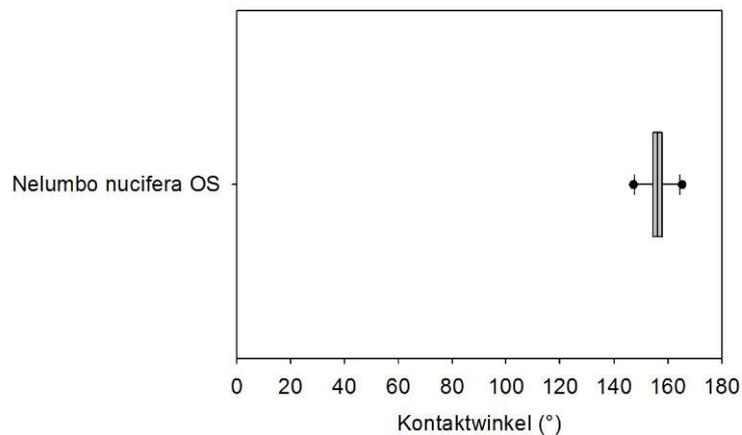


Abbildung 71: Kontaktwinkel von Wasser auf der Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* (hohe Oberflächenstrukturen und hohe Strukturanzahl pro Fläche, Gruppe 4). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Der Abrollwinkel betrug bei allen Messungen 0° (Abbildung 73). Das Wasser rollte auf einer möglichst horizontal gelagerten Oberfläche sofort ab.

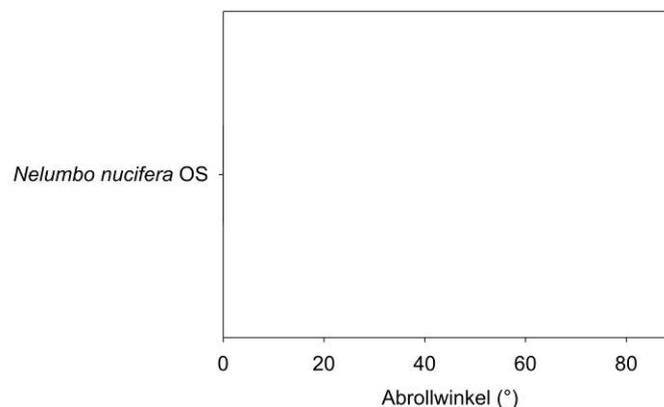


Abbildung 72: Abrollwinkel von Wasser auf der Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* (hohe Oberflächenstrukturen und hohe Strukturanzahl pro Fläche, Gruppe 4). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

4.4.2 Technische Oberflächen

Aufgrund der geringen Anzahl an Oberflächen innerhalb der Gruppen 2 und 3, die anhand der Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse gebildet wurden (siehe Kapitel 4.2.2), wird in diesem Kapitel auf eine Trennung der technischen Oberflächen in die einzelnen Gruppen verzichtet.

Alle strukturierten technischen Oberflächen wiesen Kontaktwinkel von Wasser von über 140° im Mittel auf (Abbildung 74).

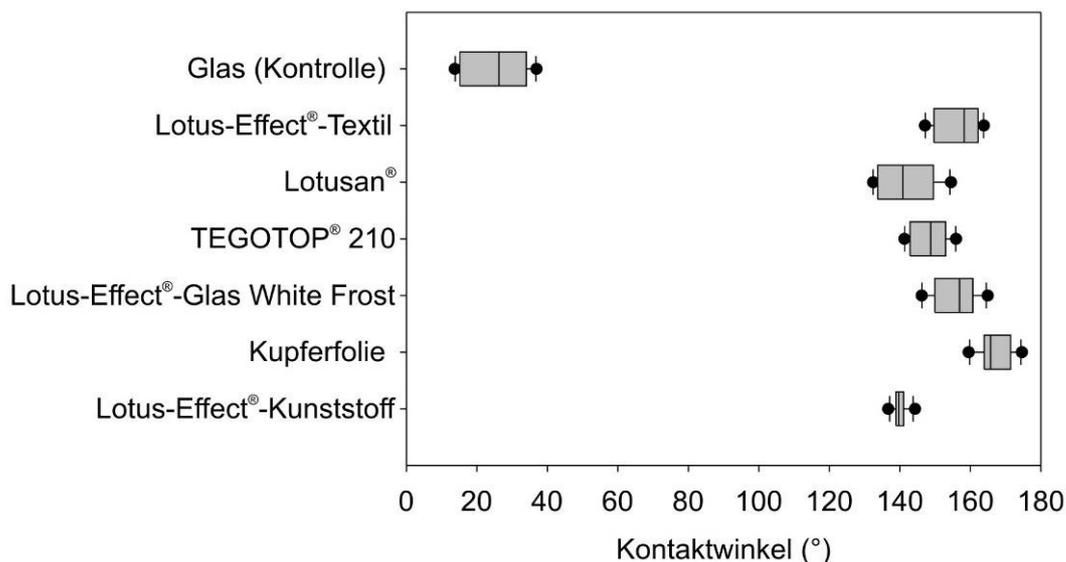


Abbildung 73: Kontaktwinkel von Wasser auf unterschiedlich strukturierten technischen Oberflächen. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 bis 12 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Nur auf der unstrukturierten Glasoberfläche wurden Kontaktwinkel von durchschnittlich 25° gemessen.

Die Abrollwinkel, die auf den technischen Oberflächen gemessen wurden, waren sehr unterschiedlich. So rollten auf den Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect®, den TEGOTOP® 210-Oberflächen und den hydrophobierten Kupferoberflächen die Wassertropfen schon bei einer Neigung von unter 10° ab (Abbildung 75).

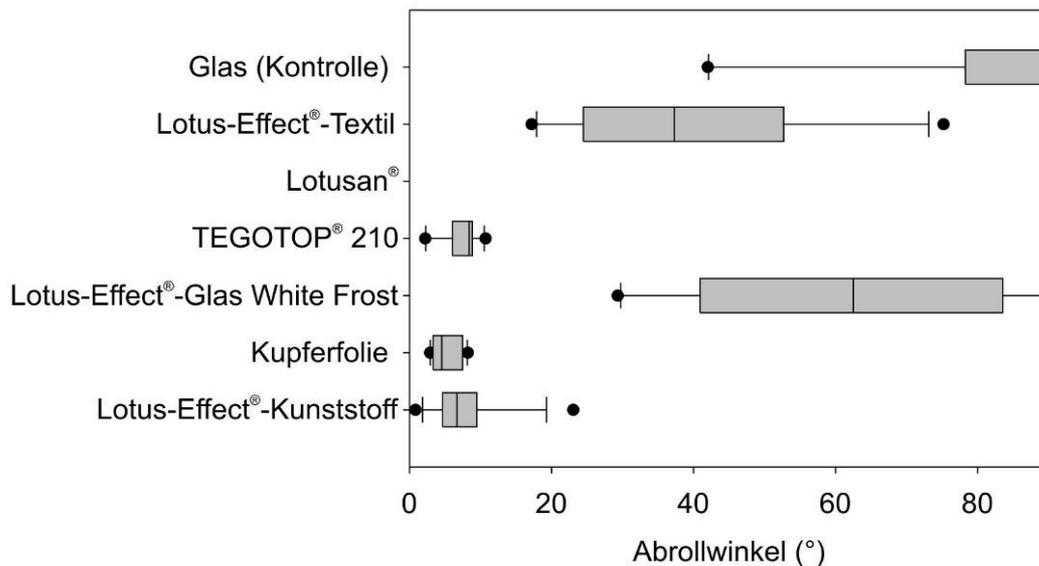


Abbildung 74: Abrollwinkel von Wasser auf unterschiedlich strukturierten technischen Oberflächen. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 bis 12 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.

Die übrigen Oberflächen wiesen höhere und innerhalb der untersuchten Oberfläche sehr unterschiedliche Abrollwinkel auf. So wurde auf der unbehandelten Glasoberfläche ein durchschnittlicher Abrollwinkel von 81° gemessen.

4.5 Beschreibung des Benetzungsverhaltens von Oberflächen anhand von Oberflächenkenngrößen

Zusätzlich wurde die Korrelation zwischen den durchschnittlichen Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf den einzelnen Oberflächen zu den entsprechenden Rauheits- und Welligkeitsparametern mittels der Rangkorrelation nach Spearman berechnet.

4.5.1 Pflanzliche Oberflächen

Es wurde die Korrelation zwischen den Kontakt- und Abrollwinkeln auf der jeweiligen pflanzlichen Oberfläche und den entsprechenden Rauheits- und Welligkeitsparametern berechnet.

Kontaktwinkel

Es zeigte sich nur eine sehr geringe bis geringe positive bivariate Korrelation der Oberflächenparameter zu den durchschnittlichen Kontaktwinkeln (Tabelle 9).

Tabelle 9: Berechnung des bivariaten Zusammenhangs zwischen den Mittelwerten der Variablen „Rauheitsparameter“ (R) bzw. „Welligkeitsparameter“ (W) und den Mittelwerten der Kontaktwinkel von jeweils 34 charakterisierten pflanzlichen Oberflächen (Rangkorrelationskoeffizient ρ nach Spearman). Aufgeführt sind zusätzlich die Signifikanzen. Die Berechnung der Oberflächenparameter erfolgte aus dreidimensionalen Messdaten, gemessen mit dem dem WP.

Oberflächenparameter	Kontaktwinkel	
	Korrelationskoeffizient ρ	Signifikanz (2-seitig)
Ra	0,186	0,292
Rq	0,136	0,443
Rz(DIN)	0,129	0,466
Rmax	0,083	0,642
Rp	0,109	0,539
Rv	0,075	0,673
Rt	0,087	0,625
Rsk	0,051	0,776
Rku	-0,23	0,191
Rk	0,214	0,224
Rpk	0,142	0,424
Rvk	0,107	0,549
Wa	0,217	0,217
Wq	0,23	0,19
Wz(DIN)	0,263	0,134
Wmax	0,206	0,25
Wp	0,248	0,158
Wv	0,168	0,342
Wt	0,242	0,168
Wsk	0,136	0,444
Wku	-0,217	0,218
Wk	0,243	0,166
Wpk	0,246	0,160
Wvk	0,102	0,565

Der Rangkorrelationskoeffizient ρ wies bei allen Oberflächenparametern einen Wert unterhalb von 0,3 auf.

Abrollwinkel

Zwischen den Oberflächenparametern und den durchschnittlichen Abrollwinkeln der jeweiligen pflanzlichen Oberfläche zeigte sich nur ein sehr geringer bis geringer hauptsächlich negativer Zusammenhang (Tabelle 10). Der Zusammenhang zwischen den meisten Oberflächenparametern und dem entsprechenden Abrollwinkel ist somit gegenläufig, d. h. je größer der Wert dieser Oberflächenparameter, desto kleiner ist der durchschnittliche Abrollwinkel. Dieser Zusammenhang ist jedoch schwach.

Tabelle 10: Berechnung des bivariaten Zusammenhangs zwischen den Mittelwerten der Variablen „Rauheitsparameter“ (R) bzw. „Welligkeitsparameter“ (W) und den Mittelwerten der Abrollwinkel von jeweils 34 charakterisierten pflanzlichen Oberflächen (Rangkorrelationskoeffizient ρ nach Spearman). Aufgeführt sind zusätzlich die Signifikanzen. Die Berechnung der Oberflächenparameter erfolgte aus dreidimensionalen Messdaten, gemessen mit dem dem WP.

Oberflächenparameter	Abrollwinkel	
	Korrelationskoeffizient ρ	Signifikanz (2-seitig)
Ra	-0,171	0,335
Rq	-0,138	0,437
Rz(DIN)	-0,082	0,644
Rmax	-0,025	0,89
Rp	-0,064	0,721
Rv	-0,004	0,981
Rt	-0,029	0,873
Rsk	-0,096	0,591
Rku	0,451	0,007
Rk	-0,244	0,165
Rpk	-0,131	0,461
Rvk	-0,062	0,729
Wa	-0,305	0,08
Wq	-0,325	0,061
Wz(DIN)	-0,334	0,053
Wmax	-0,297	0,094
Wp	-0,316	0,069
Wv	-0,242	0,168
Wt	-0,346	0,045
Wsk	-0,147	0,407
Wku	0,164	0,354
Wk	-0,298	0,087
Wpk	-0,338	0,051
Wvk	-0,178	0,314

4.5.2 Technische Oberflächen

Es wurde außerdem mittels der Rangkorrelation nach Spearman die Korrelation zwischen den durchschnittlichen Kontakt- und Abrollwinkeln auf der jeweiligen technischen Oberfläche und den entsprechenden Rauheits- und Welligkeitsparametern berechnet.

Kontaktwinkel

Im Gegensatz zu den pflanzlichen Oberflächen wurden bei den technischen Oberflächen z. T. hohe und sehr hohe Korrelationen zwischen den Oberflächenparametern und den durchschnittlichen Kontaktwinkeln gemessen (Tabelle 11).

Tabelle 11: Berechnung des bivariaten Zusammenhangs zwischen ausgesuchten Variablen „Rauheitsparameter“ (R) bzw. „Welligkeitsparameter“ (W) und dem Kontaktwinkel von Wasser auf jeweils 7 charakterisierten technischen Oberflächen (Rangkorrelationskoeffizient ρ nach Spearman). Aufgeführt sind zusätzlich die Signifikanzen. Die Berechnung der Oberflächenparameter erfolgte aus dreidimensionalen Messdaten, gemessen mit dem dem WP.

Oberflächenparameter	Kontaktwinkel	
	Korrelationskoeffizient ρ	Signifikanz (2-seitig)
Ra	0,821	0,023
Rq	0,857	0,014
Rz(DIN)	0,857	0,014
Rmax	0,857	0,014
Rp	0,857	0,014
Rv	0,75	0,052
Rt	0,857	0,014
Rsk	-0,071	0,879
Rku	0,536	0,215
Rk	0,714	0,111
Rpk	0,771	0,072
Rvk	0,771	0,072
Wa	0,321	0,482
Wq	0,464	0,294
Wz(DIN)	0,464	0,294
Wmax	0,821	0,023
Wp	0,821	0,023
Wv	0,321	0,482
Wt	0,75	0,052
Wsk	0,857	0,014
Wku	0,714	0,071
Wk	0,321	0,482
Wpk	0,929	0,003
Wvk	0,214	0,645

So zeigten die Rauheitsparameter Ra, Rq, Rz, Rmax, Rp, Rv, Rt, Rk, Rpk, Rvk und die Welligkeitsparameter Wmax, Wp, Wt, Wsk, Wku einen signifikanten hohen Zusammenhang zu dem durchschnittlichen Kontaktwinkel auf der technischen Oberfläche auf der der entsprechende Rauheitsparameter berechnet wurde.

Der Welligkeitsparameter Wpk wies eine signifikant sehr hohe Korrelation zu dem durchschnittlichen Kontaktwinkel auf den untersuchten Oberflächen auf.

Abrollwinkel

Zwischen dem durchschnittlichen Abrollwinkel und dem Rauheitsparameter Rku zeigte sich ein signifikant hoher negativer Zusammenhang (Tabelle 12). Der Rangkorrelationskoeffizient ρ betrug -0,893 (bei einer zweiseitigen Signifikanz von 0,007). Je höher somit der gemessene Parameter Rku war, desto kleiner war der durchschnittliche Abrollwinkel. Die übrigen Rauheitsparameter wiesen eine sehr geringe bis mittlere negative Korrelation zu den entsprechenden mittleren Abrollwinkeln auf. Zwischen den Welligkeitsparametern und den durchschnittlichen Abrollwinkeln gab es keine bis eine mittlere überwiegend negative Korrelation.

Tabelle 12: Berechnung des bivariaten Zusammenhangs zwischen ausgesuchten Variablen „Rauheitsparameter“ (R) bzw. „Welligkeitsparameter“ (W) und dem Abrollwinkel von Wasser auf jeweils 7 charakterisierten technischen Oberflächen (Rangkorrelationskoeffizient ρ nach Spearman). Aufgeführt sind zusätzlich die Signifikanzen. Die Berechnung der Oberflächenparameter erfolgte aus dreidimensionalen Messdaten, gemessen mit dem dem WP.

Oberflächenparameter	Abrollwinkel	
	Korrelationskoeffizient ρ	Signifikanz (2-seitig)
Ra	-0,357	0,432
Rq	-0,536	0,215
Rz(DIN)	-0,536	0,215
Rmax	-0,536	0,215
Rp	-0,536	0,215
Rv	-0,214	0,645
Rt	-0,536	0,215
Rsk	-0,643	0,119
Rku	-0,893	0,007
Rk	-0,086	0,872
Rpk	-0,314	0,544
Rvk	-0,314	0,544
Wa	0	1,000
Wq	-0,214	0,645
Wz(DIN)	-0,214	0,645
Wmax	-0,357	0,432
Wp	-0,357	0,432
Wv	0	1,000
Wt	-0,214	0,645
Wsk	-0,679	0,094
Wku	-0,536	0,215
Wk	0	1,000
Wpk	-0,25	0,589
Wvk	0,143	0,76

4.6 Generierung von Fehlstellen und die Auswirkungen von Fehlstellen auf Superhydrophobie und Selbstreinigung

Im Folgenden wurden verschiedene superhydrophobe technische Oberflächen auf die Eignung als Testoberfläche für die Generierung definierter Fehlstellen untersucht (Kapitel 4.6.1). An den Testoberflächen wurden anschließend die Auswirkungen der Fehlstellen auf die Superhydrophobie mit Hilfe vergleichen-

der Kontakt- und Abrollwinkelmessungen untersucht (Kapitel 4.6.2). Danach wurde zunächst auf superhydrophoben Oberflächen mit Hilfe der linearen Regressionsanalyse der Zusammenhang zwischen dem Kontaminationsgrad und der Fluoreszenz der Kontaminationspartikel untersucht (Kapitel 4.6.3). Außerdem wurden Kontaminationsversuche mit den Testoberflächen durchgeführt, um die Auswirkungen der Fehlstellen auf die Selbstreinigungsfähigkeit dieser Oberflächen zu untersuchen (Kapitel 4.6.4).

4.6.1 Generierung von Fehlstellen

In verschiedenen strukturierten superhydrophoben technischen Oberflächen wurden Fehlstellen eingebracht, im REM untersucht und vermessen.

Hydrophobierte Kupferoberfläche

Die hydrophobierte Kupferoberfläche zeichnete sich durch ihre uneingeschränkte Verfügbarkeit und die leichte Handhabung aus und eignete sich somit besonders für die hier angesetzten Untersuchungen.

Zunächst wurden auf dieser Oberfläche mit Hilfe einer Nadel gitterartige Vertiefungen eingeritzt. Die Mikrostrukturierung, bestehend aus unterschiedlich großen globulären Einheiten (Abbildung 76 A) wird durch die Behandlung mit der Nadelspitze komplett entfernt (Abbildung 76 B).

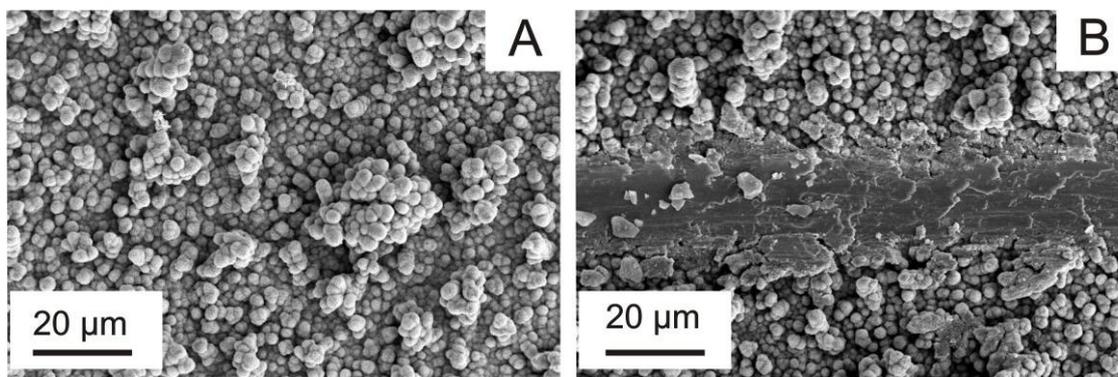


Abbildung 75: REM-Aufnahmen einer hydrophobierten strukturierten Kupferoberfläche (Bolta-Werke GmbH); A: Kupferfolie ohne Fehlstelle, B: Kupferfolie mit Detail der gitterartigen Fehlstelle (mit Nadelspitze erzeugt) in der Bildmitte.

Die erzeugte Fehlstelle wies nur eine sehr schwache Strukturierung auf. Die durchschnittliche Breite dieser Fehlstelle betrug durchschnittlich 32 μm . Sie hatte eine Tiefe von durchschnittlich 6 μm auf.

TEGOTOP[®] 210

Die TEGOTOP[®] 210-Beschichtung wurde lokal durch Abwischen mit einem Radiergummi entfernt (Abbildung 77).

Die feine Strukturierung dieser Oberfläche (zu sehen in Abbildung 77 A) ist in der Fehlstelle komplett entfernt, die Glasoberfläche ist wieder frei gelegt (Abbildung 77 B).

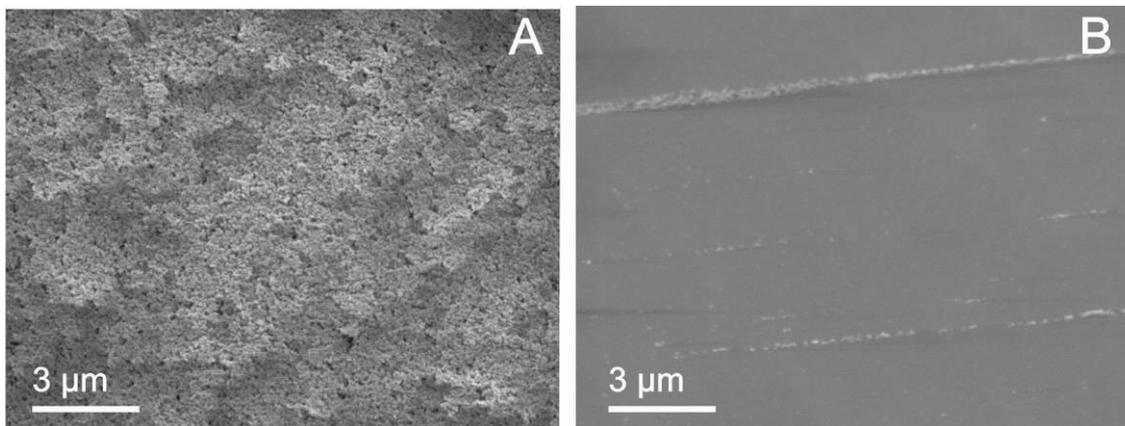


Abbildung 76: REM-Aufnahmen einer Glasoberfläche, beschichtet mit TEGOTOP[®] 210 (Evonik Industries AG); A: Oberfläche der TEGOTOP[®] 210-Beschichtung, B: Oberfläche der Fehlstelle (Beschichtung abgewischt).

Die Fehlstellen wiesen eine durchschnittliche Länge von 2 cm, eine Breite von durchschnittlich 6 mm und eine Tiefe von ca. 6,5 μm auf.

Muster-Glasoberfläche „White Frost[®]“ mit Lotus-Effect[®]

Die Generierung von Fehlstellen auf der Muster-Glasoberfläche „White Frost[®]“ mit Lotus-Effect[®] erwies sich im Vergleich zu den zuvor verwendeten Testoberflächen als schwieriger. Der Ansatz, die Fehlstellen mechanisch auf die Oberflächen zu bringen, brachte nicht den gewünschten Erfolg. Deshalb wurde die Strukturierung der Muster-Glasoberfläche chemisch entfernt (siehe Kapitel 3.2.4). Mit dieser Methode war die Generierung definierter Fehlstellen möglich. Mit Hilfe der Ätz-Lösung konnten große Teile der groben Strukturen und der darüberliegenden feinen Strukturierungen der Testoberfläche abgetragen

werden (Abbildung 78). Nach der Behandlung blieb in den Fehlstellen nur eine geringe Strukturierung zurück. Die hierarchische Strukturierung der ursprünglichen, intakten Oberfläche wurde erfolgreich entfernt.

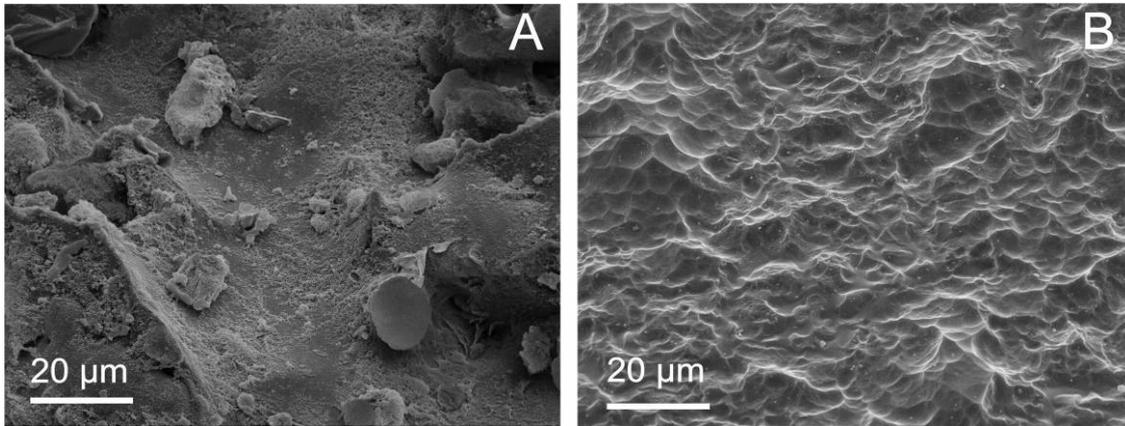


Abbildung 77: REM-Aufnahmen einer strukturierten Muster-Glasoberfläche „White Frost“ mit Lotus-Effect® (Ferro GmbH). A: unbeschädigte Oberfläche, B: Oberfläche der Fehlstelle (mit Ätz-Lösung behandelt).

Die Größe der quadratischen Fehlstellen betrug im Durchschnitt 1 x 1 cm, die Tiefe durchschnittlich 19 µm.

Die generierten Fehlstellen auf den drei verschiedenen Testsystemen unterschieden sich in der Länge, Breite und Tiefe. Dabei wies die Kupferfolie die kleinsten und die „White Frost“ Glasoberfläche die größten Fehlstellen auf.

Mit diesen Testsystemen standen nun drei verschiedene superhydrophobe technische Oberflächen mit Fehlstellen zur Verfügung, an denen in den folgenden Untersuchungen die Auswirkungen von definierten Fehlstellen auf die Selbstreinigung untersucht werden konnten.

4.6.2 Auswirkungen auf die Superhydrophobie

Die Auswirkungen von Fehlstellen auf die Superhydrophobie von verschiedenen technischen Oberflächen wurden mit vergleichenden Kontakt- und Abrollwinkelmessungen auf unbeschädigten und beschädigten strukturierten Oberflächenbereichen untersucht.

TEGOTOP® 210

Die durchschnittlichen Kontaktwinkel auf den unbeschädigten Bereichen und den Fehlstellen der TEGOTOP® 210-Beschichtung unterschieden sich signifikant (Abbildung 79).

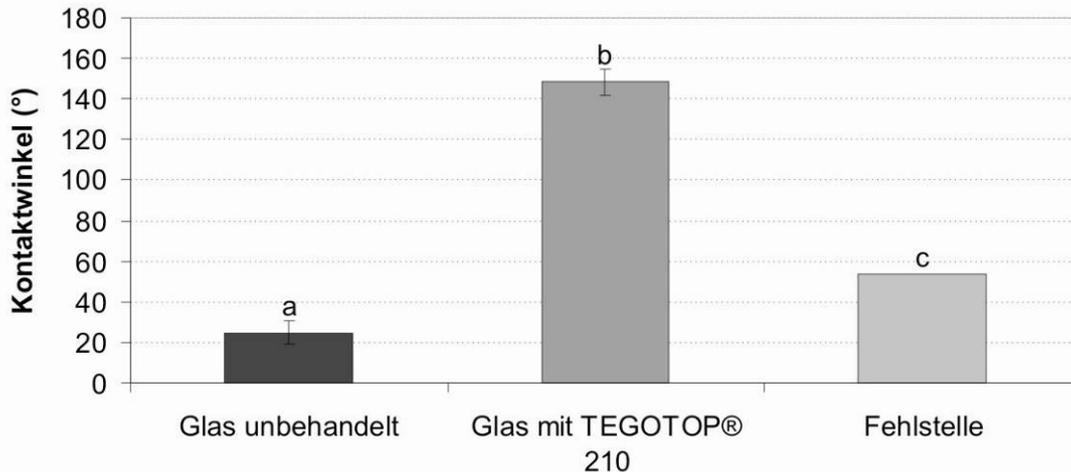


Abbildung 78: Kontaktwinkel von Wasser auf unbehandeltem Glas (Dunkelgrau), auf Glas beschichtet mit TEGOTOP® 210 (Evonik Industries AG, Grau) und auf einer Fehlstelle in der TEGOTOP® 210-Beschichtung (Hellgrau). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Das unbehandelte Glas wies mit 25° den niedrigsten durchschnittlichen Kontaktwinkel auf. Auf der strukturierten TEGOTOP® 210-Beschichtung wurde ein durchschnittlicher Kontaktwinkel von 148° gemessen. Die Kontaktwinkel in den Fehlstellen der TEGOTOP® 210-Beschichtung waren mit durchschnittlich 54° signifikant niedriger als auf der unbeschädigten Beschichtung. Die Fehlstellen waren hydrophiler als die intakten strukturierten Bereiche der Oberfläche. Jedoch wiesen die Fehlstellen nicht die Hydrophilie der unbehandelten Glasoberfläche auf.

Die Beschädigung der strukturierten superhydrophoben TEGOTOP® 210-Oberfläche zeigte auch signifikante Auswirkungen auf die durchschnittlichen Abrollwinkel der untersuchten Oberflächen (Abbildung 80).

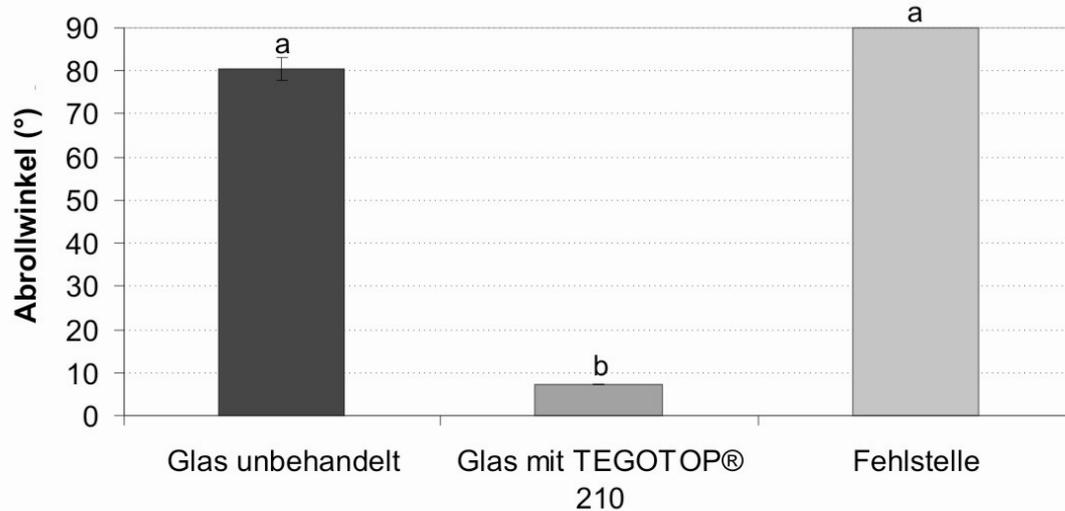


Abbildung 79: Abrollwinkel von Wasser auf unbehandeltem Glas (Dunkelgrau), auf Glas beschichtet mit TEGOTOP® 210 (Evonik Industries AG, Grau) und auf einer Fehlstelle in der TEGOTOP® 210-Beschichtung (Hellgrau). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Der durchschnittliche Abrollwinkel auf der unbehandelten Glasoberfläche betrug 81°. Der durchschnittliche Abrollwinkel auf der unbeschädigten TEGOTOP® 210-Oberfläche unterschied sich mit 7° signifikant von den gemessenen Abrollwinkeln auf der unbehandelten Glasoberfläche. Auf der Fehlstelle wurde ein durchschnittlicher Abrollwinkel von über 90° gemessen, d. h. die Wassertropfen rutschten auch bei einer Neigung der Oberfläche von 90° nicht von dieser ab. Der durchschnittliche Abrollwinkel unterschied sich nichtsignifikant vom durchschnittlichen Abrollwinkel auf der unbehandelten Glasoberfläche und signifikant vom durchschnittlichen Abrollwinkel, gemessen auf der unbeschädigten TEGOTOP® 210-Beschichtung.

Muster-Glasoberflächen „White Frost“ mit Lotus Effect®

Auf den Fehlstellen der Muster-Glasoberflächen wurde ein signifikant niedriger durchschnittlicher Kontaktwinkel gemessen als auf dem unbeschädigten Bereich (Abbildung 81).

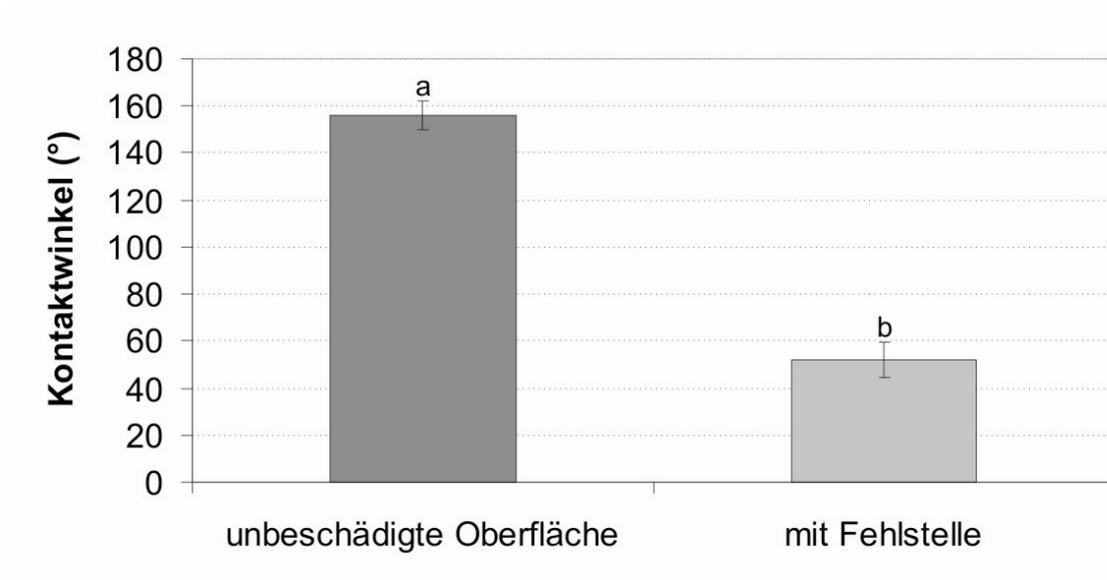


Abbildung 80: Kontaktwinkel von Wasser auf Muster-Glasoberflächen „White Frost[®]“ mit Lotus-Effect[®] (Ferro GmbH, Grau) und auf Fehlstellen (Hellgrau). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Die unbeschädigten strukturierten Oberflächenbereiche der Muster-Glasoberflächen wiesen einen durchschnittlichen Kontaktwinkel von 156° auf. Nach der Zerstörung der Oberflächenstrukturierung wurde auf diesen Fehlstellen ein durchschnittlicher Kontaktwinkel von 52° gemessen.

Auch die Abrollwinkel auf den unbeschädigten Oberflächenbereichen und den Fehlstellen wiesen einen signifikant unterschiedlichen Mittelwert auf (Abbildung 82).

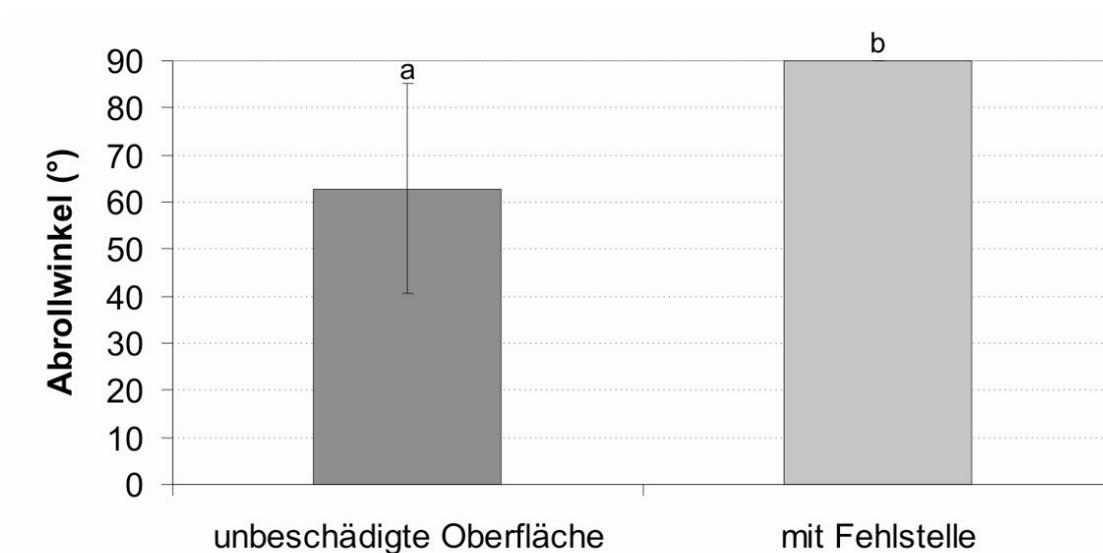


Abbildung 81: Abrollwinkel von Wasser auf Muster-Glasoberflächen „White Frost®“ mit Lotus-Effect® (Ferro GmbH, Grau) und auf Fehlstellen (Hellgrau). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Auf der unbeschädigten Muster-Glasoberfläche wurde ein durchschnittlicher Abrollwinkel von 63° gemessen. Auf der Fehlstelle in der Oberfläche rutschten die Wassertropfen auch bei einer Neigung von 90° nicht ab.

Insgesamt wurde durch das Einbringen von Fehlstellen auf den untersuchten superhydrophoben Testoberflächen die Superhydrophobie zerstört, d. h. die Fehlstellen wiesen einen signifikant niedrigeren Kontaktwinkel und einen signifikant höheren Abrollwinkel als die unbeschädigten Bereiche der Oberflächen auf.

4.6.3 Zusammenhang zwischen dem Kontaminationsgrad und der Fluoreszenz

Es sollte geklärt werden, ob es zwischen dem mit dem Puls-Amplituden modulierten Fluorometer (PAM) gemessenen Fluoreszenzsignal und der Redwop™-Partikelbelegung auf Oberflächen einen Zusammenhang gibt (siehe Kapitel 3.2.6). Es zeigte sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Fluoreszenz der Kontaminationspartikel und der tatsächlichen Kontamination auf den untersuchten Oberflächen (Abbildung 83).

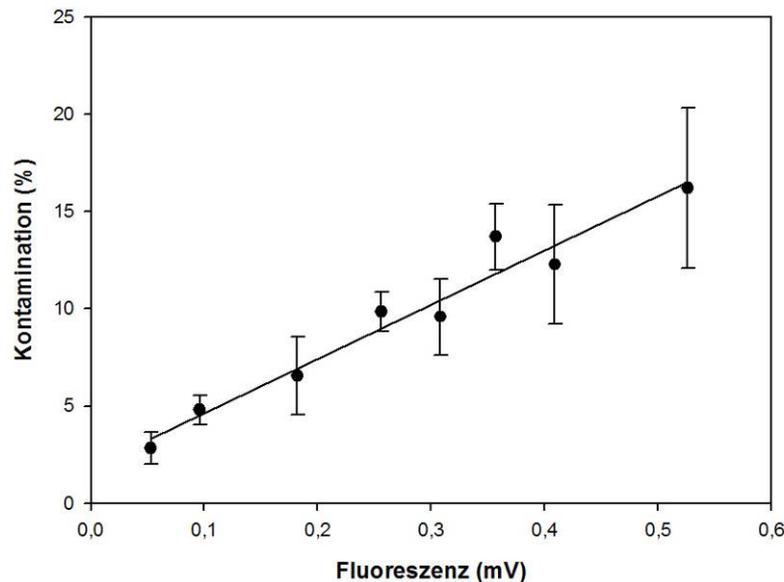


Abbildung 82: Zusammenhang zwischen der Kontamination von Glasoberflächen (Anteil der weißen Pixel an der Pixel-Gesamtzahl der REM-Aufnahme in %) mit RedwopTM und dem Fluoreszenzsignal (gemessen mit dem PAM in mV). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. schwarze Kurve: Lineare Regression der Mittelwerte ($y = mx + b$).

Der lineare Zusammenhang zwischen der gemessenen Fluoreszenz der RedwopTM-Partikel und der prozentualen Kontamination der Glasoberflächen war bei einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,77 hoch. Mit zunehmender Menge an Kontaminationspartikel auf den untersuchten Oberflächen nahm somit das im PAM gemessene Fluoreszenzsignal zu.

4.6.4 Auswirkungen auf die Selbstreinigung

Es wurden die Auswirkungen von Fehlstellen auf die Selbstreinigung strukturierter superhydrophober Oberflächen durch standardisierte Kontamination mit fluoreszierenden RedwopTM-Partikeln und Abreinigung durch Benebelung untersucht (siehe Kapitel 3.2.4). Vor und nach jedem Schritt wurde die Fluoreszenz der auf der Oberfläche befindlichen Kontaminationspartikel mit dem PAM gemessen und quantifiziert (siehe Kapitel 3.2.5). Ziel dieser Untersuchungen war es, Fehlstellen als möglichen Angriffspunkt für eine Reparaturdispersion zu identifizieren und zu nutzen.

Hydrophobierte Kupferoberfläche

Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der durchschnittlichen prozentualen Restfluoreszenz der Kontaminationspartikel nach Kontamination und Benebelung zwischen den unbeschädigten Kupferoberflächen und den Kupferoberflächen mit Fehlstellen (Abbildung 84).

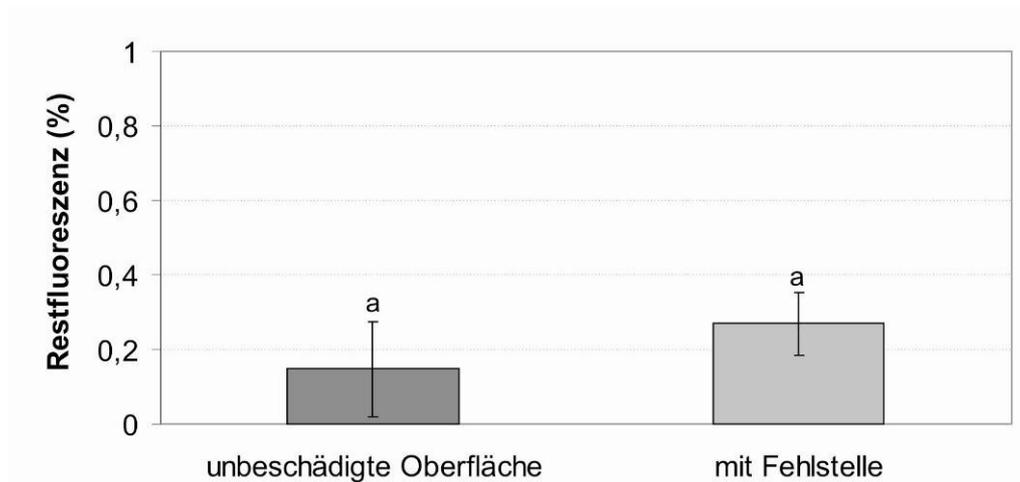


Abbildung 83: Restfluoreszenz (in %) von Redwop™ auf unbeschädigten hydrophobierten Kupferoberflächen (Bolta-Werke GmbH, Dunkelgrau) und hydrophobierten Kupferoberflächen mit Fehlstellen (Hellgrau) nach Kontamination und anschließender Benebelung (bei Lagerung der Proben von 45°). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 5 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Bei einer Lagerung von 45° ist auf den beschädigten Kupferoberflächen noch eine Restfluoreszenz der Kontaminationspartikel von ca. 0,3 % im PAM zu messen. Durch die Abreinigung der Oberflächen nahm die Fluoreszenz um ca. 99,7 % ab. Die Abreinigung einer unbeschädigten Kupferoberfläche ist mit 99,9 % Fluoreszenzabnahme nichtsignifikant höher als auf den beschädigten Oberflächen. Die Restfluoreszenz auf den unbeschädigten Kupferoberflächen betrug 0,15 %. Daraus folgt, dass die gitterartigen Fehlstellen auf den Kupferoberflächen keine signifikanten Auswirkungen auf die Selbstreinigungsfähigkeit der Oberflächen hatten. Die Kupferoberflächen wurden deshalb nicht für die weiteren quantitativen Selbstreinigungsmessungen, sondern aufgrund der leichten Verfügbarkeit dieser Oberfläche ausschließlich für qualitative Untersuchungen der Benetzungseigenschaften von Testdispersionen genutzt.

TEGOTOP® 210

Um die Auswirkungen von Fehlstellen auf den mit TEGOTOP® 210 beschichteten Glasoberflächen deutlicher herauszustellen, wurde der Winkel der Lagerung von 45° auf 30° reduziert, um die Beschleunigung der über der Oberfläche rutschenden Wassertropfen auf der Oberfläche zu reduzieren. Außerdem wurden großflächige Fehlstellen in die TEGOTOP® 210-Beschichtung eingebracht (siehe Kapitel 4.6.1).

Der Vergleich zwischen den unbeschädigten Oberflächen und den Oberflächen mit Fehlstellen zeigten signifikante Unterschiede in der durchschnittlichen prozentualen Restfluoreszenz auf diesen Oberflächen (Abbildung 85).

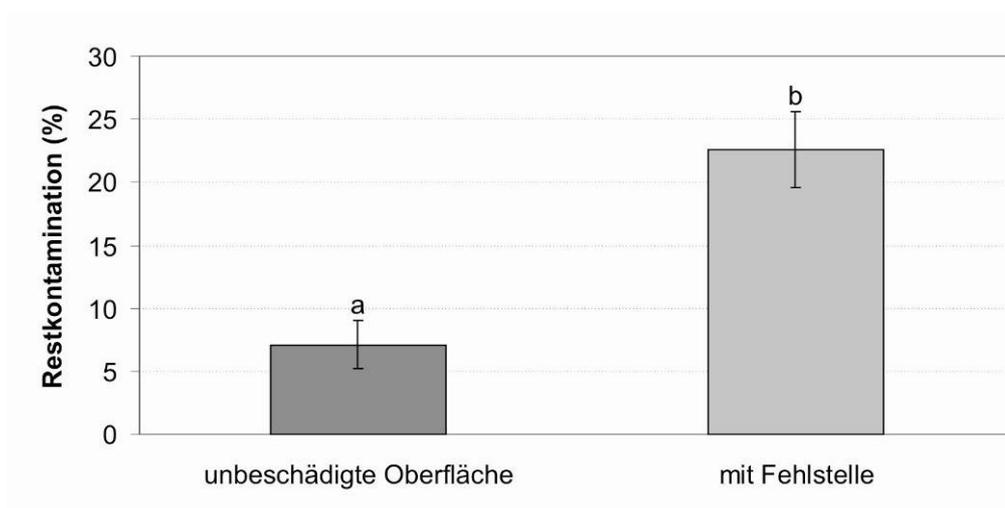


Abbildung 84: Restfluoreszenz (in %) von Redwop™ auf Glas, beschichtet mit TEGOTOP® 210 (Evonik Industries AG), mit Fehlstellen (Dunkelgrau) und ohne Fehlstellen (Hellgrau) nach Kontamination und anschließender Benebelung (bei einer Lagerung der Proben von 30°). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 4 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Die Restfluoreszenz auf den beschichteten Glasoberflächen mit Fehlstellen betrug 22,6 % der Ausgangsfluoreszenz und war somit signifikant höher als die Restfluoreszenz von 7,1 % auf der unbeschädigten TEGOTOP® 210-Beschichtung. Auf der beschädigten Testoberfläche befanden sich somit mehr Kontaminationspartikel als auf der intakten Oberfläche.

Die Fehlstellen in den TEGOTOP® 210-Oberflächen zeigten demnach eine deutliche negative Auswirkung auf die Selbstreinigungsfähigkeit dieser Ober-

flächen. Die TEGOTOP[®] 210-Beschichtung erwies sich somit als Testsystem für die quantitativen Untersuchungen der Selbstreinigungsfähigkeit geeignet.

Muster-Glasoberflächen „White Frost[®]“ mit Lotus Effect[®]

Es konnten signifikante Unterschiede in der durchschnittlichen prozentualen Restfluoreszenz zwischen den unbeschädigten Oberflächen und den Oberflächen mit Fehlstellen nach Kontamination und Benebelung gemessen werden (Abbildung 86).

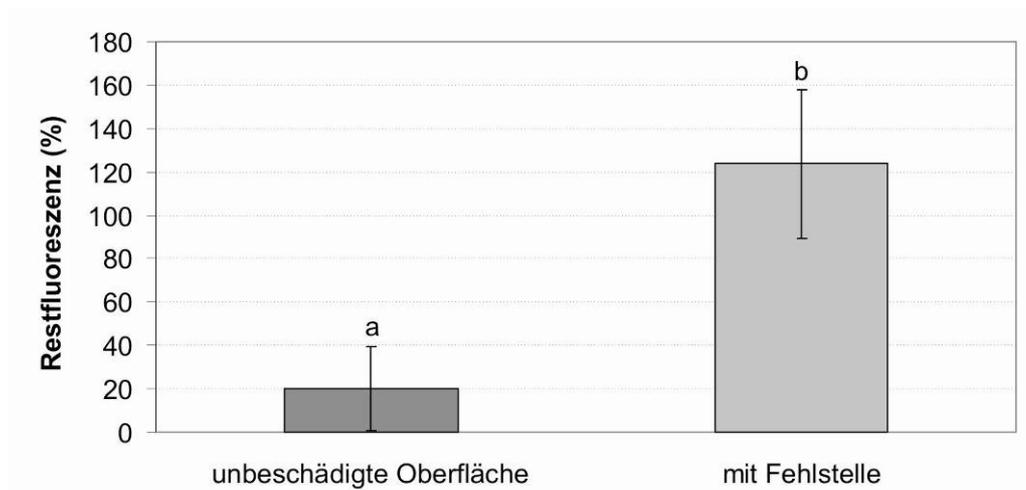


Abbildung 85: Restfluoreszenz (in %) von Redwop[™] in Fehlstellen (Hellgrau) und unbeschädigten Bereichen (Dunkelgrau) auf Muster-Glasoberflächen „White Frost[®]“ mit Lotus-Effect[®] (Ferro GmbH) nach Kontamination und anschließender Benebelung (bei einer Lagerung der Proben von 30°). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 7 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Nach der Benebelung waren nur noch durchschnittlich 20,1 % der Fluoreszenz auf den unbeschädigten Oberflächen zu messen. Somit wurde ein Großteil der Fluoreszenz verursachenden Redwop[™]-Partikel durch die Benebelung abgewaschen. Die Fehlstellen wiesen mit 123,6 % eine höhere Fluoreszenz auf als vor der Beneblung. Ursache hierfür ist die Ansammlung von Kontaminationspartikeln von umliegenden Oberflächenbereichen außerhalb des Messbereiches in den Fehlstellen durch Wassertropfen, die nach der Benebelung aufgrund der geringen Neigung in den Fehlstellen hängen geblieben und dort eingetrocknet sind. Auch diese superhydrophobe Muster-Oberfläche zeigte

sich als als Testsystem für die quantitativen Untersuchungen der Selbstreinigungsfähigkeit geeignet.

4.7 Auswirkungen der Benetzung von unterschiedlichen Tensiden auf superhydrophobe Oberflächen

Als Grundsubstanz für eine Regenerationsdispersion, mit der es möglich ist, Fehlstellen zu hydrophobieren, die zerstörten Oberflächenstrukturen zu regenerieren und die Selbstreinigungsfähigkeit wiederherzustellen, sollte eine geeignete Trägerdispersion aus Tensiden ausfindig gemacht werden. Diese Trägerdispersion sollte speziell in den Fehlstellen einer superhydrophoben Oberfläche haften, um zusätzlich hinzugefügte, strukturgebende Partikel erfolgreich in die Fehlstellen zu transportieren und dort zu stabilisieren.

Um das passende Tensid für die Trägerdispersion zu finden, wurden zunächst Tenside und Tensid-Dispersionen verschiedener Klassen (unterschiedlichen Ladungen der polaren Gruppe) auf ihren Einfluss auf die Superhydrophobie und Selbstreinigung von strukturierten superhydrophoben Oberflächen untersucht. Die Tenside wurden deshalb auf unbeschädigten und beschädigten technischen Oberflächen getestet. Dazu wurden Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect® für 15 Minuten in die verschiedenen Tenside getaucht und getrocknet. Anschließend wurden die Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf diesen behandelten superhydrophoben Oberflächen gemessen (Kapitel 4.7.1). Danach wurden die Oberflächen benebelt, und ein weiteres Mal die Kontakt- und Abrollwinkel gemessen (Kapitel 4.7.2). Außerdem wurden Kontaminationsversuche mit den in den Tensiden getauchten Oberflächen durchgeführt (Kapitel 4.7.3). Zusätzlich wurde das Benetzungsverhalten verschiedener Tensid-Dispersionen, die nach den vorherigen Ergebnissen von der Evonik Industries AG angefertigt wurden, auf beschädigten superhydrophoben Oberflächen untersucht (Kapitel 4.7.4).

4.7.1 Auswirkungen auf die Superhydrophobie

Kontaktwinkel

Das vorherige Eintauchen der Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect[®] in die Tenside TEGOTENS[®] EC 11 und TEGOTENS[®] B 810 hat einen signifikanten Einfluss auf den Kontaktwinkel (Abbildung 87).

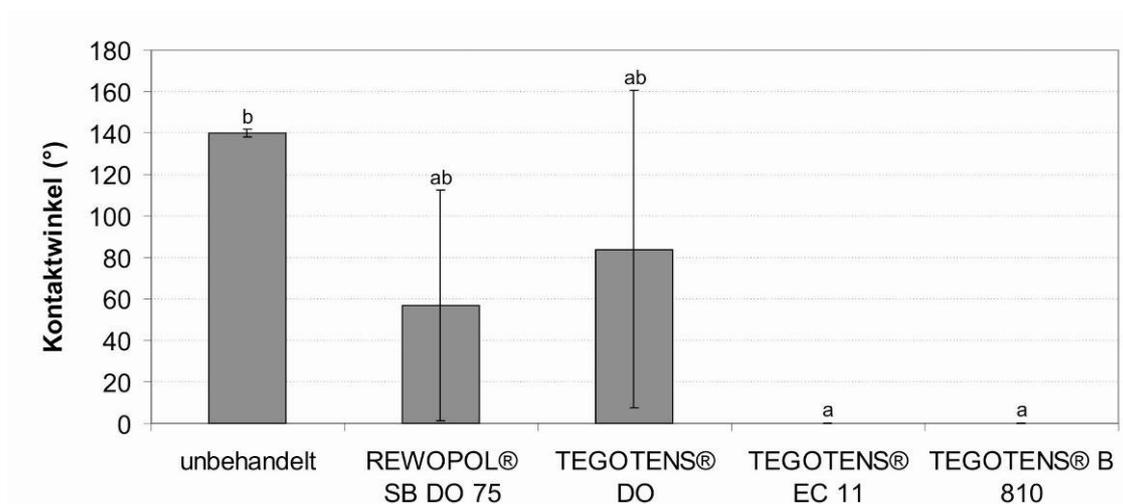


Abbildung 86: Messung der Kontaktwinkel von Wasser auf Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect[®] (Kunststoff-Institut Lüdenscheid), die zuvor in verschiedene Tenside getaucht und anschließend getrocknet wurden. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 5 Parallelen bei den Tensid-behandelten Oberflächen und 12 Messungen bei den unbehandelten Oberflächen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Auf den nicht mit einem Tensid behandelten (unbehandelte) Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect[®] wurde ein durchschnittlicher Kontaktwinkel von 140° gemessen. Das Eintauchen der superhydrophoben Muster-Kunststoffoberfläche in das anionische Tensid REWOPOL[®] SB DO 75 setzte den Kontaktwinkel nichtsignifikant auf durchschnittlich 57° herab. Auch das Eintauchen der Oberflächen in das kationische Tensid TEGOTENS[®] DO veränderte den Kontaktwinkel nichtsignifikant. So wurde nach dieser Behandlung auf den Oberflächen ein durchschnittlicher Kontaktwinkel von 84° gemessen. Das Eintauchen der Muster-Kunststoffoberflächen in TEGOTENS[®] EC 11, einem nichtionischen Tensid, und TEGOTENS[®] B 810, einem kationischen Tensid, zeigten im Vergleich zur unbehandelten Kunststoffoberfläche einen

signifikanten Einfluss auf die gemessenen Kontaktwinkel. Die Wassertropfen spreiteten sofort auf diesen Oberflächen.

Abrollwinkel

Das vorherige Eintauchen der Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect[®] in die Tenside TEGOTENS[®] EC 11 und TEGOTENS[®] B 810 zeigte einen signifikanten Einfluss auf den Abrollwinkel (Abbildung 88).

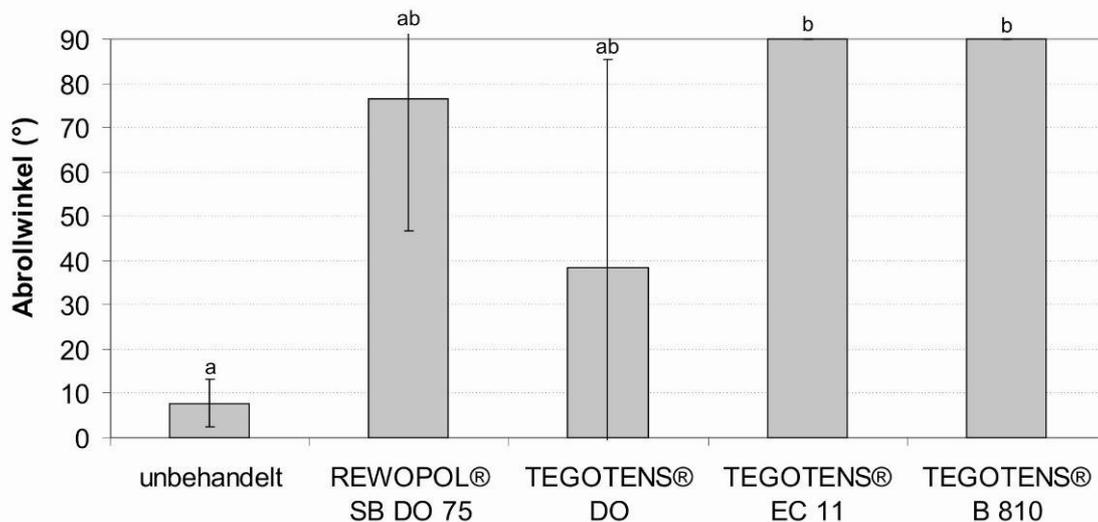


Abbildung 87: Messung der Abrollwinkel von Wasser auf Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect[®] (Kunststoff-Institut Lüdenscheid), die zuvor in verschiedene Tenside getaucht und anschließend getrocknet wurden. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 5 Messungen bei den Tensid-behandelten Oberflächen und 12 Messungen bei den unbehandelten Oberflächen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

So rutschten auf den in TEGOTENS[®] EC 11 und TEGOTENS[®] B 810 eingetauchten Muster-Kunststoffoberflächen auch bei einem Neigungswinkel der Oberflächen von über 90° keine Wassertropfen ab, da das Wasser auf diesen Oberflächen die Oberflächen komplett benetzte. Der durchschnittliche Abrollwinkel auf den unbehandelten Muster-Kunststoffoberflächen war mit 8° sehr niedrig. Das vorherige Eintauchen der Oberflächen in die Tenside REWOPOL[®] SB DO 75 und TEGOTENS[®] DO hatte einen nichtsignifikanten Einfluss auf den durchschnittlichen Abrollwinkel auf diesen Oberflächen. So wurde nach Behandlung der Oberfläche mit dem anionischen Tensid REWOPOL[®] SB DO 75 ein durchschnittlicher Abrollwinkel von 77° gemessen. Der Abrollwinkel auf

der mit kationischem Tensid TEGOTENS® DO behandelten Kunststoffoberfläche betrug im Mittel 38°.

Insgesamt zeigen die verwendeten Tenside einen unterschiedlich großen Einfluss auf das Benetzungsverhalten der Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect®. Die untersuchten anionischen und kationischen Tenside REWOPOL® SB DO 75 und TEGOTENS® DO hatten einen nichtsignifikanten Einfluss auf das Benetzungsverhalten der superhydrophoben Oberflächen. Die nichtionischen und kationischen Tenside TEGOTENS® EC 11 und TEGOTENS® B 810 zeigten dagegen einen signifikanten Einfluss auf das Benetzungsverhalten der Muster-Kunststoffoberflächen.

4.7.2 Haltbarkeit der Auswirkungen auf die Superhydrophobie

Nach Benebelung der tensidbehandelten Kunststoffoberflächen wurden die Messungen der Kontakt- und Abrollwinkel wiederholt.

Kontaktwinkel

Es zeigte sich mit Ausnahme der unbehandelten Oberfläche und der mit TEGOTENS® DO behandelten Oberfläche eine signifikante Erhöhung der durchschnittlichen Kontaktwinkel nach der Benebelung (Abbildung 89).

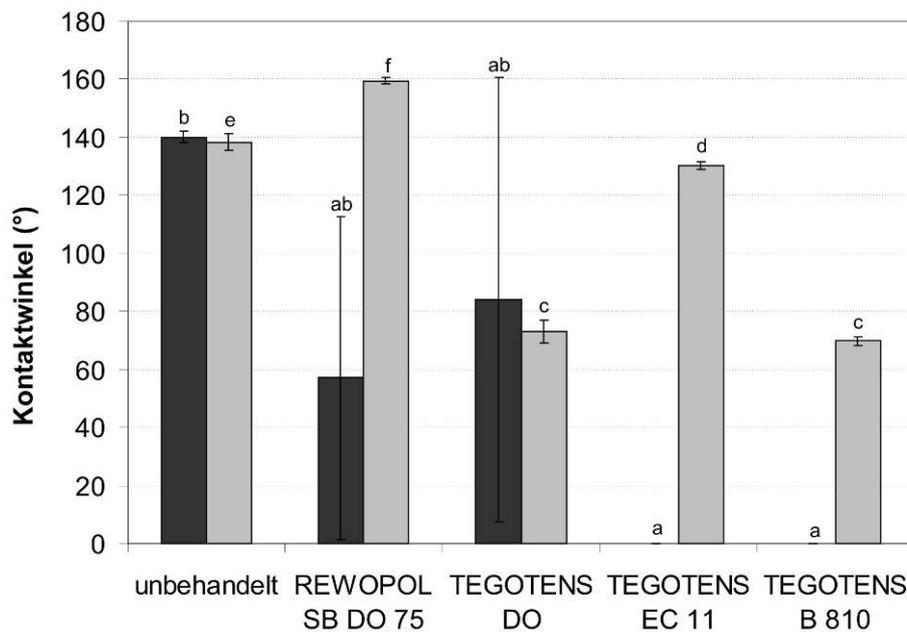


Abbildung 88: Messung der Kontaktwinkel von Wasser auf Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect® (Kunststoff-Institut Lüdenscheid), die in verschiedene Tenside getaucht und anschließend getrocknet wurden; Dunkelgrau: Messung vor Kontamination und Benebelung, Hellgrau: Messung nach Kontamination und Benebelung; Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 12 Messungen bei der unbehandelten Kunststoffoberfläche und 5 Messungen bei den tensidgetauchten Oberflächen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Der Kontaktwinkel auf den mit REWOPOL® SB DO 75 behandelten Oberflächen stieg von durchschnittlich 57° nach der Benebelung auf 159°. Die Kontaktwinkel auf den in TEGOTENS® EC 11 und TEGOTENS® B 810 eingetauchten Oberflächen stiegen von jeweils 0° auf 130° und 70° im Mittel. Auf den mit TEGOTENS® DO behandelten Oberflächen änderte sich der durchschnittliche Kontaktwinkel signifikant von 84° auf 73° nach der Benebelung. Auf der unbehandelten Kontrolle konnte eine signifikante Änderung des durchschnittlichen Kontaktwinkels von 140° auf 138° nach der Benebelung gemessen werden.

Abrollwinkel

Nach der Benebelung änderte sich der durchschnittliche Abrollwinkel nur auf den Muster-Kunststoffoberflächen, die vorher in dem Tensid REWOPOL® SB DO 75 eingetaucht wurden, signifikant von 77° auf 8° (Abbildung 90).

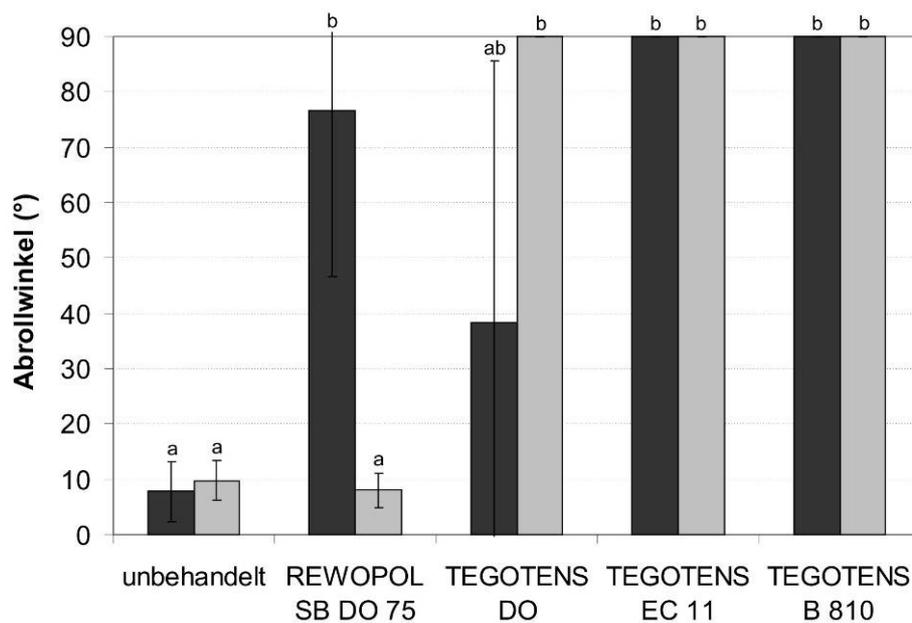


Abbildung 89: Messung der Abrollwinkel von Wasser auf Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect® (Kunststoff-Institut Lüdenscheid), die in verschiedene Tenside getaucht und anschließend getrocknet wurden; Dunkelgrau: Messung vor Kontamination und Benebelung, Hellgrau: Messung nach Kontamination und Benebelung; Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 12 Messungen bei der unbehandelten Kunststoffoberfläche und 5 Messungen bei den tensidgetauchten Oberflächen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Die übrigen Oberflächen zeigten ausschließlich nichtsignifikante Änderungen der durchschnittlichen Abrollwinkel nach der Benebelung. Auf den mit TEGOTENS® DO behandelten Oberflächen wurden nach der Benebelung nichtsignifikant höherer durchschnittlicher Abrollwinkel von über 90° gemessen. Auf diesen Oberflächen rollte das Wasser auch bei einer Neigung von 90° nicht ab. Die Oberflächen, die mit den Tensiden TEGOTENS® EC 11 und TEGOTENS® B 810 behandelt wurden, zeigten nach Benebelung keine Veränderungen bei den Abrollwinkeln von Wasser. Auch vor der Benebelung und danach rollten Wassertropfen auch bei einer Neigung der Proben von 90° nicht ab.

Insgesamt zeigten die untersuchten Tenside einen Einfluss auf der (unbeschädigten) selbstreinigenden superhydrophoben Oberflächen. Die Hydrophobie wurde herabgesetzt, Wasser zeigte niedrigere Kontaktwinkel, die Abrollwinkel waren im Vergleich zur unbehandelten Probe sehr hoch. Die beeinflussende Tensidschicht war aber nicht stabil. Die Benebelung der in die Tenside eingetauchten Oberflächen zeigte eine Abnahme der Tensid-Wirkungen.

4.7.3 Auswirkungen auf die Selbstreinigung

Die tensidbehandelten Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect® wurden einem Kontaminationstest mit fluoreszierenden Redwop™-Partikeln unterzogen, um die Auswirkungen einer Tensidbehandlung von superhydrophoben Oberflächen auf die Selbstreinigungsfähigkeit zu untersuchen.

Ausschließlich die zuvor in das Tensid TEGOTENS® DO eingetauchten Muster-Kunststoffoberflächen zeigten einen signifikanten Unterschied in der Selbstreinigung im Vergleich zu den unbehandelten Muster-Kunststoffoberfläche (Abbildung 91).

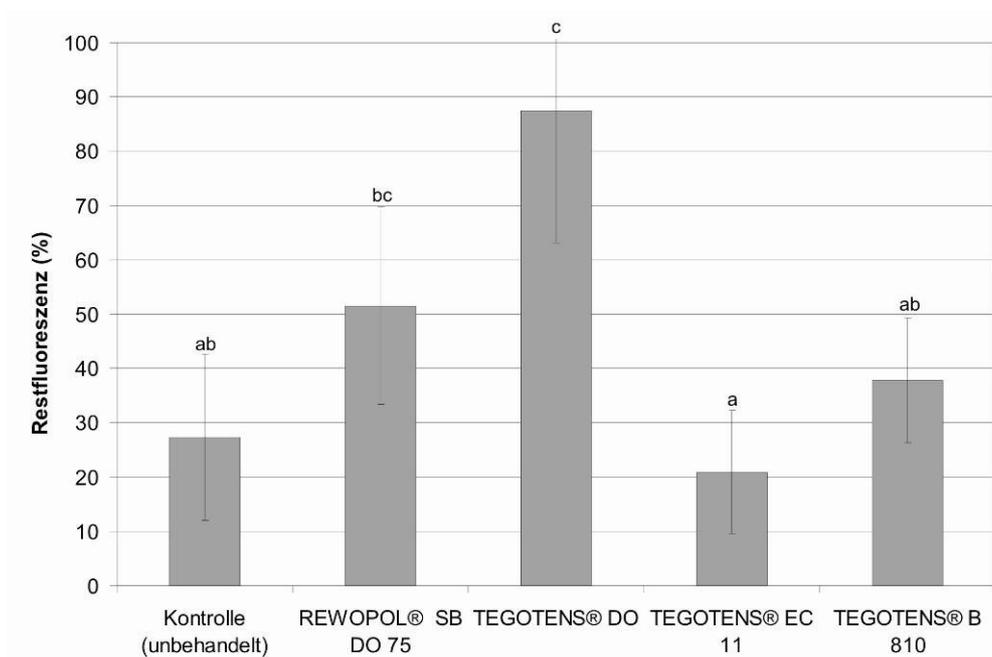


Abbildung 90: Restfluoreszenz (in %) von Redwop™ auf den mit Tensiden behandelten Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect® (Kunststoff-Institut Lüdenscheid) nach Kontamination und anschließender Benebelung (bei einer Lagerung der Proben von 45°). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 5 Messungen bei den Tensid-behandelten Oberflächen und 12 Messungen bei den unbehandelten Oberflächen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Auf den unbehandelten superhydrophoben Muster-Kunststoffoberflächen nahm die durchschnittliche Fluoreszenz der Kontaminationspartikel nach der Benebelung um 72,67 % ab. Die Behandlung dieser Kunststoffoberflächen mit dem Tensid TEGOTENS® EC 11 führte trotz der veränderten Chemie der Oberflächen zu keiner signifikanten Änderung der Selbstreinigungsfähigkeit der Oberfläche. Bei den zuvor in TEGOTENS® EC 11 eingetauchten Oberflä-

chen wurde nach der Benebelung eine durchschnittliche Restfluoreszenz von 20,91% gemessen. Somit nahm die Fluoreszenz um durchschnittlich 79,09 % ab. Die Behandlung der Kunststoffoberflächen mit den Tensiden REWOPOL[®] SB DO 75 und TEGOTENS[®] DO führte im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle zu einer Verschlechterung der Selbstreinigungsfähigkeit der Oberflächen. Auf den zuvor in REWOPOL[®] SB DO 75 eingetauchten Oberflächen wurden durchschnittlich 51,56 % der Partikel-Fluoreszenz gemessen, auf den mit TEGOTENS[®] DO behandelten Oberflächen wurde nach der Benebelung durchschnittlich 87,35 % der Fluoreszenz gemessen. Nur das vorherige Eintauchen der Muster-Kunststoffoberflächen in TEGOTENS[®] DO führte zu einer signifikanten Änderung der Selbstreinigungsfähigkeit dieser Oberflächen. Die in das kationische Tensid TEGOTENS[®] B 810 eingetauchten Kunststoffoberflächen zeigten nach Benebelung keine signifikante Änderung in der Selbstreinigung. Es wurde eine durchschnittliche Restfluoreszenz von 37,89 % gemessen.

Die untersuchten Tenside, die sich in den Ladungen der polaren Kopfgruppe deutlich voneinander unterscheiden, zeigten im Einzelnen große Unterschiede in der Beeinflussung der superhydrophoben Oberfläche. Die nichtionischen und kationischen Tenside zeigten insgesamt einige für eine Reparaturdispersion erwünschte Eigenschaften. So wiesen die Oberflächen, die zuvor in die Tenside TEGOTENS[®] EC 11 (nichtionisch) und TEGOTENS[®] B 810 (kationisch) eingetaucht wurden, im Vergleich zu den anderen behandelten Oberflächen die geringste Restkontamination nach Benebelung, trotzdem zeigten diese Tenside auch den größten negativen Einfluss auf den Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser. Das Eintauchen der superhydrophoben Oberfläche in das kationische Tensid TEGOTENS[®] DO zeigte zwar den größten Einfluss auf die Selbstreinigung dieser Oberfläche, aber den geringsten Einfluss auf den Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser vor Benebelung.

4.7.4 Benetzung von Fehlstellen

Aufgrund der oben dargestellten Ergebnisse wurden in den nachfolgenden Versuchen neue, speziell zusammengesetzte nichtionische und kationische Tensid-Dispersionen verwendet (siehe Kapitel 3.1.4). Einigen dieser Tensid-Dispersionen wurden zusätzlich TEGOTENS[®] B 810 hinzugefügt (tu0920b und

tu0921b), da es in weiteren Versuchen die Fehlstellen auf hydrophobierten Kupferoberflächen auffüllte (siehe Kapitel 4.9.1). Diese Tensid-Dispersionen waren amphoter.

Im REM zeigten die Tensid-Dispersionen ein unterschiedliches Benetzungsverhalten auf den unbeschädigten Bereichen und in den gitterartigen Fehlstellen der superhydrophoben Kupferoberflächen (Abbildung 92).

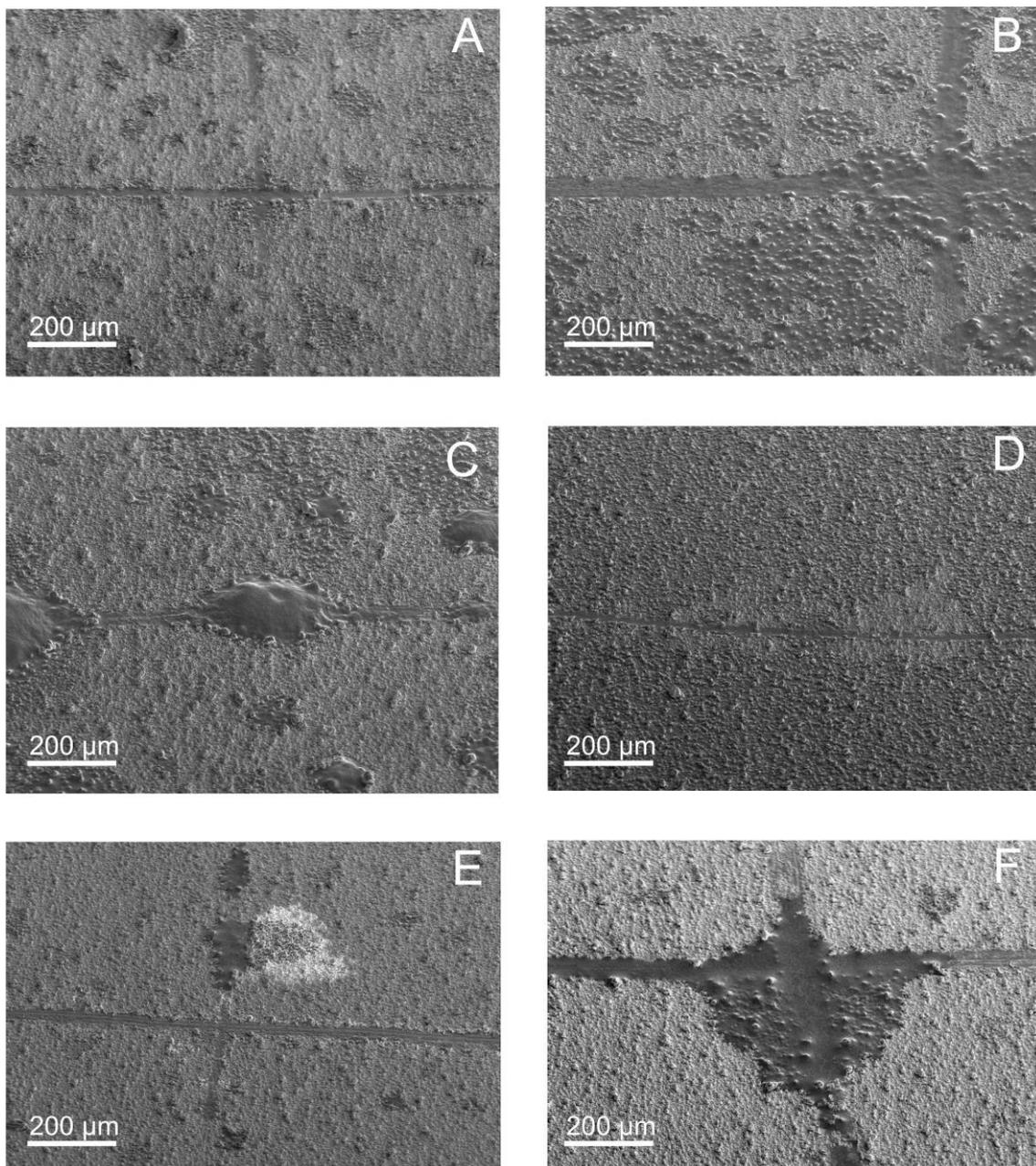


Abbildung 91: REM-Aufnahmen von hydrophobierten strukturierten Kupferoberflächen, in die gitterartige Fehlstellen eingebracht und anschließend mit unterschiedlichen Tensid-Dispersionen besprüht wurden. A: mit tu0920a besprüht, B: mit tu0921a besprüht, C: mit tu0920b besprüht, D: mit tu0921b besprüht, E: mit 1%ger kationischer Dispersion besprüht, F: mit 5%ger kationischer Dispersion besprüht.

Die Tropfen der nichtionischen Tensid-Dispersionen tu0920a und tu0921a waren über die gesamte Oberfläche verteilt, bedeckten die Oberflächenstrukturierung der Kupferfolie so, dass sich die Strukturen unter der Tensidschicht abzeichneten (Abbildung 92 A und B). Eine spezifische Spreitung von Tropfen, die zufällig in die Fehlstelle gelangten, konnte bei beiden Tensid-Dispersionen nicht beobachtet werden.

Die amphoteren Tensid-Dispersionen zeigten ein im Vergleich zu den nichtionischen Tensid-Dispersionen deutlich verändertes Benetzungsverhalten. Die Dispersion tu0920b zeigte die für die Auftragungsart des Sprühens typische Verteilung der Tropfen (Abbildung 92 C). Die eingetrockneten Tropfen überdeckten die Oberflächenstrukturen der Kupferfolie komplett.

Die Tensid-Dispersion tu0921b benetzte die Kupferoberfläche fast vollständig (Abbildung 92 D). Diese Tensidschicht war jedoch so dünn, dass sich die Strukturierung unter ihr abzeichnete. Nur einzelne Bereiche der Oberfläche sind nicht von der Tensid-Dispersion überdeckt worden.

Gelangte ein Tropfen der kationischen Dispersion in eine Fehlstelle, so konnte eine spezifisches Spreiten in den Fehlstellen beobachtet werden (Abbildung 92 E und F). Der Tropfen diente dabei als Reservoir. Die Spreitung des Tensidtropfens erfolgte hauptsächlich entlang der Fehlstellen (vergleiche Abbildung 92 B und D). Die kationische Dispersion zeigte somit sowohl in der 1%igen Verdünnung, als auch in der 5%igen Verdünnung ein für eine Reparaturdispersion wünschenswertes selektives Benetzungsverhalten.

Die kationische Dispersion wies jedoch eine geringe Stabilität auf. So kam es zur Agglomeration von eingebrachten, strukturgebenden Partikeln dieser Dispersion. Deshalb wurde in den folgenden Versuchen ein anderes kationisches Tensid als Basis für eine Reparaturdispersion getestet: Die kationische Mikroemulsion Gloss Dryer[®] (Evonik Industries AG).

4.8 Regeneration der Hydrophobie in Fehlstellen durch Gloss Dryer[®]

Die Untersuchungen der Auswirkungen von Tensiden und Tensid-Dispersionen verschiedener Klassen auf strukturierte superhydrophobe Oberflächen, die im letzten Kapitel beschrieben wurden, zeigten, dass besonders

die kationischen Tenside die für eine Trägerdispersion erwünschten Eigenschaften, wie z. B. die das spezifische Spreiten in den Fehlstellen, besitzen. Deshalb wurde in diesem Kapitel die kationische Mikroemulsion Gloss Dryer[®] als möglicher Bestandteil einer Reparaturdispersion untersucht.

Grundlage für die Entwicklung einer Reparaturdispersion war die Hypothese, dass hydrophile Fehlstellen als Ansatzstellen für eine mögliche Regenerationsdispersion dienen können. Bedingung für einen solchen Ansatz war, dass sich die Fehlstellen einer geeigneten Testoberfläche in Ihrer Polarität von den intakten, superhydrophoben Bereichen der Oberfläche absetzen. Die Fehlstellen weisen eine hydrophile Chemie auf und unterscheiden sich so von den intakten (hydrophoben) Bereichen der Oberflächen (siehe Kapitel 4.6.2). Die Tensidbestandteile (Trägerdispersion) in der Reparaturdispersion binden mit ihrer polaren Gruppe an die hydrophilen Bereiche und decken diese ab. Mit ihrer unpolaren Alkylgruppe bildet die Trägerdispersion schließlich eine neue hydrophobe Oberfläche.

Zunächst wurden verschiedene hydrophile Oberflächen auf ihre Eignung als Testoberflächen für die Hydrophobierung mit Gloss Dryer[®] untersucht (Kapitel 4.8.1). Anschließend wurde der Einfluss von Gloss Dryer[®] auf unbeschädigten und beschädigten superhydrophoben Oberflächen gemessen (Kapitel 4.8.2). Außerdem wurden das Benetzungsverhalten und die Haltbarkeit der Mikroemulsion in Fehlstellen auf superhydrophoben Oberflächen untersucht (Kapitel 4.8.3).

4.8.1 Hydrophilie verschiedener Oberflächen (Eignung als Testoberfläche für die Untersuchung von Gloss Dryer[®])

Verschiedene hydrophile Oberflächen wurden mit TEGOTOP[®] 210 strukturiert und hydrophobiert, um eine selbstreinigende Oberfläche zu erzeugen. In diese Beschichtung ließen sich anschließend leicht Fehlstellen einbringen (siehe Kapitel 3.2.4). Es wurden vergleichende Kontakt- und Abrollwinkel-Messungen auf unbehandelte (hydrophile) und mit TEGOTOP[®] 210 behandelte (hydrophobe) Bereiche der Oberflächen durchgeführt (Abbildung 93).

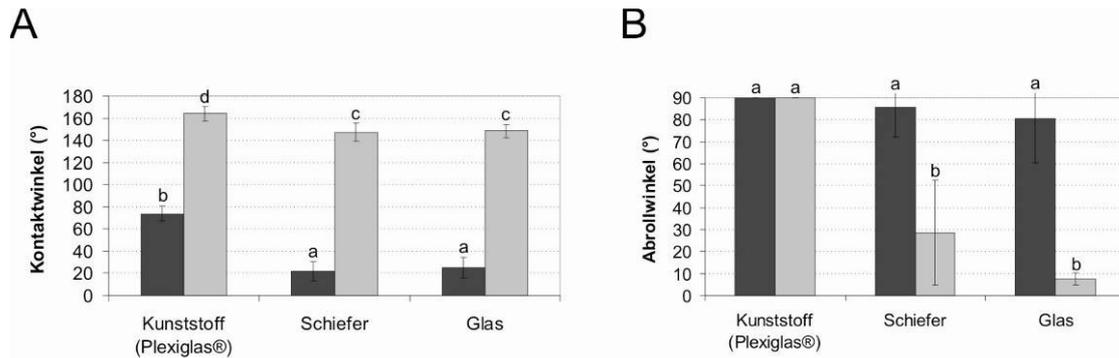


Abbildung 92: Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf verschiedenen hydrophilen Oberflächen, unbehandelt (Dunkelgrau) und mit „Lotus-Effekt[®]“-Aerosol TEGOTOP[®] 210 (Hellgrau) eingesprüht; A: Kontaktwinkel von Wasser auf den Oberflächen, B: Abrollwinkel von Wasser auf den Oberflächen. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Alle untersuchten Oberflächen wiesen vor der Behandlung mit TEGOTOP[®] 210 eine hydrophile Chemie auf (Abbildung 93 A). Es zeigten sich aber signifikante Unterschiede zwischen der Kunststoffoberfläche, auf der ein durchschnittlicher Kontaktwinkel von 74° gemessen wurde, und den Schiefer- und Glasoberflächen mit einem durchschnittlichen Kontaktwinkel von 22° und 25°. Nach Behandlung der hydrophilen Oberflächen mit TEGOTOP[®] 210 wurde ein deutlicher Anstieg des durchschnittlichen Kontaktwinkels auf allen Oberflächen gemessen. Der durchschnittliche Kontaktwinkel von 164°, der auf der Kunststoffoberfläche nach der Beschichtung mit TEGOTOP[®] 210 gemessen wurde, unterschied sich weiterhin signifikant von den durchschnittlichen Kontaktwinkeln auf der beschichteten Schiefer- und Glasoberfläche. Auf der beschichteten Schieferoberfläche wurde ein durchschnittlicher Kontaktwinkel von 147°, auf der beschichteten Glasoberfläche ein durchschnittlicher Kontaktwinkel von 148° gemessen.

Auch die durchschnittlichen Abrollwinkel unterschieden sich signifikant zwischen der Kunststoffoberfläche und der Schiefer- und Glasoberfläche (Abbildung 93 B). Auf der Kunststoffoberfläche wurde ein durchschnittlicher Abrollwinkel von über 90° gemessen, d. h. der Wassertropfen rollte auch bei einer Neigung der Oberfläche von 90° nicht ab. Auf der Schiefer- und der Glasoberfläche wurde jeweils ein durchschnittlicher Abrollwinkel von 86° und 81° gemessen.

Nach der Beschichtung der Oberflächen mit TEGOTOP[®] 210 veränderte sich der durchschnittliche Abrollwinkel auf der Schiefer- und der Glasoberfläche

signifikant (Abbildung 93 B). So sank der durchschnittliche Abrollwinkel auf der Schieferoberfläche auf 29°, auf der Glasoberfläche auf 7°.

Auf der Kunststoffoberfläche blieben die Tropfen trotz Behandlung der Oberfläche mit TEGOTOP® 210 auch bei einer Neigung von 90° noch haften.

Aufgrund der obigen Ergebnisse wurde für die folgenden Versuche als Testoberfläche Glas mit TEGOTOP® 210 als Beschichtung ausgewählt.

4.8.2 Hydrophobierungsleistung und Haltbarkeit von Gloss Dryer®

Die Trägerdispersion als Teil der Reparaturdispersion sollte folgende Anforderungen erfüllen: Zunächst sollte sie selektiv in den Fehlstellen spreiten und dort lokal die Hydrophobie regenerieren. Zusätzlich sollte sie strukturgebende Partikel in die Fehlstellen transportieren und dort die zerstörte Strukturierung regenerieren. Die Mikroemulsion Gloss Dryer® wurde im Folgenden auf ihre Eignung als Trägerdispersion untersucht. Dazu wurde zunächst die Hydrophobierungsleistung von Gloss Dryer® mit vergleichenden Messungen der Kontakt- und Abrollwinkel auf unbeschädigten und beschädigten superhydrophoben Oberflächen untersucht. Danach wurde die Beständigkeit des Einflusses von Gloss Dryer® durch die Beregnung der Oberflächen (siehe Kapitel 3.2.4) und anschließender Kontakt- und Abrollwinkel-Messungen untersucht.

Unbeschädigte superhydrophobe Oberfläche

Das Besprühen der superhydrophoben TEGOTOP® 210-Oberfläche mit Gloss Dryer® führte zu einer nichtsignifikanten Erhöhung des Kontaktwinkel-Mittelwertes von 148° auf 155° (Abbildung 94 A).

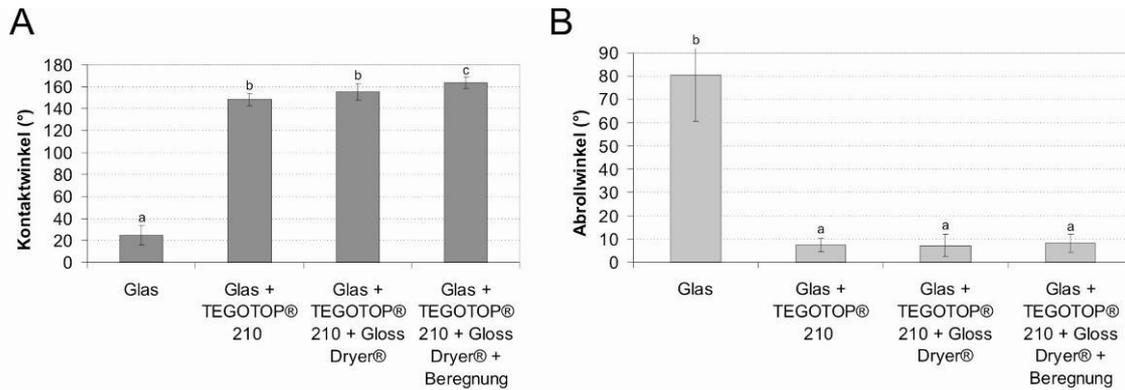


Abbildung 93: Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf unbehandeltem Glas, Glas mit TEGOTOP® 210 besprüht, Glas mit TEGOTOP® 210 und Gloss Dryer® besprüht und Glas mit TEGOTOP® 210 und Gloss Dryer® besprüht und anschließend beregnet (6,18ml/cm², Lagerung der Proben bei 45°). A: Kontaktwinkel von Wasser auf den Oberflächen, B: Abrollwinkel von Wasser auf den Oberflächen. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Dieser durchschnittliche Kontaktwinkel unterschied sich aber signifikant von dem durchschnittlichen Kontaktwinkel von 25°, gemessen auf den unbehandelten Glasoberflächen (vergleiche Kapitel 4.6.2). Nach Beregnung der unbeschädigten Oberfläche zeigt sich ein signifikanter Anstieg des Kontaktwinkels auf durchschnittlich 164°.

Der durchschnittliche Abrollwinkel auf der TEGOTOP® 210-Oberfläche sank nach dem Einsprühen dieser Oberfläche mit Gloss Dryer® nichtsignifikant von 7,38° auf 7,2° (Abbildung 94 B). Diese durchschnittlichen Abrollwinkel waren signifikant niedriger als der durchschnittliche Abrollwinkel, gemessen auf unbehandelten Glasoberflächen (vergleiche Kapitel 4.6.2). Die Beregnung der mit Gloss Dryer® besprühten TEGOTOP® 210-Oberflächen führte zu einer nichtsignifikanten Erhöhung des mittleren Abrollwinkels auf 8°.

Fehlstellen auf superhydrophoben Oberflächen

Das Besprühen einer hydrophilen Fehlstelle mit Gloss Dryer® hat signifikante Auswirkungen auf den durchschnittlichen Kontaktwinkel, nicht aber auf den durchschnittlichen Abrollwinkel auf dieser Fehlstelle (Abbildung 95).

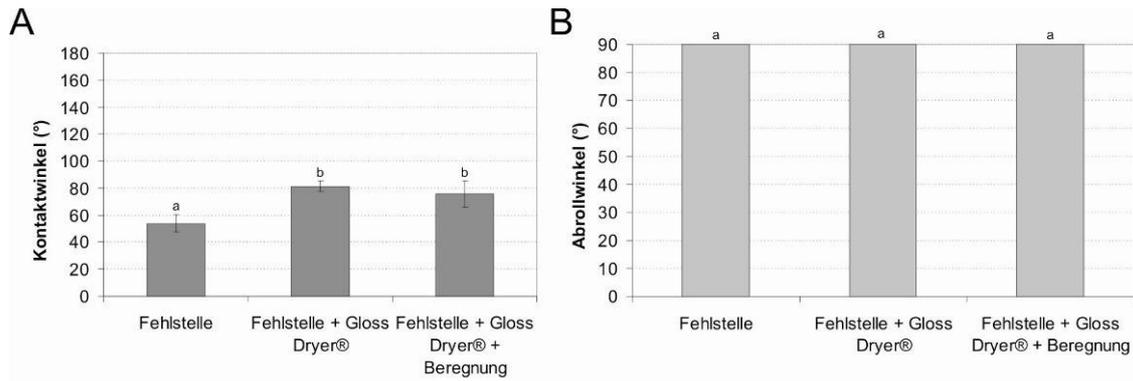


Abbildung 94: Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf einer Fehlstelle in mit TEGOTOP® 210 beschichtetem Glas, einer Fehlstelle mit Gloss Dryer® besprüht und einer Fehlstelle mit Gloss Dryer® besprüht und anschließend beregnet ($6,18\text{ml/cm}^2$, Lagerung der Proben bei 45°). A: Kontaktwinkel von Wasser auf den Oberflächen, B: Abrollwinkel von Wasser auf den Oberflächen. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

So stieg der durchschnittliche Kontaktwinkel auf den Fehlstellen nach Behandlung der beschädigten Oberflächen mit Gloss Dryer® von 54° auf 81° (Abbildung 95 A). Die Beregnung der mit Gloss Dryer® behandelten beschädigten Oberflächen führte zu einer nichtsignifikanten Veränderung des durchschnittlichen Kontaktwinkels auf 76° .

Der durchschnittliche Abrollwinkel von 90° auf den Fehlstellen veränderte sich nach dem Aufsprühen von Gloss Dryer® nicht (Abbildung 95 B). Auch nach der Beregnung wurde auf den Fehlstellen ein durchschnittlicher Abrollwinkel von über 90° gemessen, d. h. die Wassertropfen rollten von diesen Oberflächen nicht ab.

4.8.3 Benetzung von Fehlstellen durch Gloss Dryer®

REM-Aufnahmen von Fehlstellen in der TEGOTOP® 210-Beschichtung der Glasoberfläche, die zuvor mit Gloss Dryer® besprüht worden sind, zeigten eine Abwaschung von Gloss Dryer® nach der Beregnung der Oberflächen (Abbildung 96). Auf den unbeschädigten Bereichen der Oberfläche sind vor der Beregnung gleichmäßig verteilte helle Stellen zu erkennen (Abbildung 96 A). Nach der Beregnung sind diese auf der unbeschädigten Teil der Oberfläche nicht mehr zu erkennen (Abbildung 96 B).

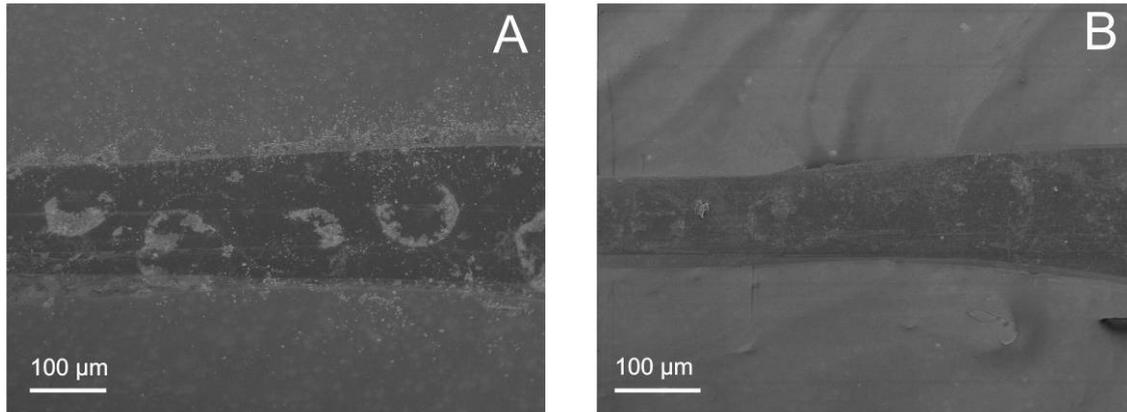


Abbildung 95: REM-Aufnahme einer Fehlstelle in einer mit TEGOTOP® 210 beschichteten Glasoberfläche; A: Die Oberfläche wurde mit Gloss Dryer® eingesprüht, jedoch nicht beregnet; B: Die Oberfläche wurde mit Gloss Dryer® eingesprüht und anschließend beregnet (6,2ml/cm²).

In Abbildung 96 A sind außerdem die angetrockneten Gloss Dryer®-Tropfenränder innerhalb der länglichen Fehlstelle in der Mitte deutlich zu erkennen. Dies sind die für Lösungen typischen Ankonzentrierungen der gelösten Stoffe nach Trocknung. Abbildung 96 B zeigt eine Fehlstelle in der TEGOTOP® 210-Beschichtung nach der Beregnung. Die Ankonzentrierungen sind nicht deutlich zu erkennen. Dies deutet auf ein Abwaschen von Gloss Dryer® nach der Beregnung hin. Während auf den unbeschädigten Bereichen der Oberfläche eine komplette Abwaschung erfolgt ist, sind in den Fehlstellen noch Gloss Dryer®-Reste in Form von schwach erkennbaren Tropfenrändern erkennbar.

4.9 Regeneration der Superhydrophobie durch Wiederherstellung der Strukturierung

In diesem Kapitel werden zunächst die Auswirkungen von Dispersionen, die zusätzlich Partikel enthalten, auf die Benetzung von Fehlstellen untersucht. Dazu wurde im REM das Benetzungsverhalten des Aerosols TEGOTOP® 105, das anorganische Partikel von der Größe mehrerer Nanometer enthält, in Fehlstellen und die Fähigkeit zur Wiederherstellung der Nanostrukturierung in Fehlstellen auf superhydrophoben Oberflächen untersucht (Kapitel 4.9.1). Zusätzlich wurde dem TEGOTOP® 105 das kationische Tensid TEGOTENS® B 810 hinzugegeben und die Benetzung dieser Dispersion auf Fehlstellen im REM betrachtet.

Außerdem wird in diesem Kapitel die Fähigkeit erster Test-Dispersionen, hydrophile Oberflächen zu superhydrophobieren, getestet. Deshalb wurden verschiedene Testdispersionen hergestellt, die neben der kationischen Trägerdispersion Gloss Dryer[®] zusätzlich hydrophobierte Partikel von der Größe mehrerer Mikrometer beinhalten. Es wurden nacheinander Leuchtstoff F20-Partikel, die eine Größe von 2 bis 14 μm aufwiesen, und Silmikron[®]-Partikel mit einer Größe von 0,5 bis 4 μm hinzugegeben. Zusätzlich wurden mit TEGOTOP[®] 105 auch hydrophobe Nanopartikel in die Testdispersion gegeben. Um die Superhydrophobierungsleistung dieser Testdispersionen zu testen, wurden hydrophile Glasoberflächen in diese Dispersionen und einigen ihrer einzelnen Bestandteile getaucht. Anschließend wurden die Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf diesen Oberflächen gemessen (Kapitel 4.9.2). Zusätzlich wird die Fähigkeit dieser Test-Dispersionen zur Regeneration der Superhydrophobie auf beschädigten strukturierten superhydrophoben Oberflächen und die Auswirkungen dieser Dispersionen auf die Selbstreinigungsfähigkeit dieser Oberflächen untersucht (Kapitel 4.9.3). Dazu wurden beschädigte strukturierte superhydrophobe TEGOTOP 210-Oberflächen zunächst mit den Reparaturdispersions-Prototypen besprüht, um eine gleichmäßige Verteilung der Partikel zu erhalten. Anschließend wurden mit diesen Oberflächen Konatminationsversuche durchgeführt.

4.9.1 Benetzung von Fehlstellen

Nach dem Besprühen einer hydrophobierten Kupferoberfläche mit unverdünntem TEGOTOP[®] 105 und einer 25%igen Verdünnung von TEGOTOP[®] 105 in Aqua dest. kam es zu einer kompletten Überdeckung der Oberflächenstrukturen mit Silikonwachs (siehe Abbildungen 97 A und D).

Eine 15%ige Verdünnung von TEGOTOP[®] 105 überdeckte kaum sichtbar die strukturierten Kupferoberflächen (siehe Abbildung 97 E). Eine Auffüllung der Fehlstellen findet nicht statt (Abbildung 97 F). Es sind jedoch in den Fehlstellen angetrocknete runde Ansammlungen von TEGOTOP[®] 105-Partikeln zu erkennen (Abbildung 97 F).

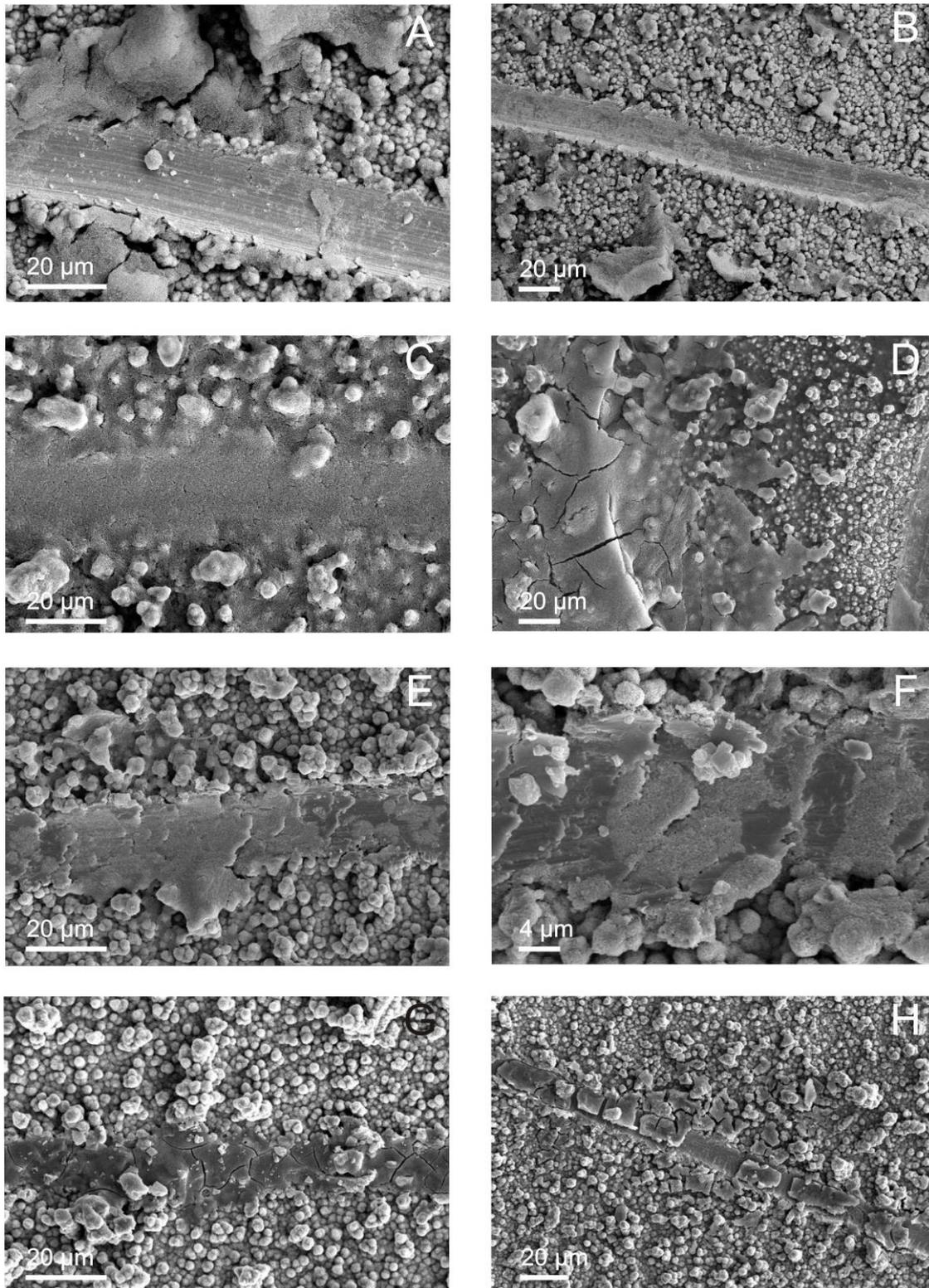


Abbildung 96: hydrophobierte Kupferoberfläche (Bolta-Werke) mit Fehlstelle wurde mit unterschiedlichen Verdünnungen von TEGOTOP®105 besprüht; A: besprüht mit 100% TEGOTOP®105, B: besprüht mit 100% TEGOTOP®105 (Übersicht), C: besprüht mit TEGOTOP®105 (25% in Wasser), D: besprüht mit TEGOTOP®105 (25% in Wasser, Detail), E: besprüht mit TEGOTOP®105 (15% in Wasser), F: besprüht mit TEGOTOP®105 (15% in Wasser, Detail), G: besprüht mit TEGOTOP®105 (0,1% in Wasser und 7,5g/l TEGOTENS® B 810), H: besprüht mit TEGOTOP®105 (0,1% in Wasser und 7,5g/l TEGOTENS® B 810, Detail).

Nach Behandlung der beschädigten Kupferoberfläche mit einer TEGOTOP® 105-Verdünnung, in der zusätzlich das kationische Tensid TEGOTENS® B 810 als Trägerdispersion zugefügt wurde, konnte eine Auffüllung der Fehlstellen in einigen Bereichen beobachtet werden (siehe Abbildungen 97 G und H).

Somit gelang das selektive Auffüllen von Fehlstellen in strukturierten superhydrophoben Oberflächen

4.9.2 Auswirkungen auf die Superhydrophobie

Der Mikroemulsion Gloss Dryer® wurden hydrophobierte Leuchtstoff F20- und kleinere Silmikron®-Partikel von der Größe einiger Mikrometer zugesetzt. Anschließend wurden unbehandelte Glasoberflächen in diese Dispersion getaucht und vergleichende Kontakt- und Abrollwinkel-Messungen auf verschiedenen Oberflächen durchgeführt.

Kontaktwinkel

Das Zufügen dieser Partikel in die Mikroemulsion Gloss Dryer® führte im Vergleich zu den gemessenen Kontaktwinkeln auf einer unbehandelten Glasoberfläche zu einer signifikanten Steigerung des durchschnittlichen Kontaktwinkels (Abbildung 98).

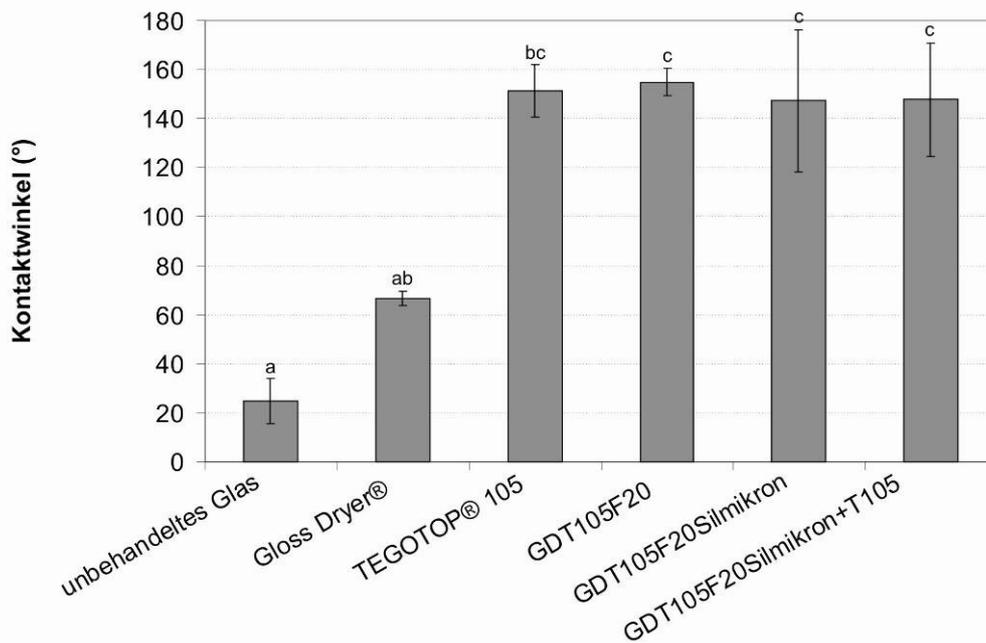


Abbildung 97: Kontaktwinkel von Wasser auf Glasoberflächen, die vorher in verschiedene Lösungen getaucht (Dauer: 10 sec) und anschließend getrocknet wurden (Ausnahme: Glasoberfläche wurde mit TEGOTOP 105 eingesprüht und anschließend getrocknet). Auf den Oberflächen wurden 10 bis 20 Kontaktwinkel gemessen. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Nach dem Eintauchen einer hydrophilen Glasoberfläche in Gloss Dryer® wurde auf dieser ein durchschnittlicher Kontaktwinkel von 66° gemessen. Das Besprühen einer Glasoberfläche mit dem Aerosol TEGOTOP® 105 führte zu einer nichtsignifikanten Erhöhung des durchschnittlichen Kontaktwinkels auf 151°. Nach dem Eintauchen einer Glasoberfläche in eine Dispersion, die aus Gloss Dryer® und den Leuchtstoff F20-Partikeln bestand („GDT105F20“), wurden mit durchschnittlich 155° signifikant höhere Kontaktwinkel gemessen als auf der zuvor ausschließlich in Gloss Dryer® eingetauchten Glasoberfläche. Der durchschnittliche Kontaktwinkel war nichtsignifikant höher als der durchschnittliche Kontaktwinkel auf einer mit TEGOTOP® 105 behandelten Glasoberfläche. Nach Zugabe von Silmikron®-Partikeln zu der „GDT105F20“-Dispersion („GDT105F20Silmikron“) und das anschließende Eintauchen einer Glasoberfläche in diese Dispersion wurde mit 147° ein nichtsignifikant niedrigerer durchschnittlicher Kontaktwinkel gemessen als auf der mit der „GDT105F20“-Dispersion behandelten Glasoberfläche.

Auch die Zugabe von Partikeln im Nanometer-Bereich in Form von TEGO-TOP® 105 in die „GDT105F20Silmikron“-Dispersion („GDT105F20Silmikron+T105“) und das anschließende Eintauchen einer Glasoberfläche in diese Dispersion führte mit durchschnittlich 148° zu keiner signifikanten Änderung des mittleren Kontaktwinkels.

Abrollwinkel

Nach Zugabe von Partikeln in Gloss Dryer® und Eintauchen einer Glasoberfläche in diese Testdispersion wurden niedrigere durchschnittliche Abrollwinkel gemessen (Abbildung 99).

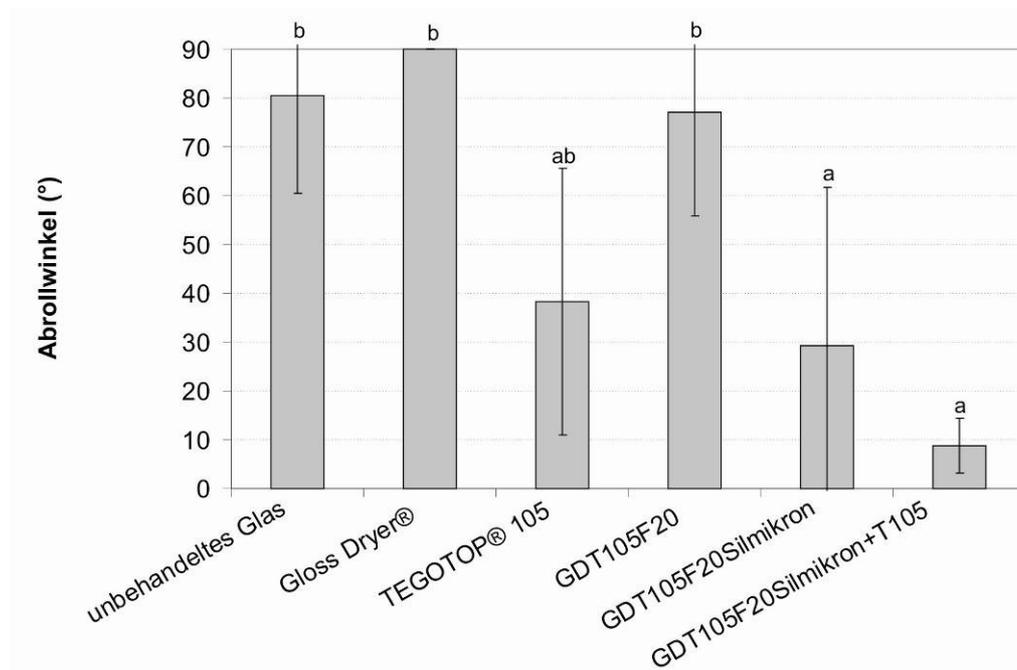


Abbildung 98: Abrollwinkel von Wasser auf Glasoberflächen, die vorher in verschiedene Lösungen getaucht (Dauer: 10 sec) und anschließend getrocknet wurden (Ausnahme: Glasoberfläche wurde mit TEGOTOP 105 eingesprüht und anschließend getrocknet). Auf den Oberflächen wurden 10 bis 20 Kontaktwinkel gemessen. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Der Abrollwinkel von Wasser auf einer unbehandelten Glasoberfläche war mit durchschnittlich 81° sehr hoch. Somit rollte der Tropfen erst bei einer mittleren Neigung von ca. 81° von der Glasoberfläche ab. Nach dem Eintauchen der Glasoberfläche in Gloss Dryer® stieg der durchschnittliche Abrollwinkel nicht-signifikant auf 90° an. Die Wassertropfen rollten somit selbst bei einer Neigung

von 90° nicht von der Gloss Dryer®-Beschichtung ab. Das Besprühen der Oberflächen mit TEGOTOP® 105 führte zu einer nichtsignifikanten Senkung des durchschnittlichen Abrollwinkels auf 38°. Nach dem Eintauchen einer Glasoberfläche in die Dispersion „GDT105F20“ (Gloss Dryer® mit TEGOTOP® 105 und hydrophobierten Leuchtstoff F20-Partikeln versetzt, siehe Kapitel 3.1.4) stieg der Abrollwinkel nichtsignifikant auf durchschnittlich 77° an. Eine Behandlung der Glasoberfläche mit „GDT105F20Silmikron“ führte zu einer signifikanten Senkung des Abrollwinkels auf durchschnittlich 29,22°. Nach Zugabe einer größeren Menge TEGOTOP® 105 in die Dispersion („GDT105F20Silmikron+T105“, siehe Kapitel 3.1.4) wurde auf der zuvor eingetauchten Oberfläche ein nichtsignifikant niedrigerer durchschnittlicher Abrollwinkel von 9° gemessen.

Insgesamt führte die Zugabe von hydrophobierten Partikeln zu der Dispersion zu einer Absenkung der Abrollwinkel auf den Oberflächen. Jedoch schwankten die gemessenen Abrollwinkel von Wasser auf den behandelten Oberflächen sehr stark, da trotz des vorsichtigen Eintauchens der Glasoberflächen in die jeweilige Dispersion nicht immer eine gleichmäßige Verteilung, insbesondere der Partikel, auf den Oberflächen garantiert werden konnte. Wurden die Glasoberflächen jedoch gleichmäßig mit den Test-Dispersionen beschichtet, konnten anschließend auf diesen Oberflächen hohe Kontaktwinkel und niedrige Abrollwinkel gemessen werden.

4.9.3 Auswirkungen auf die Selbstreinigung

Die Dispersionen „GDT105F20“ und „GDT105F20Silmikron+T105“ wurden im Folgenden auf ihre Eignung als Reparaturdispersionen untersucht. Dazu wurden zunächst Kontaminationsversuche mit unbeschädigten und beschädigten TEGOTOP® 210-Oberflächen und dem Regenerationsdispersions-Prototypen „GDT105F20“ durchgeführt. Anschließend wurde die Test-Dispersion „GDT105F20Silmikron+T105“ auf ihre Eignung als Reparaturdispersion auf TEGOTOP® 210-Oberflächen untersucht.

Test-Dispersion „GDT105F20“

Die Selbstreinigungsfähigkeit der beschichteten Oberflächen verschlechterte sich nichtsignifikant nach der Behandlung mit der Test-Dispersion „GDT105F20“ (Abbildung 100).

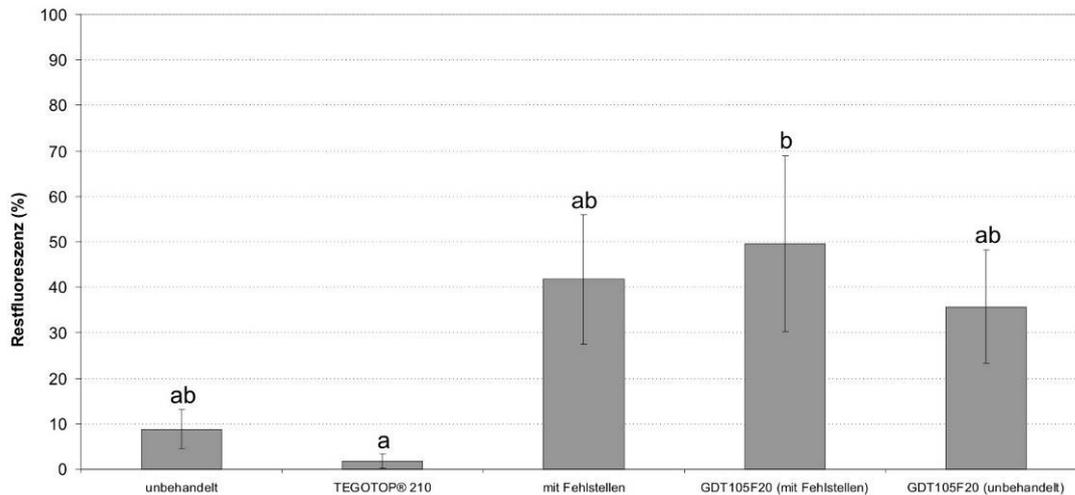


Abbildung 99: Restfluoreszenz (in %) von Redwop™ auf unterschiedlich behandelten Glasoberflächen nach Kontamination und anschließender Benebelung (bei einer Lagerung der Proben von 30°); „unbehandelt“: unbehandelte Glasoberfläche; „TEGOTOP 210“: Glasoberfläche, die vorher mit TEGOTOP® 210 besprüht worden ist; „mit Fehlstellen“: Glasoberfläche, die vorher mit TEGOTOP® 210 besprüht worden ist und anschließend 4 Fehlstellen in die Beschichtung eingebracht wurde; „GDT105F20 (mit Fehlstelle)“: Glasoberfläche, die vorher mit TEGOTOP® 210 besprüht worden ist, anschließend 4 Fehlstellen in die Beschichtung eingebracht wurde. Danach wurde diese Oberfläche mit GDT105F20 besprüht; „GDT105F20T105 (unbehandelt)“: Eine unbehandelte Glasoberfläche wurde mit GDT105F20 besprüht. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Die unbehandelten Glasoberflächen zeigten nach Benebelung nur eine geringe Restkontamination an Redwop™-Partikeln von 8,79 %. Ein großer Teil an Partikeln ist nach der Benebelung entfernt worden. Die mit TEGOTOP® 210 beschichteten Glasoberflächen wiesen eine Restkontamination von 1,78 % auf. Die Abreinigung war auf diesen Oberflächen nichtsignifikant höher.

Nach dem Einbringen von Fehlstellen in die TEGOTOP® 210-Beschichtung wurde eine erhöhte Fluoreszenz der Redwop™-Partikeln speziell in den Fehlstellen gemessen. Die Restkontamination stieg nichtsignifikant auf 41,75 %.

Nach dem Besprühen sowohl der beschädigten TEGOTOP® 210 Beschichtung, als auch der unbehandelten Glasoberflächen mit der „GDT105F20“-Dispersion wurde eine nichtsignifikant erhöhte Restkontamination von 49,62 %

und 35,76 % nach Benebelung gemessen. Durch das Auftragen der Dispersion kam es zu einer Maskierung der unbeschädigten Oberflächenbereiche, die dadurch ihre selbstreinigende Fähigkeit verloren.

Test-Dispersion „GDT105F20Silmikron+T105“

Auch hier wurde eine Verschlechterung der Selbstreinigungsfähigkeit der TEGOTOP® 210-Oberflächen nach Behandlung der Oberflächen mit der Test-Dispersion gemessen (Abbildung 101).

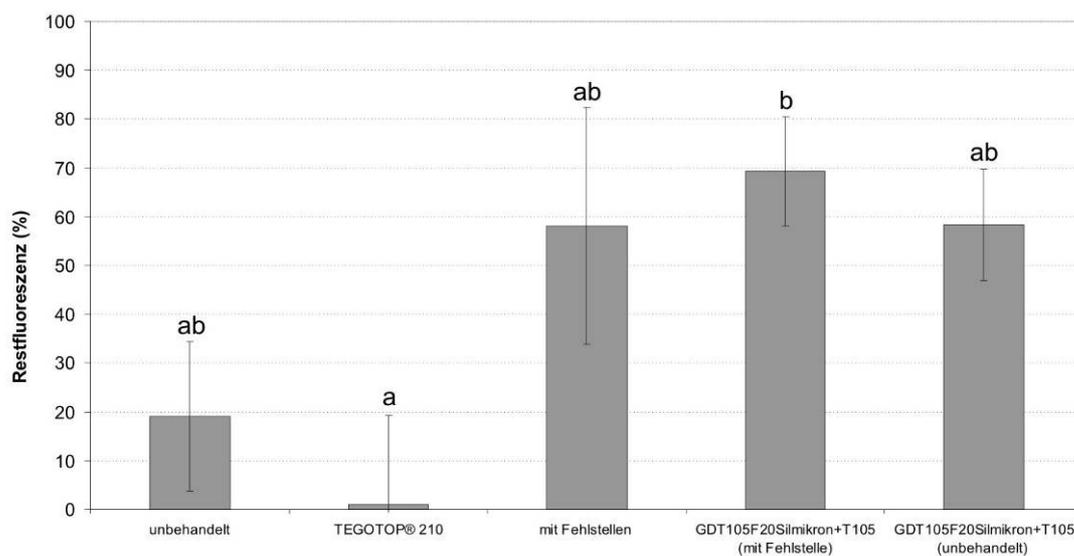


Abbildung 100: Restfluoreszenz (in %) von Redwop™ auf unterschiedlich behandelten Glasoberflächen nach Kontamination und anschließender Benebelung (bei einer Lagerung der Proben von 30 °); „unbehandelt“: unbehandelte Glasoberfläche; „TEGOTOP 210“: Glasoberfläche, die vorher mit TEGOTOP® 210 besprüht worden ist; „mit Fehlstellen“: Glasoberfläche, die vorher mit TEGOTOP® 210 besprüht worden ist und anschließend 4 Fehlstellen in die Beschichtung eingebracht wurde; „GDT105F20Silmikron+T105 (mit Fehlstelle)“: Glasoberfläche, die vorher mit TEGOTOP® 210 besprüht worden ist, anschließend 4 Fehlstellen in die Beschichtung eingebracht wurde. Danach wurde diese Oberfläche mit GDT105F20Silmikron+T105 besprüht; „GDT105F20Silmikron+T105 (unbehandelt)“: Eine unbehandelte Glasoberfläche wurde mit GDT105F20Silmikron+T105 besprüht. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.

Die mit TEGOTOP® 210 behandelte Glasoberfläche wies mit durchschnittlich 1 % die geringste Restkontamination an Redwop™-Partikeln nach Benebelung auf. Auf der unbehandelten hydrophilen Glasoberfläche war eine nichtsignifikant höhere durchschnittliche Restkontamination von 25 % zu messen. Auf TEGOTOP® 210-Beschichtungen mit Fehlstellen zeigte sich eine nichtsignifikante Erhöhung der durchschnittlichen Restkontamination auf 58,11 % nach

Benebelung. Nach dem Aufsprühen der Test-Dispersion sowohl auf die unbehandelte Glasoberflächen, als auch auf die TEGOTOP® 210-Oberflächen wurden mit jeweils durchschnittlich 58,31 % und 69,3 % eine nichtsignifikante höhere Restkontamination gemessen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine Verschlechterung der Selbstreinigungsfähigkeit von beschädigten strukturierten superhydrophoben Oberflächen nach Auftragung der Test-Dispersionen, obwohl die Behandlung einer hydrophilen Oberfläche mit diesen Dispersionen zu einer Erhöhung des durchschnittlichen Kontaktwinkels auf über 140° und eine Herabsetzung des Abrollwinkels auf unter 10° führte. Die Auftragung dieser Test-Dispersionen führte auf superhydrophoben Oberflächen zu einer Maskierung der Strukturierung mit einem Tensidfilm. Außerdem ist für eine erfolgreiche Regeneration der Superhydrophobie eine gleichmäßige Verteilung der hydrophoben Reparaturbausteine lokal in den Fehlstellen sehr wichtig. Dies setzt eine gleichmäßige Verteilung der Partikel während der Lagerung und Applikation voraus. Doch es kann schon während der Lagerung, bei der Auftragung und nach der Auftragung auf der Oberfläche zur Aggregation der Partikel kommen, die später eine gleichmäßige Verteilung speziell in den Fehlstellen verhindert.

Das Aufsprühen der Test-Dispersionen auf die Oberflächen unterstützt die gleichmäßige Verteilung der Partikel auf spezielle Bereiche der beschädigten Oberfläche nicht. Außerdem sorgt diese Art der Auftragung für eine unspezifische Abdeckung der strukturierten superhydrophoben Bereiche der Oberflächen mit dem Tensidanteil und den Partikel-Aggregationen. Die Superhydrophobie ist auch auf den unbeschädigten strukturierten Bereichen der Oberfläche zerstört.

5 DISKUSSION

5.1 Weißlichtprofilometrie als Methode zur Charakterisierung superhydrophober Oberflächen

Mit der Vermessung der Topographie von Oberflächen mit Hilfe des Weißlichtprofilometer (WP) lassen sich Messdaten gewinnen, die sowohl zur bildlichen Darstellung, als auch zur topographischen Vermessung und Charakterisierung der Oberflächenstrukturen genutzt werden können.

Das Rasterelektronenmikroskop (REM) eignet sich in erster Linie zur Abbildung von Oberflächen.

5.1.1 Weißlichtprofilometrie und Rasterelektronenmikroskopie im Vergleich

Wie in Kapitel 4.1 dargestellt, unterscheiden sich das WP und das REM in der Abbildungsqualität erheblich. Da das REM Oberflächen mit einem Elektronenstrahl abtastet, werden diese hochauflösend dargestellt. So lassen sich mit dieser Methode z. B. auf pflanzlichen Oberflächen alle Ebenen der Strukturierung abbilden. Selbst die z. T. nur wenige Nanometer großen epikutikularen Wachskristalle auf vielen pflanzlichen Oberflächen lassen sich mit dem REM abbilden.

Mit dem WP ist eine vergleichbare hochauflösende Darstellung von Oberflächen nicht möglich, da diese mit Hilfe eines chromatischen Sensors mit fokussiertem Weißlicht abgetastet werden. Das Weißlicht besitzt im Vergleich zu den beschleunigten Elektronen im REM eine größere Wellenlänge. Deshalb besitzt das WP eine niedrigere Auflösung. So ist die laterale Auflösung durch den Durchmesser des Lichtpunktes des Sensors begrenzt. Dieser liegt bei 1 bis 2 μm . Die epikutikularen Wachskristalle der pflanzlichen superhydrophoben Oberflächen lassen sich somit mit dem WP nicht darstellen. Auch die Kutikularfaltungen auf den Papillenspitzen einiger pflanzlicher Oberflächen, z. B. auf der Blattunterseite von *Alocasia macrorrhiza*, lassen sich mit dem WP nicht abbilden.

Außerdem kann es aufgrund der Messmethode mit Weißlicht an steilen Kanten von Strukturen zur Reflexion des Lichtes kommen, die zu Topographieverfälschungen führen können. So ist in den WP-Diagrammen die Form der Papillen auf den Blattoberflächen von *Colocasia esculenta* nicht zu erkennen (siehe Abbildung 12 B).

Probenpräparation

Die Probenpräparation vor der REM-Untersuchung kann je nach Methode sehr komplex sein. Da die Betrachtung der Proben im Vakuum erfolgt, müssen diese vor der eigentlichen Untersuchung durch Dehydrierung vakuumstabilisiert werden. Dazu gibt es unterschiedliche Methoden. Eine Auflistung dieser Methoden zur Probenvorbereitung für das REM findet sich bei PATHAN et al. (2008). Die Probenvorbereitungen können Artefakte erzeugen, die die Abbildungsqualität mindern. Auch Aufladungseffekte können die Qualität der Abbildung mindern.

Es gibt jedoch mehrere Varianten des REM, bei denen die Artefaktbildung während der Probenpräparation minimiert ist: Eine probenschonende Variante ist das Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM). Bei dieser Methode entfällt die artefaktbildende Entwässerung der Proben, da diese nur in einem niedrigen Vakuum untersucht werden. Somit lassen sich Pflanzenoberflächen frisch, ohne vorherige Dehydrierung, betrachten. Nachteile dieser Methode sind aber die im Vergleich zum REM begrenzte Tiefenschärfe und die niedrigere Auflösung (PATHAN et al., 2008).

Eine weitere probenschonende Methode ist das Low Temperature Scanning Electron Microscope (LTSEM). Bei dieser Variante wird die Probe vor der Untersuchung mit flüssigem Stickstoff fixiert, die Probenvorbereitung somit minimiert. Aber auch diese Probenpräparation kann Artefakte auf der Oberfläche erzeugen, z. B. bei der Kryofixierung und der Übertragung der Probe in die Probenkammer (READ und JEFFREE, 1991). Artefakte können auch durch die Bildung von Eiskristallen und das daraus resultierende Zerreißen von Gewebe entstehen.

Die Präparation der Probenoberflächen vor der Messung mit dem WP ist auf die Befestigung auf dem Messtisch reduziert. Auch Frischproben lassen sich nach der Befestigung auf dem Messtisch sofort vermessen.

Vermessung von Oberflächenstrukturen

Es ist sehr schwierig, mit dem REM quantitative Messdaten von der Strukturierung der untersuchten Oberflächen zu erfassen (KUISMA et al., 2005). Informationen wie die Höhe von Strukturen sind nur indirekt über die Weiterverarbeitung der REM-Bilder z. B. mit einer Bildbearbeitungssoftware oder durch die aufwändige Erstellung von Oberflächen-Querschnitten möglich. Die Probenpräparation für diese Oberflächen-Querschnitte ist jedoch aufwendig und kann Artefakte erzeugen. Außerdem ist die Scanfläche für Probenoberflächen aufgrund der Bauweise des REM begrenzt. Die Kantenlänge der Oberflächen, die im Rahmen dieser Arbeit mit dem REM untersucht wurden, betrug ca. $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Für eine statistisch gesicherte Untersuchung von Oberflächen ist diese Fläche zu klein.

Das Weißlichtprofilometer erzeugt schon bei der Abtastung der Probenoberfläche quantitative Messdaten. Aufgrund der vertikalen Auflösung des Sensors von 10 bis 100 nm sind diese Daten besonders in der Höhe sehr aussagekräftig. Außerdem lassen sich im Gegensatz zum REM mit dem WP größere Oberflächen untersuchen. Probenoberflächen mit einer Kantenlänge von bis zu $20 \times 20 \text{ cm}^2$ lassen sich auf dem Messtisch befestigen. Die nachfolgende Messung ist aufgrund der Abtastung der Oberfläche mit Licht berührungslos. Diese wird deshalb während der Vermessung nicht verändert. Die Daten der untersuchten Oberfläche lassen sich anschließend als dreidimensionales Bild oder zweidimensionales Profil der Topographie ausgeben. Außerdem misst das Weißlichtprofilometer verschiedene zwei- und dreidimensionale Oberflächenparameter, die die Strukturierung von Oberflächen in zwei Ebenen (Rauheit und Welligkeit) charakterisieren. In den Wert dieser einzelnen Oberflächenkenngrößen gehen alle gemessenen Datenpunkte ein (VOLK, 2005), somit eignen sich diese zur Charakterisierung von strukturierten Oberflächen.

Aufgrund der begrenzten Auflösung konnten bei der Auszählung der Strukturen mit Hilfe der WP-Aufnahmen jedoch nicht alle Ebenen der Oberflächenstrukturierung erfasst werden (vergleiche die REM-Aufnahmen in Kapitel 4.1 und die Abbildungen zur Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche in Kapitel 4.2).

Fazit

Das WP wird das REM in der Abbildung von Oberflächen aufgrund der hohen Tiefenschärfe und Auflösung des REM nicht vollständig ersetzen können. Aber aufgrund der oben genannten Vorteile der Gewinnung von Strukturkenngößen eignet sich das WP als Ergänzung zur Untersuchung von Oberflächen im REM. Bei der Untersuchung und Charakterisierung von Oberflächen und deren Strukturen mit dem REM erhält man qualitative Informationen, die mit dem WP nicht zu bekommen sind. Mit diesem lassen sich jedoch quantitative Informationen zu den Oberflächenstrukturen im Mikrometer-Bereich, wie z. B. die Höhe, schnell und statistisch gesichert, z. B. in Form von Oberflächenkenngößen, gewinnen. Mit dem REM in Verbindung mit dem WP lassen sich Probenoberflächen somit umfassend untersuchen und vermessen.

5.1.2 Eignung von Oberflächenparametern zur Charakterisierung von superhydrophoben Oberflächen im WP

Definierte Oberflächenparameter haben sich in der Industrie und Forschung in den Bereichen Entwicklung, Konstruktion, Fertigung und Qualitätsprüfung schon seit längerem etabliert. Eine Auflistung der in dieser Arbeit verwendeten Oberflächenparameter ist in Tabelle 4 aufgeführt.

Oberflächenparameter strukturierter Oberflächen

Die Oberflächenparameter lassen sich nach DIN EN ISO 4287 in fünf Kategorien einteilen. Als Amplitudenkenngößen oder Senkrechtkenngößen werden sowohl die Spitzenhöhen und die Riefentiefen, als auch die Mittelwerte der Ordinaten bezeichnet. Zu diesen beiden Gruppen der Kenngößen gehören die Parameter R_a , R_q , $R_z(\text{DIN})$, R_p , R_v , R_t , R_{sk} und R_{ku} . Als Abstands- oder Waagerechtkenngroße ist die mittlere Rillenbreite der Profilelemente (R_{Sm}) definiert. Als gemischte Kenngroße wird der quadratische Mittelwert der Profilsteigung des Profils ($R_{\Delta q}$). Weiterhin gibt es die charakteristischen Kurven. Dazu gehören die Materialanteil- und die Amplitudendichtekurve und die daraus abgeleitete Parameter wie R_k , R_{pk} und R_{vk} .

Besonders die Amplitudenkenngößen R_a , R_q und R_z sind häufig verwendete Kenngrößen zur Charakterisierung von Oberflächen (ZHANG et al., 2000; BHUSHAN, 2002; VOLK, 2005; LI et al., 2009).

In den Versuchen zeigten sich zwischen diesen Amplitudenkenngößen und der Höhe der Mikrostrukturen auf den untersuchten pflanzlichen und technischen Oberflächen ein signifikanter sehr hoher Zusammenhang (siehe Kapitel 4.3). Die Werte dieser Parameter korrelierten mit der gemessenen Höhe der Mikrostrukturen auf den untersuchten Oberflächen. Die in dieser Arbeit untersuchten Mikrostrukturen der pflanzlichen Oberflächen lagen aufgrund ihrer Höhe und der gewählten Grenzwellenlänge des Filters von $14,286 \mu\text{m}$ hauptsächlich in der Ebene der Welligkeit. Die Mikrostrukturen eines Großteils der untersuchten technischen Oberflächen wiesen im Vergleich zu den pflanzlichen Oberflächen eine geringere Höhe auf. Deshalb zeigten bei diesen Oberflächen die Rauheitsparameter eine höhere Korrelation zu der Höhe der Mikrostrukturen. Die zur der Höhe der Mikrostrukturierung korrelierenden Amplitudenkenngößen lagen bei den pflanzlichen und den technischen Oberflächen in unterschiedlichen Ebenen. Dabei entscheidet die Höhe der Grenzwellenlänge, ob die relevanten Strukturinformationen der Probenoberfläche in der Ebene der Welligkeit oder in der Ebene der Rauheit liegen. Die Grenzwellenlänge sollte, abhängig von der Probenoberfläche, nach den zu erwartenden Rauheitswerten gewählt werden. Damit sind gleichzeitig auch die Gesamtmessfläche festgelegt (VOLK, 2005). Für die Messung aussagekräftiger Oberflächenparameter ist somit die Wahl der Grenzwellenlänge und somit der Messfeldgröße entscheidend. Diese sollten so gewählt werden, dass alle wichtigen topographischen Informationen enthalten sind (RAMÓN-TORREGROSA et al., 2008). Die Wahl der Grenzwellenlänge und somit die Messfeldgröße entscheidet zusätzlich, ob die relevanten Strukturinformationen in der Ebene der Rauheit oder der Welligkeit liegen. Vorbereitende REM-Untersuchungen der Probenoberfläche unterstützen dabei die Wahl der richtigen Grenzwellenlänge, indem schon vor der Vermessung mit dem WP eine Abschätzung der zu erwartenden Höhe der Oberflächenstrukturierungen vorgenommen werden kann. Die Mikrostrukturen auf den in dieser Arbeit untersuchten pflanzlichen Oberflächen lagen aufgrund der Grenzwellenlänge von $14,286 \mu\text{m}$ in der Ebene der Welligkeit. In dieser Ebene hatten die Ampli-

tudenkenngrößen die beste Aussagekraft. Es bestand ein linearer Zusammenhang zwischen der Höhe des Wertes dieser Welligkeitsparameter und der Höhe der Mikrostrukturierung auf der untersuchten Pflanzenoberfläche. Somit ließen sich die untersuchten pflanzlichen Oberflächen mit Hilfe ausgesuchter Amplitudenkenngrößen anhand der Höhe der Mikrostrukturen unterscheiden (siehe Kapitel 4.3.1). Die Amplitudenkenngrößen besitzen jedoch eine unterschiedliche Qualität in der objektiven Beschreibung der Topographie der untersuchten Oberfläche (siehe Tabelle 4). So kann der arithmetische Mittenrauwert (R_a) nicht zwischen Spitzen und Riefen unterscheiden (VOLK, 2005). Deshalb läßt sich anhand dieses Parameters nicht auf die lokale Oberflächenbeschaffenheit schließen. Oberflächen mit unterschiedlichen Strukturen können trotzdem einen ähnlichen R_a -Wert haben. Jedoch liefert R_a , da dieser Parameter eine integrale Kenngröße ist, statistisch stabile Werte (KRÜGER-SEHM und SEEWIG, 2007). Der quadratische Mittenrauwert (R_q) besitzt eine ähnliche Definition wie R_a , reagiert im Vergleich zu diesem aber empfindlicher auf einzelne Spitzen und Riefen im Oberflächenprofil (VOLK, 2005). Die Rautiefe (R_t) wird im Gegensatz zu den meisten anderen Rauheitsparametern nicht über Einzelmessstrecken ermittelt, sondern über die gesamte Messstrecke. Diese Kenngröße reagiert sehr empfindlich auf Ausreißer (KRÜGER-SEHM und SEEWIG, 2007). Eine weitere gebräuchliche Kenngröße, die gemittelte Rautiefe (R_z), kann als Mittelung der R_t -Werte von fünf Einzelmessstrecken betrachtet werden. Auch Spitzen und Riefen werden zur Auswertung herangezogen. Auch die maximale Rautiefe (R_{max}) zeigt eine internationale Verbreitung (VOLK, 2005). Diese Kenngröße entspricht dem größten R_z -Wert aus den fünf Einzelmessstrecken.

Der gemittelten Rautiefe, der maximalen Rautiefe und der Rautiefe gelang die Beschreibung der Höhe der Zellstrukturen auf den untersuchten pflanzlichen Oberflächen gut. Bei den untersuchten technischen Oberflächen jedoch besaßen diese Parameter nicht dieselbe Aussagekraft. Dieser Unterschied lässt sich mit der unterschiedlichen Höhe und Verteilung der Mikrostrukturen auf den Oberflächen in den untersuchten Messfeldern begründen. So zeigen die REM- und WP-Aufnahmen der entsprechenden Oberflächen, dass viele der untersuchten pflanzlichen Oberflächen innerhalb der Messfelder eine ausgeprägte und gleichmäßig hohe Verteilung der Mikrostrukturen in Form von konvexen

Wölbungen der Epidermiszellen, z. T. mit Zentralpapillen, aufwiesen (siehe Kapitel 4.1). Auch einige technische Oberflächen wie die Muster-Glasoberfläche „White Frost“ mit Lotus-Effect[®] und die Muster-Textiloberfläche mit Lotus-Effect[®] besaßen eine ausgeprägte Mikrostrukturierung, wie in den REM-Aufnahmen zu sehen (siehe Abbildungen 42 A und 48 A). Jedoch zeigten die meisten untersuchten technischen Oberflächen in den Messfeldern keine gleichmäßige Verteilung der Mikrostrukturierungen. Mit Ausnahme der hydrophobierten Kupferoberflächen wurden auf den untersuchten technischen Oberflächen im Vergleich zu den pflanzlichen Oberflächen insgesamt eine geringere Höhe und Anzahl an Mikrostrukturen pro Messfläche messtechnisch erfasst. Die gemessenen Mikrostrukturen der technischen Oberflächen zeigten einen sehr großen Einfluss auf die Amplitudenkenngößen in der Ebene der Rauheit (siehe Kapitel 4.3.2).

Fazit

Die Beschreibung der Höhe der Mikrostrukturen auf Oberflächen gelingt mit ausgewählten Amplitudenkenngößen sehr gut. Jedoch ist die Charakterisierung der Strukturierung von Oberflächen anhand der oben aufgeführten Amplitudenkenngößen ist begrenzt, da sie nur die vertikalen Unterschiede in der Höhe der Messdaten beschreiben (Li et al., 2009). Diese Parameter können jedoch nicht die Unterschiede in der Form und der Verteilung der Strukturen auf den untersuchten Oberflächen beschreiben (Li et al., 2009). Die horizontalen Unterschiede von Oberflächen, also der Abstand von Strukturen innerhalb einer Fläche, lassen sich jedoch mit Hilfe von Waagrecht- oder Abstandskenngrößen beschreiben. Zu diesen Kenngrößen gehört der Parameter RSm. Dieser gibt den mittleren Abstand der Spitzen an, die auf der Bezugsstrecke gezählt wurden (VOLK, 2005). Leider wird dieser Parameter nicht vom Programm Mark III berechnet. Somit konnten die untersuchten Oberflächen nicht anhand dieser Kenngröße miteinander verglichen werden.

Eine generelle Einschränkung der Verwendung des Weißlichtprofilometers zur Charakterisierung besonders von fein strukturierten Oberflächen liegt in der begrenzten Auflösung aufgrund der Messung mit chromatischem Weißlicht. Eine Darstellung und Charakterisierung der Nanostrukturen, die in den REM-Aufnahmen von vielen untersuchten pflanzlichen und technischen Oberflächen

deutlich zu erkennen sind, ist somit nicht möglich. Um auch für Nanostrukturen Oberflächenparameter zu erhalten, muss deshalb eine andere Messmethode angewendet werden. Denkbar wäre z. B. die Verwendung eines Rasterkraftmikroskops (Atomic Force Microscope, AFM). Aufgrund der Abtastung der Oberflächen mit der Spitze einer an einem Cantilever (Federbalken) befestigten feinen Nadel kann die Höhe der epikutikularen Wachskristalle mit Hilfe dieser Methode bestimmt werden. Da die weichen Strukturen durch den verzögerten Höhenausgleich der Nadel jedoch leicht beschädigt werden können, sind die gemessenen Oberflächenparameter unter Umständen nicht aussagekräftig.

Zusammenhang zwischen den Oberflächenparametern und den Benetzungseigenschaften von Oberflächen

Pflanzliche Oberflächen sind niemals ideal glatt und stets chemisch heterogen. Selbst die untersuchten als „glatt“ bezeichneten pflanzlichen Oberflächen zeigten eine Strukturierung. Diese sind zwar weit weniger stark ausgeprägt als auf der superhydrophoben Blattoberseite von *Nelumbo nucifera*, haben aber auch einen Einfluss auf die Benetzung von Wasser. Dieser Einfluss der Rauheit sorgt dafür, dass auf pflanzlichen Oberflächen statische Kontaktwinkel von über 110° gemessen werden können (HOLLOWAY, 1970).

Der Einfluss der Rauheit auf den statischen Kontaktwinkel wurde zunächst von WENZEL (1936) mit einer Gleichung versucht zu erklären (Gleichung 1.4). Dabei ging er von der Annahme aus, dass die Oberfläche chemisch homogen ist, und die Rauheit auf dieser Oberfläche kleiner als der aufliegende Wassertropfen ist. Die Rauheit und der statische Kontaktwinkel des Wassertropfens auf stehen in diesem Fall über einen Rauheitsfaktor r in Beziehung (HOLLOWAY, 1970). Das Wasser dringt zwischen die Strukturen und es kommt zu einer homogenen Benetzung der Oberfläche. Jedoch kann der Maßstab der Oberflächenstrukturierung bei gleichem Rauheitsfaktor r stark abweichen (HOLLOWAY, 1970). Auch kann die Rauheit einer Oberfläche so beschaffen sein, dass Wasser nicht zwischen die Strukturen dringen kann. es bilden sich luftgefüllte Zwischenräume. Bei superhydrophoben pflanzlichen Oberflächen mit hohen Strukturen kann es deshalb zu einer heterogenen Benetzung der Oberfläche kommen. Der Wassertropfen liegt auf einer Kompositoberfläche

aus Luft und Festkörper auf. Diese Situation beschreibt die Gleichung von CASSIE und BAXTER (1944; Gleichung 1.5).

Für einen Zusammenhang zwischen der Strukturierung einer Oberfläche und der Benetzungseigenschaften auf dieser ist es somit wichtig, zu wissen, ob eine homogene oder heterogene Benetzung vorliegt. Dieser Zusammenhang ist schon in vielen Publikationen untersucht worden (MIWA et al., 2000; MARMUR, 2004; ZHU et al., 2005a; ZHU et al., 2005b). Jedoch beschränkten sich die Untersuchungen häufig auf Modell-Oberflächen mit spezieller Strukturierung (KIJLSTRA et al., 2002). Auch sind diese Modell-Oberflächen chemisch homogen. Pflanzliche Oberflächen sind jedoch chemisch heterogen. Zusätzlich weisen diese Oberflächen und viele technische Oberflächen unregelmäßige Strukturen in verschiedenen Ebenen auf. Mit dem WP werden aber aufgrund der niedrigen Auflösung des Sensors ausschließlich die Oberflächenstrukturen charakterisiert, die im Mikrometerbereich liegen und bei den pflanzlichen Oberflächen von der Wölbung der periklinalen Außenwände der epidermalen Zellen gebildet werden. Auf diesen Strukturen befindet sich jedoch eine zusätzliche Strukturierung im Nanometerbereich, gebildet von epikutikularen Wachskristallen oder Kutikularfaltungen (BARTHLOTT und EHLER, 1977). Diese hierarchisch angeordneten Ebenen der Strukturierung beeinflussen in der Gesamtheit die Benetzung auf diesen Oberflächen (NEINHUIS und BARTHLOTT, 1997). Da diese verschiedenen Ebenen der Strukturierung jedoch nicht mit dem WP vermessen werden können, besitzen auch die anhand der WP-Daten berechneten Oberflächenparameter nur eine begrenzte Aussagekraft.

Fazit

Anhand der gemessenen Oberflächenparameter lassen sich die Benetzungseigenschaften von Oberflächen nicht zuverlässig vorhersagen, da das WP, mit dessen Datensatz diese Parameter berechnet wurden, nur eine Ebene der Strukturierung messen kann. Kleinere Strukturen als die Mikrostrukturierung bleiben bei der Untersuchung mit dem WP weitestgehend unberücksichtigt. Um die hierarchische Strukturierung strukturierter superhydrophober Oberflächen charakterisieren zu können, müßten gleichzeitig verschiedene Methoden angewendet werden (siehe Kapitel 5.1.2). Zusätzlich besitzen einige Oberflächenparameter eine schwache Aussagekraft und erfassen nicht alle für die

Benetzung relevanten Strukturebenen. Für die Beschreibung der hierarchischen Strukturierung und somit des Benetzungsverhaltens von Oberflächen ist deshalb die Kombination von mehreren Oberflächenparametern, wie z. B. von Amplituden- und Abstandskenngrößen, vonnöten.

5.2 Einfluss der Mikrostrukturierung auf die Benetzung mit Wasser

Auf einer hierarchisch strukturierten superhydrophoben Oberfläche beeinflussen alle Ebenen der Strukturierung die Benetzung (WAGNER et al., 2003). Es kommt bei der Benetzung zur Bildung einer Kompositoberfläche, d. h. es wird Luft in den Zwischenräumen der Oberflächenstrukturen eingeschlossen. Das Wasser dringt nicht zwischen die Strukturen. Somit liegt eine heterogene Benetzung vor. Die hierarchische Strukturierung auf superhydrophoben Oberflächen führt zu einer Stabilisierung der Kompositoberfläche bei der heterogenen Benetzung (NOSONOVSKY, 2007; NOSONOVSKY und BHUSHAN, 2007).

Die Untersuchungen an den unterschiedlich strukturierten pflanzlichen und technischen Oberflächen zeigten speziell die Rolle der Mikrostrukturierung bei der Unbenetzbarkeit von Oberflächen auf. So zeigten die Ergebnisse der Vermessung der Mikrostrukturen und die Messung der Kontakt- und Abrollwinkel der pflanzlichen Oberflächen in den Gruppen 1 und 2, dass Mikrostrukturen auf Oberflächen den statischen Kontaktwinkel und den Abrollwinkel auf unterschiedliche Arten beeinflussen. Dabei spielt u. a. die Höhe und die Anzahl der Mikrostrukturen eine Rolle (siehe Kapitel 4.2.1 und Kapitel 4.4.1). WAGNER et al. (2003) stellten bei quantitativen Untersuchungen zu strukturellen Anforderungen von unbenetzbaren Oberflächen die These auf, dass eine größere Anzahl an kleinen Papillen wichtiger für die Selbstreinigung sei als eine kleinere Anzahl höherer Papillen. Die Messergebnisse der Blattoberseite von *Nelumbo nucifera*, einziger Vertreter der Gruppe 4, unterstützen diese These. So wies diese Oberfläche mit 38 Papillen pro untersuchte Messfläche im Vergleich zu den übrigen untersuchten pflanzlichen Oberflächen eine sehr hohe Anzahl an Mikrostrukturen auf. Zusätzlich wurden auf dieser Oberfläche ein sehr hoher durchschnittlicher Kontaktwinkel und ein sehr niedriger durchschnittlicher Abrollwinkel gemessen werden.

Ein ausgeprägte Mikrostrukturierung in Form von Papillen, wie sie auf der Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* zu finden sind, scheint für hohe Kontaktwinkel und niedrige Abrollwinkel von Oberflächen nicht grundsätzlich nötig zu sein. Einige untersuchte pflanzliche und technische Oberflächen hatten trotz eines durchschnittlichen Kontakwinkels von über 140° und Abrollwinkels von unter 10° nur eine schwach ausgeprägte Mikrostrukturierung. So wiesen die periklinalen Außenwänder der Epidermiszellen auf der Blattoberseite von *Tropaeolum majus* nur eine konvexe Wölbung auf, wie in der REM-Aufnahme deutlich zu erkennen (Abbildung 32 A). Zentralpapillen, wie sie von den Epidermiszellen auf der Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* gebildet werden, sind auf dieser Oberfläche nicht zu erkennen. Trotz dieser strukturellen Unterschiede wurden auf dieser Oberfläche ähnlich hohe statische Kontaktwinkel und niedrige Abrollwinkel gemessen. Auch auf der technischen Oberfläche TEGOTOP[®] 210 konnten ein sehr hoher durchschnittlicher statischer Kontaktwinkel und ein niedriger durchschnittlicher Abrollwinkel gemessen werden (siehe Kapitel 4.4.2). Wie die REM-Aufnahme deutlich zeigt, besitzt diese Oberfläche jedoch keine Mikrostrukturierung (Abbildung 45 A). BHUSHAN et al. (2009a; 2009b) maßen hohe Kontaktwinkel von durchschnittlich 164° auf ausschließlich mit Wachskristallen von *Tropaeolum majus* bedeckten nanostrukturierten Oberflächen. Für einen hohen statischen Kontaktwinkel wird somit ausschließlich eine Nanostrukturierung benötigt. KOCH et al. (2009) bestätigen diese Aussage. So kann auf pflanzlichen Oberflächen, die mit epikutikularen Wachskristallen dicht bedeckte tabulare Epidermiszellen besitzen, eine Superhydrophobie gemessen werden. Diese Oberflächen sind jedoch nur für eine begrenzte Zeit unbenetzbar. BHUSHAN und JUNG (2006) kamen schließlich zum Schluss, dass für die Unbenetzbarkeit auf Pflanzenoberflächen die Nanostrukturierung eine größere Rolle spielt als die Mikrostrukturierung. Sie konnten anhand von AFM-Messungen zeigen, dass Nanostrukturen auf den Spitzen der Mikrostrukturen die Kontaktwinkel von Wasser stärker erhöhen, als die Mikrostrukturierung selbst. Für LAFUMA und QUÉRÉ (2003) ist aber die Doppelstrukturierung aus Mikro- und Nanostrukturierung notwendig für eine optimale Unbenetzbarkeit. Diese sorgt, wie bereits oben erwähnt, für eine Stabilisierung der Superhydrophobie, z. B. gegen das Einsinken von Wassertropfen zwischen die Strukturen (NOSONOVSKY, 2007).

ZHU et al. (2005b) konnten auf ihren strukturierten Silizium-Wafern, hydrophobiert mit Fluorkohlenwasserstoff, nach Zugabe einer Nanostrukturierung in Form von Carbon-Nanoröhrchen nicht die erwartete Erhöhung des statischen Kontaktwinkels messen. Aber auch sie konnten zeigen, dass die Nanostrukturierung auf unbenetzbaren Oberflächen die Superhydrophobie stabilisiert und die Hysterese senkt. Die Nanostrukturierung ersetzt die Notwendigkeit der Mikrostruktur für superhydrophobe Oberflächen.

WANG et al. (2009) identifizierten jedoch auf der Blattoberseite von Lotus die Mikrostrukturen als Hauptursache der Superhydrophobie, da die Nanostrukturen in Form von epikutikularen Wachsen sehr nah beieinander stehen. Somit kann zwischen den Wachskristallen keine Luft eingeschlossen werden. Es liegt lokal auf den Wachsstrukturen das Wenzel-Stadium vor.

ENSIKAT et al. (2009) konnten jedoch zeigen, dass Wassertropfen auf hierarchisch strukturierten superhydrophoben Oberflächen sowohl in der Ebene der Mikrostrukturierung, als auch in der Ebene der Nanostrukturierung im Cassie-Baxter-Stadium auf diesen Oberflächen aufliegen. BHUSHAN et al. (2009a) konnten dieses Ergebnis für die einzelnen Ebenen bestätigen, indem sie jeweils die experimentell gemessenen Kontaktwinkel auf nano-, mikro- und hierarchisch strukturierten Oberflächen mit den theoretischen Werten von Kontaktwinkeln im Wenzel- oder im Cassie-Baxter-Stadium verglichen.

5.3 Generierung von Fehlstellen und ihre Auswirkungen auf die Selbstreinigung superhydrophober Oberflächen

Technische Materialien können unter anderem durch den Gebrauch und durch Alterungsprozesse beschädigt und dadurch in ihrer Funktion beeinträchtigt werden. Die Zunahme der Beschädigung kann schließlich zum Verlust der Funktion des technischen Materials führen. Nach VAN DER ZWAAG et al. (2007) lassen sich Materialien mit zwei Konstruktionskonzepten vor Beschädigung schützen: Schadensverhütung und Schadensmanagement. Bei der Schadensverhütung werden die technischen Materialien so gewählt oder gefertigt, dass diese an Festigkeit oder Formsteifigkeit zunehmen. Bei dem Schadensmanagement werden die technischen Materialien so konstruiert, dass diese sich selbst heilen. Die Beschädigung wird autonom vom Material selbst entfernt

oder „geheilt“. Beide Prinzipien müssen schon bei der Entwicklung der funktionsangepassten Materialien berücksichtigt werden. Die Grenzen dieser Konzepte liegen in der Zusammensetzung und der zu erfüllenden Funktion des Materials. So kann bei der Schadensverhütung die Zunahme der Festigkeit oder der Formstetigkeit eines Materials dessen Funktion nachteilig verändern, z. B. in Bereichen, in denen das technische Material flexibel und elastisch sein muss, um seine Funktion zu erfüllen. Bei dem Prinzip des Schadensmanagements erweist sich die Konstruktion eines selbstheilenden technischen Materials als sehr komplex (VAN DER ZWAAG et al., 2007).

Neben der Vorbereitung von technischen Materialien zum Schutz vor Beschädigungen können auch Möglichkeiten entwickelt werden, Beschädigungen in schon bestehenden Materialien im Nachhinein zu entfernen. Dieser Weg wurde in der vorliegenden Arbeit besprochen. Es sollte eine Reparaturdispersion für technische strukturierte superhydrophobe selbstreinigende Oberflächen entwickelt werden, die die Funktion dieser Oberflächen nach Beschädigung regeneriert. Die Strukturierungen dieser Oberflächen besitzen eine große Anfälligkeit für Beschädigungen, die lokal den Verlust der Strukturierung zur Folge haben (CALLIES und QUÉRÉ, 2005; SOLGA et al., 2007). Eine technische selbstreinigende Oberfläche muss jedoch Berührungen, Reibung oder Verschmutzungen standhalten können (YOUNGBLOOD und SOTTOS, 2008). Entscheidend für den Verlust der Funktion von selbstreinigenden Oberflächen ist die Größe der Beschädigung, wie eigene Versuche mit einer neu entwickelten Methode zur quantitativen Analyse der Selbstreinigungsfähigkeit superhydrophober Oberflächen zeigten (siehe Kapitel 4.6.3). In Fehlstellen auf superhydrophoben Oberflächen sind die hydrophobe Beschichtung und die Strukturierung beschädigt oder sogar zerstört. Dieser Bereich ist im Gegensatz zu der übrigen Fläche hydrophil.

Gelangt Wasser auf eine kontaminierte intakte superhydrophobe Oberfläche, so ist die Adhäsion zwischen den Kontaminationspartikeln und den Wassertropfen größer als zwischen den Partikeln und der strukturierten Oberfläche (NEINHUIS und BARTHOLOTT, 1997). Die Kontaminationspartikel werden mit den Wassertropfen von der Oberfläche entfernt. An der Fehlstelle kann es aber aufgrund der lokalen Hydrophilie der Oberfläche zu einem „Pinning“ des Wassertropfens kommen, d. h. der Wassertropfen bleibt an der Fehlstelle hängen

und trocknet ein. Die Kontaminationspartikel gelangen so in die Fehlstelle und sammeln sich dort an. Bei kleinen Fehlstellen ist dieses Problem jedoch nicht so ausgeprägt, da durch die kinetische Energie des Wassertropfens, besonders bei großen Partikeln, die um ein Mehrfaches größer sind als die Beschädigung, die lokale Hydrophilie der Fehlstelle nicht ausreicht, um den Wassertropfen an der Fehlstelle festzuhalten. Somit zeigen Fehlstellen geringer Größe nur geringe Auswirkungen auf die Selbstreinigungsfähigkeit von superhydrophoben Oberflächen. Mit Hilfe der neu entwickelten Methode zur quantitativen Analyse der Selbstreinigungsfähigkeit von Oberflächen, beschrieben in Kapitel 3.2.5, konnte gezeigt werden, dass die mit gitterförmigen schmalen Kratzern beschädigten hydrophobierten Kupferoberflächen eine ähnliche Abreinigung besitzen wie die unbeschädigten superhydrophoben Kupferoberflächen (siehe Kapitel 4.6.4). Aufgrund der Bewegungsenergie, die die Wassertropfen auf den Probenoberflächen bei der Lagerung in einem Winkel von 45° entwickelten, rutschten die Wassertropfen mitsamt der Kontaminationspartikel über die schmalen Fehlstellen hinweg. Deshalb kam es nicht zu einer Ansammlung von messbaren Kontaminationen in diesen Fehlstellen. Erst in breiteren Fehlstellen konnte eine Ansammlung von Kontaminationen gemessen werden. Aufgrund der schrägen Lagerung der Oberflächen floss das Wasser von den superhydrophoben Bereichen der Oberfläche ab und blieb lokal in den hydrophilen Fehlstellen hängen. So konnten sich Kontaminationspartikel in den Fehlstellen ansammeln. Nach Eintrocknung des Wassers verblieben die Kontaminationspartikel deutlich sichtbar in den Fehlstellen, die selbstreinigende Fähigkeit der superhydrophoben Oberfläche war an dieser Stelle vollständig zerstört.

5.4 Regeneration der Hydrophobie in Fehlstellen auf technischen Oberflächen

Es wurden zu Beginn verschiedene Tenside auf ihre Eignung als Trägerdispersion hin untersucht. Diese Tenside sollten nach Auftragung auf der technischen strukturierten superhydrophoben Oberfläche die Fehlstelle „finden“, d. h. speziell dort anhaften, ohne die unbeschädigten Bereiche der superhydrophoben Oberfläche durch Maskierung in ihrer Funktion zu beeinträchtigen. Die

Fehlstelle sollte dabei durch das Spreiten der Tensid-Dispersion komplett bedeckt und hydrophobiert werden.

Die Trägerdispersion sollte zusätzlich Partikel zu den Fehlstellen führen und dort für eine gleichmäßige Verteilung dieser Partikel sorgen. Die Kombination aus Hydrophobierung und Wiederherstellung der in der Fehlstelle zerstörten Strukturierung sollte zur Regeneration der Superhydrophobie in den beschädigten Bereichen der Oberfläche führen.

SCHONDELMAIER et al. (2002) ist die Auftragung eines durch Selbstorganisation wasserabweisenden monomolekularen Fluoroalkylsilan-Filmes auf Oberflächen gelungen. Von der Evonik Industries AG wurde ein Spray namens TEGOTOP® 105 entwickelt, das Oberflächen großflächig mit einer dünnen hydrophoben und strukturierten Schicht überzieht und eine neue superhydrophobe Oberfläche bildet (MÜLLER und WINTER, 2004).

Beiden Methoden ist die Umwandlung kompletter Oberflächen in strukturierte superhydrophobe Oberflächen gemein. Eine selektive Superhydrophobierung nur der Fehlstelle ist nicht möglich.

Tenside sind grenzflächenaktive Substanzen, die an Oberflächen Adsorptionsschichten bilden (DÖRFLER, 2002). Dabei müssen verschiedene Aspekte der besonderen Eigenschaften von Tensiden beachtet werden, so z. B. die polaren Gruppen und der Ladungszustand des Tensids. Auch die Hydrophilie oder Hydrophobie, der Ladungszustand und die Ladungsverteilung der Festkörperoberfläche spielt eine Rolle (DÖRFLER, 2002). Ist die Festkörperoberfläche ungeladen und hydrophob, orientieren sich die hydrophoben Alkylketten des Tensids zur Festkörperoberfläche. Die Adsorptionsschicht ist monomolekular. Wird ein kationisches Tensid auf eine negativ geladene Festkörperoberfläche gegeben, entsteht zunächst durch eine Ladungskompensation eine Monoschicht. In dieser Schicht neutralisieren die positiv geladenen Kopfgruppen des Tensids die Überschussladung der Festkörperoberfläche. Anschließend kann es durch weitere Tenside in Lösung zu Verzahnungen zwischen den Kohlenwasserstoffketten der Tenside kommen und es bildet sich eine elektrochemische Doppelschicht.

Viele technische strukturierte superhydrophobe Oberflächen, wie z. B. die Fassadenfarbe Lotusan®, besitzen einen mineralischen Untergrund. Die Beschädigung dieser Oberflächen, d. h. die lokale Abtragung der Oberfläche,

setzt diesen mineralischen Untergrund frei. Dieser ist negativ geladen (DE GENNES et al., 2004). Deshalb weisen diese Fehlstellen eine höhere Oberflächenspannung auf und werden vom Tensid besser benetzt als die unbeschädigten ungeladenen superhydrophoben Bereiche der Oberfläche.

Um eine negativ geladene Oberfläche mit Hilfe von Tensiden zu hydrophobieren, sollten kationische Tenside verwendet werden (ROSEN, 2004). Diese lagern mit ihrer positiv geladenen hydrophilen Kopfgruppe an die Oberflächen an. Der hydrophobe Rest des Tensids bildet die neue hydrophobe Oberfläche (ROSEN, 2004). Aufgrund dieser hydrophoben Wirkung werden kationische Tenside auch als Trocknungshilfe in Autowaschanlagen verwendet.

In den Versuchen, die in Kapitel 4.7 und 4.8 beschrieben werden, zeigten die verwendeten kationischen Tenside die für eine Trägerdispersion wünschenswertesten Eigenschaften. So zeigten sie im Vergleich zu den untersuchten Tensiden der anderen Klassen den geringsten Einfluss auf die Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf strukturierten superhydrophoben Kunststoffoberflächen (siehe Kapitel 4.7.1). Auch zeigten die mit dem kationischen Tensid behandelten Oberflächen die geringste Restkontamination nach Benebelung (siehe Kapitel 4.7.3). Auf eine beschädigte strukturierte superhydrophobe Oberfläche gesprüht, zeigten kationische Tensid-Dispersionen ein selektives Benetzungsverhalten lokal in den Fehlstellen (siehe Kapitel 4.7.4). Außerdem konnte die Benetzung einer hydrophilen Oberfläche mit einem kationischen Tensid (Gloss Dryer[®]) diese hydrophobieren (siehe Kapitel 4.8.2).

Fazit

Technische Oberflächen lassen sich mit Hilfe von kationischen Tensiden hydrophobieren. Deshalb wurde die kationische Mikroemulsion Gloss Dryer[®] als Trägerdispersion ausgewählt.

5.5 Regeneration der Superhydrophobie in Fehlstellen auf technischen Oberflächen

Es konnte gezeigt werden, dass die kationische Mikroemulsion Gloss Dryer[®] Oberflächen hydrophobiert. Die Zugabe von hydrophoben Partikeln verschiedener Größe sollte eine hierarchische Strukturierung in den Fehlstellen der

behandelten Oberflächen erzeugen und die hydrophobierende Wirkung dieser Mikroemulsion verstärken (LAFUMA und QUÉRÉ, 2003). Die hierarchische Strukturierung sollte dabei für eine Stabilisierung des Cassie-Zustandes der Wassertropfen auf der Oberfläche sorgen (CARBONE und MANGIALARDI, 2005). Die Strukturierung der Glasoberfläche mit Hilfe der Partikel zeigte nur einen geringen Einfluss auf den Kontaktwinkel von Wasser. Zwar wurden auf den Oberflächen, die vorher in die Partikel-Dispersion getaucht wurden, höhere Kontaktwinkel gemessen als auf den nur mit Gloss Dryer[®] behandelten Oberflächen. Aber diese hohen Kontaktwinkel scheinen hauptsächlich durch die Nanostrukturierung der Oberfläche durch TEGOTOP[®] 105 verursacht worden zu sein. Die Behandlung einer Glasoberfläche ausschließlich mit TEGOTOP[®] 105 führte nämlich zu ähnlich hohen Kontaktwinkeln. Somit scheint auf strukturierten superhydrophoben Oberflächen die Nanostrukturierung wichtiger für hohe Kontaktwinkel zu sein als die Mikrostrukturierung. So konnten FENG et al. (2002) auf mit Kohlenstoffnanoröhrchen strukturierten Oberflächen Kontaktwinkel von ca. 159° messen. Diese Oberflächen wiesen jedoch Abrollwinkel von über 30° auf.

Mikrostrukturierte Oberflächen, die zusätzlich mit Kohlenstoffnanoröhrchen strukturiert wurden, wiesen Kontaktwinkel von 166° und Abrollwinkel von 3° auf. Für einen niedrigen Abrollwinkel von Wasser auf Oberflächen ist also die Kombination aus Mikro- und Nanostrukturierung entscheidend.

In den Versuchen, die im Kapitel 4.9 beschrieben werden, konnte dieser Einfluss der hierarchischen Strukturierung auf den Abrollwinkel von Wasser auf strukturierten superhydrophoben Oberflächen nachgewiesen werden. Nach Eintauchen der Glasoberfläche in die mit Partikel versetzte Mikroemulsion wurden auf dieser Oberfläche Abrollwinkel von unter 10° gemessen. Das Hinzufügen von Partikeln verschiedener Größe zur Mikroemulsion Gloss Dryer[®] führte zu einer Zunahme des Kontaktwinkels und einer Abnahme des Abrollwinkels im Vergleich zur alleinigen Behandlung der hydrophilen Glasoberfläche mit der Mikroemulsion Gloss Dryer[®] (Kapitel 4.9.2).

Entscheidend für den Einfluss der Partikel in einer Regenerationsdispersion Einfluss auf die Benetzung von Wasser auf der zu behandelten Oberfläche ist die gleichmäßige Verteilung der Partikel auf dieser Oberfläche. Dazu muss schon in der Dispersion die Agglomerationen der Partikel verhindert werden.

Für eine gleichmäßige Verteilung der Partikel muss die flüssige Phase der Dispersion die Oberfläche der Partikel benetzen können. Die Zugabe der Mikroemulsion Gloss Dryer[®] setzt die Oberflächenspannung der Partikel herab. Somit kann die flüssige Phase die Partikeloberfläche benetzen. Dieser Zustand muss jedoch dauerhaft stabilisiert werden, so dass auch bei langer Lagerung der Regenerationsdispersion keine erneute Zusammenlagerung der Partikel stattfindet. Dispergiermittel mit Tensidcharakter können diese erneute Agglomeration durch die Neutralisierung der zwischen den Partikeln auftretenden Anziehungskräfte verhindern.

Auch die Art der Auftragung ist für eine Gleichverteilung der Partikel auf der Oberfläche der Fehlstelle entscheidend. Dabei gibt es drei gebräuchliche Methoden der Auftragung auf Oberflächen: Aufsprühen, Eintauchen und Anstreichen. Das Anstreichen der beschädigten strukturierten superhydrophoben Oberflächen mit einer Regenerationsdispersion würde jedoch zu einer Abtragung der mechanisch empfindlichen Strukturen und somit zu weiteren Fehlstellen führen. Für das Auftragen von Filmen auf großen Oberflächen durch Aufsprühen werden im Vergleich zu den beiden anderen Auftragsarten nur geringe Mengen einer Lösung benötigt (DECHER und SCHLENOFF, 2003). Jedoch führen die Partikel in Mikrometer-Größe in der verwendeten Testdispersion zur Verstopfung der Öffnung der Sprühflasche. Außerdem kommt es aufgrund der flächigen Auftragung zu Maskierungen auf den unbeschädigten superhydrophoben Bereichen der Oberfläche durch die Regenerationsdispersion.

Eine gleichmäßige Benetzung hydrophiler Oberflächen mit der Testdispersion und eine regelmäßige Verteilung der hydrophoben Partikel konnte durch die Tauchbeschichtung (Dip-Coating) erreicht werden. Mit Hilfe dieser Methode lassen sich dünne Filme, die die gesamte Oberfläche bedecken, erzeugen. Jedoch kann die Schichtdicke variieren. Am oberen Ende der zuvor eingetauchten Oberfläche ist dieser Film jedoch dünner als am unteren Ende (DE GENNES et al., 2004). Auch kann es zu Ankonzentrierungen von Partikeln am unteren Ende der Oberfläche schon bei optisch kaum wahrzunehmender Neigung der Oberfläche kommen. Außerdem ist die Schichtdicke von der Geschwindigkeit abhängig, mit der man die Oberfläche aus der Dispersion zieht. Es werden für diese Methode der Auftragung zusätzlich große Mengen

der Regenerationsdispersion benötigt. Für große Oberflächen ist diese Art der Auftragung somit ungeeignet.

Fazit

Die Zugabe von Partikeln in die Regenerationsdispersion schränkt die Art der Auftragung ein, da die gleichmäßige Verteilung dieser Partikel auf der zu reparierenden Oberfläche eine besondere Herausforderung während der Lagerung und Auftragung darstellt. Die Auftragung durch Aufsprühen stellt die kostengünstigste und für den Endverbraucher praktikabelste Methode zur Auftragung dar. Dazu muss aber die Sprüheinrichtung so verändert werden, dass es nicht zu Verstopfungen kommen kann.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Immink, Henning (2009). Superhydrophobe Oberflächen: Funktionserhaltung durch Regeneration. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. 171 pp.

Viele pflanzliche Oberflächen weisen eine räumliche Mikrostrukturierung auf. Diese Mikrostrukturen sind häufig zusätzlich mit hydrophoben Wachsstrukturen bedeckt. Aufgrund dieser hierarchischen Strukturierung und der Chemie der Wachsstrukturen sind diese Oberflächen superhydrophob. Seit der Entdeckung des Zusammenhangs zwischen der hydrophoben Skulpturierung von biologischen Oberflächen und der damit einhergehenden selbstreinigenden Eigenschaften sind superhydrophobe Oberflächen im Fokus der wissenschaftlichen Forschung. Die Empfindlichkeit der feinen hydrophoben Oberflächenstrukturen gegenüber mechanischer Beschädigung verhindert jedoch bislang einen breiteren Einsatz dieser Oberflächen im Alltag. In Zusammenarbeit mit industriellen Partnern der Produktion chemischer Komponenten (Evonik Industries AG) und der Herstellung umweltschonender Verbraucherprodukte (Werner & Mertz) wurde eine benetzende Trägerdispersion entwickelt, die gezielt in den Beschädigungen haftet. Diese Trägerdispersion soll als Carrier von Reparaturbausteinen dienen, die die Oberflächenstrukturierung und die Hydrophobie an den Beschädigungen regenerieren.

In der vorliegenden Arbeit wurde zunächst mittels der Weißlichtprofilometrie (WP) die Mikrostrukturierung auf biologischen und technischen unterschiedlich strukturierten Oberflächen untersucht. Die WP ist eine in der Industrie bereits etablierte Methode zur Oberflächencharakterisierung, die industriell standardisierte Oberflächenparameter einsetzt. Diese Oberflächenparameter wurden auf ihre Eignung zur Charakterisierung unterschiedlich strukturierter Oberflächen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich diese Parameter zur Charakterisierung der untersuchten Oberflächen anhand der Höhe der Mikrostrukturen eignen. Somit lassen sich mit dieser Methode die für die Selbstreinigung relevanten Strukturparameter der biologischen Vorbilder für eine technische Übertragung schnell und probenschonend ermittelt werden.

Der Vergleich der Verteilung und Höhe der Mikrostrukturen mit den gemessenen Kontakt- und Abrollwinkeln auf den untersuchten Oberflächen zeigten

einen Einfluss der Mikrostrukturierung besonders auf die Abrollwinkel von Wasser.

Es wurde eine Methode zur quantitativen Analyse der Selbstreinigungsfähigkeit von superhydrophoben Oberflächen entwickelt. Mit Hilfe dieser Methode können die Auswirkungen von Fehlstellen auf diesen Oberflächen quantitativ erfasst werden.

Dabei konnte nachgewiesen werden, dass Fehlstellen auf superhydrophoben Oberflächen Angriffspunkte für eine Reparaturdispersion sein können, da diese weniger hydrophob sind als die intakten Bereiche. Somit können kationische Dispersionen in diesen Fehlstellen haften, speziell dort spreiten und die Hydrophobie wiederherstellen.

Kontaminationsversuche auf beschädigten strukturierten superhydrophoben Oberflächen zeigten, dass kleine Fehlstellen mit einer Breite von ca. 30 μm keine Auswirkungen auf die Selbstreinigung haben.

In Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern Evonik Industries AG wurde eine benetzende Trägerdispersion entwickelt, die in den Fehlstellen von superhydrophoben Oberflächen haftet, dort spezifisch spreitet und die Hydrophobie lokal regeneriert.

Es gelang im Rahmen dieser Arbeit nicht, die Superhydrophobie gezielt in Fehlstellen auf beschädigten strukturierten selbstreinigenden Oberflächen erfolgreich zu regenerieren. Jedoch konnte als erster Schritt in der Entwicklung einer Reparaturdispersion in einem innovativen Ansatz der Trägerdispersion zusätzlich Partikel in der Größe von einigen Mikro- und Nanometern zugesetzt werden. Die gleichmäßige Beschichtung einer hydrophilen Oberfläche mit dieser Dispersion erzeugte eine superhydrophobe Oberfläche. Somit konnte prinzipiell die Machbarkeit einer Reparaturdispersion bestätigt werden.

7 SUMMARY

Immink, Henning (2009). Original German title: Superhydrophobe Oberflächen: Funktionserhaltung durch Regeneration. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. 171 pp.

Most plant surfaces exhibit microstructures covered with an additional superimposed layer of three-dimensional epicuticular wax crystals. Because of this hierarchical composition and the hydrophobicity of the wax crystals these surfaces are superhydrophobic. After discovering the correlation between the hydrophobic structuring of biological surfaces and the self-cleaning properties superhydrophobic surfaces are in the focus of scientific research. The sensitivity of the hierarchical structures on the superhydrophobic surfaces to mechanical damage inhibits the general application of these surfaces in everyday life. A dispersion of surfactants was developed in cooperation with different industrial partners, which specifically clinged to defects on superhydrophobic surfaces. Some of these cooperation partners were the chemicals business area of Evonik Industries AG, which produces specialty chemicals, and Werner & Mertz, which manufactures products in cleaning, care and conservation products. The developed dispersion should act as a carrier for repairing blocks, which should regenerate the destroyed surface structures and the hydrophobicity in the defects.

In this thesis the different microstructuring of biological and technical surfaces were measured using optical profilometry (OP). The OP became a standard method in quality control in the industry and generates surface parameters to characterise the surface topography. These surface parameters were tested for the aptitude to characterise differently structured surfaces. The results show that these parameters are qualified for characterisation of the analysed surfaces by their microstructures. Thus with the OP structure parameters of the biological examples relevant for self-cleaning can be measured fast and gently for technical transfer.

The comparison between distribution and height of the microstructures and the contact angles and roll-off angles of water on the corresponding surfaces clarify the influence of the microstructures. Especially the measured roll-off angles are affected by the microstructures on surfaces.

A method to quantify the self-cleaning efficiency of superhydrophobic surfaces was developed. With this method the impact of defects on these surfaces can be quantify.

It could be proven that defects on superhydrophobic surfaces can be points of action for repairing dispersions, because the defects on superhydrophobic surfaces are less hydrophobic than the undamaged area on the surface. Therefore cationic dispersions can cling to these defects, spread locally inside the defects and regenerate the hydrophobicity. Contamination experiments with damaged superhydrophobic surfaces showed, that small defects do not interfere with the superhydrophobicity.

In cooperation with Evonik Industries AG a carrier dispersion was developed, which cling to the defects on superhydrophobic surfaces an restore the hydrophobicity locally in the defects.

The Development of a repairing dispersion, specifically regenerating superhydrophobicity in defects of water-repellent surfaces, was not successful. But in an innovative approach micro- and nanoscale particles were added to the carrier dispersion. The uniform coating with this dispersion converted a hydrophilic surface to a superhydrophobic one. This confirms the feasibility of a repairing dispersion in principle.

8 DANKSAGUNG

Ich danke sehr herzlich allen, die zur Entstehung und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Zu nennen sind...

Das Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) für die Finanzierung des Projektes „Biomimetische superhydrophobe Oberflächen: Funktionserhaltung durch Regeneration“ (Förderkennzeichen 01RI05097), in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstand. Namentlich seien hier Dipl.-Ing. Roland Keil und Herr Michael Schulte genannt.

Prof. Dr. Wilhelm Barthlott (Nees-Institut) für die Betreuung der vorliegenden Arbeit, der steten Diskussionsbereitschaft und der hilfreichen Ratschläge.

Prof. Dr. Kerstin Koch (Nees-Institut, jetzt Hochschule Rhein-Waal) für die Übernahme des Koreferates und für die vielen kritischen Hinweise besonders in der Endphase dieser Arbeit.

Prof. Dr. Helmut Schmitz (Institut für Zoologie) und Herrn Prof. Dr. Klaus Wandelt (Institut für Physikalische und Theoretische Chemie) für die Bereitschaft, als Gutachter dieser Arbeit tätig zu sein.

Die Kooperationspartner Evonik Industries AG (Dr. Matthias Naumann und Dr. Joachim Venzmer) für die Bereitstellung der verschiedenen Tenside und Tensid-Dispersionen, die Technische Universität Dortmund (Prof. Dr. Heinz Rehage und Dipl. Chem. Silke Dallmann) für unterstützende Messungen, Werner & Mertz (Dr. Ralf Haak) und CAM-D Technologies GmbH (Dr. Hubert Kuhn).

Dr. Manuel Spaeth (Nees-Institut, jetzt Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.) für die vielen hilfreichen Ratschläge, kritischen Anmerkungen und Diskussionen, die sehr wichtig für das Gelingen dieser Arbeit waren.

Dipl.-Biol. Anna Julia Schulte (Nees-Institut) für die aktive Mitarbeit im Projekt als Koordinatorin und für die konstruktive Unterstützung und die Ratschläge besonders in der Endphase des Projektes.

Dr. Andreas Solga (Nees-Institut, jetzt RIFCon GmbH) für die Unterstützung und die Ratschläge besonders zu Fragen der Statistik.

Herr Wolfgang Roden (Nees-Institut) für die stete Unterstützung auch nach der Arbeitszeit.

Herr Hans-Jürgen Ensikat (Nees-Institut) für die hilfreichen Diskussionen und die kritischen Anmerkungen.

Die Kollegen der früheren Arbeitsgruppe „Bionik“ (Nees-Institut) für das angenehme Arbeitsklima, die motivierende Zusammenarbeit, und die Vielzahl hilfreicher fachlicher Gespräche bedanken. Namentlich seien hier Dr. Zdenek Cerman und Dipl.-Biol. Boris Striffler genannt.

Die jetzige Arbeitsgruppe „Biologische Grenzflächen und Bionik“ (Nees-Institut). Mein besonderer Dank gilt hierbei Dr. Petra Ditsche-Kuru und Dr. Holger Bohn für die fachliche Unterstützung und die zahlreichen hilfreichen Diskussionen.

Die Menschen, die mich auf dem langen Weg bis zur Beendigung dieser Arbeit begleitet haben. Mein besonderer Dank gilt hierbei meinen Geschwistern, auf deren Rückhalt ich mich auch in Zeiten großer Schwierigkeiten verlassen konnte. Meinen Eltern möchte ich für ihre fortwährende Unterstützung innig danken. Ohne sie wäre diese Dissertation niemals zustande gekommen. Deshalb möchte ich die Arbeit meiner Mutter und meinem Vater widmen.

9 LITERATURVERZEICHNIS

- BARTHLOTT, W. (1990): Scanning electron microscopy of the epidermal surface in plants. *In* D. Claugher [ed.], Application of the scanning EM in taxonomy and functional morphology, 69-94. Clarendon Press, Oxford.
- BARTHLOTT, W. (1998): Selbstreinigende Oberflächen von Gegenständen sowie Verfahren zur Herstellung derselben. Deutschland: Patent, EP 0772514 B1, 8.
- BARTHLOTT, W., EHLER, N. (1977): Raster-Elektronenmikroskopie der Epidermis-Oberflächen von Spermatophyten. *Tropische und Subtropische Pflanzenwelt* 19: 367-467.
- BARTHLOTT, W., WOLLENWEBER, E. (1981): Zur Feinstruktur, Chemie und taxonomischen Signifikanz epicuticularer Wachse und ähnlicher Sekrete. *Tropische und subtropische Pflanzenwelt* 32: 7-67.
- BARTHLOTT, W., NEINHUIS, C. (1997): Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* 202: 1-8.
- BARTHLOTT, W., NEINHUIS, C., CUTLER, D., DITSCH, F., MEUSEL, I., THEISEN, I., WILHELMI, H. (1998): Classification and terminology of plant epicuticular waxes. *Botanical Journal of the Linnean Society* 126: 237-260.
- BERGMANN, L., SCHAEFER, C. (1998): Lehrbuch der Experimentalphysik: Mechanik, Relativität, Wärme. Walter de Gruyter, Berlin.
- BHUSHAN, B. (2002): Introduction to tribology. Wiley, New York.
- BHUSHAN, B. (2009): Biomimetics: lessons from nature-an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 367: 1445-1486.

- BHUSHAN, B., JUNG, Y. C. (2006): Micro- and nanoscale characterization of hydrophobic and hydrophilic leaf surfaces. *Nanotechnology* 17: 2758-2772.
- BHUSHAN, B., JUNG, Y. C. (2007): Wetting study of patterned surfaces for superhydrophobicity. *Ultramicroscopy* 107: 1033-1041.
- BHUSHAN, B., JUNG, Y. C., KOCH, K. (2009a): Micro-, nano- and hierarchical structures for superhydrophobicity, self-cleaning and low adhesion. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 367: 1631-1672.
- BHUSHAN, B., JUNG, Y. C., NIEMIETZ, A., KOCH, K. (2009b): Lotus-Like Biomimetic Hierarchical Structures Developed by the Self-Assembly of Tubular Plant Waxes. *Langmuir* 25: 1659-1666.
- BICO, J., MARZOLIN, C., QUÉRÉ, D. (1999): Pearl drops. *Europhysics Letters* 47: 220-226.
- BICO, J., TORDEUX, C., QUÉRÉ, D. (2001): Rough wetting. *Europhysics Letters* 55: 214-220.
- BICO, J., THIELE, U., QUÉRÉ, D. (2002): Wetting of textured surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 206: 41-46.
- BÜHL, A., ZÖFEL, P. (2002): SPSS 11: Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows. Addison-Wesley, München.
- CALLIES, M., QUÉRÉ, D. (2005): On water repellency. *Soft Matter* 1: 55-61.
- CARBONE, G., MANGIALARDI, L. (2005): Hydrophobic properties of a wavy rough substrate. *The European Physical Journal E* 16: 67-76.

- CARUSO, M. M., DELAFUENTE, D. A., HO, V., SOTTOS, N. R., MOORE, J. S., WHITE, S. R. (2007): Solvent-promoted self-healing epoxy materials. *Macromolecules* 40: 8830-8832.
- CASSIE, A. B. D. (1948): Contact angles. *Discussions of the Faraday Society* 3: 11-16.
- CASSIE, A. B. D., BAXTER, S. (1944): Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society* 40: 546-551.
- CERMAN, Z. (2007): Superhydrophobie und Selbstreinigung: Wirkungsweise, Effizienz und Grenzen bei der Abwehr von Mikroorganismen. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- CHOW, T. S. (2003): Size-dependent adhesion of nanoparticles on rough substrates. *Journal of physics: Condensed Matter* 15: L83-L87.
- CLEFF, T. (2008): Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse: Eine computergestützte Einführung mit Excel, SPSS und STATA Gabler, Wiesbaden.
- DE GENNES, P.-G., BROCHARD-WYART, F., QUÉRÉ, D. (2004): Capillarity and wetting phenomena: Drops, bubbles, pearls, waves. Springer, New York, Berlin, Heidelberg.
- DE GENNES, P. G. (1985): Wetting: Statics and dynamics. *Reviews of Modern Physics* 57: 827-863.
- DECHER, G., SCHLENOFF, J. B. (2003): Multilayer thin films: Sequential assembly of nanocomposite materials. Wiley-VCH, Weinheim
- DIEHL, J. M., STAUFENBIEL, T. (2002): Statistik mit SPSS Version 10 + 11. Klotz, Eschborn.

- DÖRFLER, H.-D. (2002): Grenzflächen und kolloid-disperse Systeme: Physik und Chemie. Springer, Berlin.
- DUPUIS, A., YEOMANS, J. M. (2005): Modelling droplets on superhydrophobic surfaces: Equilibrium states and transitions. *Langmuir* 21: 2624-2629.
- ENGEL, H. (1939): Das Verhalten der Blätter bei Benetzung mit Wasser. *Jahrbücher für wissenschaftliche Botanik* 48: 816-861.
- ENSIKAT, H.-J., BARTHLOTT, W. (1993): Liquid substitution: A versatile procedure for SEM specimen preparation of biological materials without drying or coating. *Journal of microscopy* 172: 195-203.
- ENSIKAT, H.-J., SCHULTE, A. J., KOCH, K., BARTHLOTT, W. (2009): Droplets on superhydrophobic surfaces: Visualization of the contact area by cryo-scanning electron microscopy. *Langmuir* 25: 13077-13083.
- EXTRAND, C. W. (2002): Model for contact angles and hysteresis on rough and ultraphobic surfaces. *Langmuir* 18: 7991-7999.
- EXTRAND, C. W. (2004): Criteria for ultralyophobic surfaces. *Langmuir* 20: 5013-5018.
- FENG, L., LI, S., LI, Y., LI, H., ZHANG, L., ZHAI, J., SONG, Y., LIU, B., JIANG, L., ZHU, D. (2002): Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial. *Advanced Materials* 14: 1857-1860.
- FLEMMING, M. (2006): Methoden der Simulation und Charakterisierung von nanostrukturierten ultrahydrophoben Oberflächen für optische Anwendungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau.
- FOGG, G. E. (1947): Quantitative studies on the wetting of leaves by water. *Proceedings of the Royal Society of London B* 134: 503-522.

- FOGG, G. E. (1948): Adhesion of water to the external surfaces of leaves. *Discussions of the Faraday Society* 3: 162-169.
- FÜRSTNER, R. (2002): Untersuchungen zum Einfluss von Struktur und Chemie auf die Benetzbarkeit und die Selbstreinigung superhydrophober Oberflächen. Shaker-Verlag, Aachen.
- FÜRSTNER, R., BARTHLOTT, W., NEINHUIS, C., WALZEL, P. (2005): Wetting and self-cleaning properties of artificial superhydrophobic surfaces. *Langmuir* 21: 956-961.
- GOLDSTEIN, J. I., NEWBURY, D. E., ECHLIN, P., JOY, D. C., FIORI, C., LIFSHIN, E. (1981): Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. Plenum Press, New York, London.
- GÜNTHER, I., WORTMANN, G. B. (1966): Dust on the surface of leaves. *Journal of Ultrastructure Research* 15: 522-527.
- HOLLOWAY, P. J. (1969a): Chemistry of leaf waxes in relation to wetting. *Journal of the science of food and agriculture* 20: 124-128.
- HOLLOWAY, P. J. (1969b): The effects of superficial wax on leaf wettability. *Annals of Applied Biology* 63: 145-153.
- HOLLOWAY, P. J. (1970): Surface factors affecting the wetting of leaves. *Pesticide Science* 1: 156-163.
- HOLLOWAY, P. J. (1971): The chemical and physical characteristics of leaf surfaces. In T. F. Preece and C. H. Dickinson [eds.], *Ecology of leaf surface micro-organisms*, 39-53. Academic Press, New York, London.
- JUNG, Y. C., BHUSHAN, B. (2006): Contact angle, adhesion and friction properties of micro-and nanopatterned polymers for superhydrophobicity. *Nanotechnology* 17: 4970-4980.

- KIJLSTRA, J., REIHS, K., KLAMT, A. (2002): Roughness and topology of ultra-hydrophobic surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 206: 521-529.
- KOCH, K., BARTHLOTT, W. (2009): Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: An inspiration for biomimetic materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 367: 1487-1509.
- KOCH, K., DOMMISSE, A., BARTHLOTT, W. (2006): Chemistry and crystal growth of plant wax tubules of lotus (*Nelumbo nucifera*) and nasturtium (*Tropaeolum majus*) leaves on technical substrates. *Crystal Growth & Design* 6: 2571-2578.
- KOCH, K., BHUSHAN, B., BARTHLOTT, W. (2008): Diversity of structure, morphology and wetting of plant surfaces. *Soft Matter* 4: 1943-1963.
- KOCH, K., BHUSHAN, B., BARTHLOTT, W. (2009): Multifunctional surface structures of plants: An inspiration for biomimetics. *Progress in Materials Science* 54: 137-178.
- KRAUSE, S. A. (2001): Entwicklung und Charakterisierung von Mikroemulsionen zur dermalen Applikation von Arzneistoffen. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- KRÜGER-SEHM, R., SEEWIG, J. (2007): Messunsicherheit bei der Bestimmung von Rauheitskennwerten mit Tastschnittgeräten *Technisches Messen* 74: 529-537.
- KUISMA, R., PESONEN-LEINONEN, E., REDSVEN, I., KYMÄLÄINEN, H. R., SAARIKOSKI, I., SJÖBERG, A. M., HAUTALA, M. (2005): Utilization of profilometry, SEM, AFM and contact angle measurements in describing surfaces of plastic floor coverings and explaining their cleanability. *Surface Science* 584: 119-125.

- LAFUMA, A., QUÉRÉ, D. (2003): Superhydrophobic states. *Nature Materials* 2: 457-460.
- LI, W., DIAO, Y. P., WANG, S. Y., FANG, G. P., WANG, G. C., DONG, X. J., LONG, S. C., QIAO, G. J. (2009): New roughness parameter for the characterization of regularly textured or ordered patterned superhydrophobic surfaces. *Langmuir* 25: 6076-6080.
- LUNDGREN, M., ALLAN, N. L., COSGROVE, T. (2007): Modeling of wetting: A study of nanowetting at rough and heterogeneous surfaces. *Langmuir* 23: 1187-1194.
- LUNDGREN, M., ALLAN, N. L., COSGROVE, T., GEORGE, N. (2003): Molecular dynamics study of wetting of a pillar surface. *Langmuir* ASAP Article.
- MARMUR, A. (2003): Wetting on hydrophobic rough surfaces: To be heterogeneous or not to be? *Langmuir* 19: 8343-8348.
- MARMUR, A. (2004): The lotus effect: Superhydrophobicity and metastability. *Langmuir* 20: 3517-3519.
- MARMUR, A. (2006a): Super-hydrophobicity fundamentals: Implications to biofouling prevention. *Biofouling* 22: 107-115.
- MARMUR, A. (2006b): Soft contact: Measurement and interpretation of contact angles. *Soft Matter* 2: 12-17.
- MCHALE, G., AQIL, S., SHIRTCLIFFE, N. J., NEWTON, M. I., ERBIL, H. Y. (2005): Analysis of droplet evaporation on a superhydrophobic surface. *Langmuir* 21.
- MIWA, M., NAKAJIMA, A., FUJISHIMA, A., HASHIMOTO, K., WATANABE, T. (2000): Effects of the surface roughness on sliding angles of water droplets on superhydrophobic surfaces. *Langmuir* 16: 5754-5760.

- MOCK, U. (2004): Über das Benetzungsverhalten polymermodifizierter Grenzflächen. Dissertation, Fakultät für Angewandte Wissenschaften, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- MOCKENHAUPT, B., ENSIKAT, H.-J., SPAETH, M., BARTHLOTT, W. (2008): Superhydrophobicity of biological and technical surfaces under moisture condensation: Stability in relation to surface structure. *Langmuir* 24: 13591-13597.
- MÜLLER, F., WINTER, P. (2004): Clean surfaces with the lotus-effect. *Jornadas comite espanol de la detergencia* 34: 103-111.
- NARHE, R. D., BEYSENS, D. A. (2006): Water condensation on a superhydrophobic spike surface. *Europhysics Letters* 75: 98-104.
- NEINHUIS, C., BARTHLOTT, W. (1997): Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany* 79: 667-677.
- NOSONOVSKY, M. (2007): Multiscale roughness and stability of superhydrophobic biomimetic interfaces. *Langmuir* 23: 3157-3161.
- NOSONOVSKY, M., BHUSHAN, B. (2005): Roughness optimization for biomimetic superhydrophobic surfaces. *Microsystem Technologies* 11: 535-549.
- NOSONOVSKY, M., BHUSHAN, B. (2007): Hierarchical roughness makes superhydrophobic states stable. *Microelectronic Engineering* 84: 382-386.
- ONDA, T., SHIBUICHI, S., SATOH, N., TSUJII, K. (1996): Super-water-repellent fractal surfaces. *Langmuir* 12: 2125-2127.
- PALZER, S., HIEBL, C., SOMMER, K., LECHNER, H. (2001): Einfluss der Rauigkeit einer Feststoffoberfläche auf den Kontaktwinkel. *Chemie Ingenieur Technik* 73: 1032-1038.

- PATHAN, A. K., BOND, J., GASKIN, R. E. (2008): Sample preparation for scanning electron microscopy of plant surfaces-Horses for courses. *Micron* 39: 1049-1061.
- QUÉRÉ, D. (2008): Wetting and roughness. *Annual Review of Materials Research* 38: 71-99.
- QUÉRÉ, D., LAFUMA, A., BICO, J. (2003): Slippery and sticky microtextured solids. *Nanotechnology* 14: 1109-1112.
- RAMÓN-TORREGROSA, P. J., RODRÍGUEZ-VALVERDE, M. A., AMIRFAZLI, A., CABRERIZO-VÍLCHEZ, M. A. (2008): Factors affecting the measurement of roughness factor of surfaces and its implications for wetting studies. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 323: 83-93.
- RASCH, B., FRIESE, M., HOFMANN, W., NAUMANN, E. (2006): Quantitative Methoden: Einführung in die Statistik. Springer-Medizin-Verlag, Heidelberg.
- READ, N. D., JEFFREE, C. E. (1991): Low-temperature scanning electron microscopy in biology. *Journal of Microscopy* 161: 59-72.
- REHAGE, H. (2005): Biomimetische Synthesen von Nanomaterialien: Selbstorganisation von Tensiden. *Chemie in unserer Zeit* 39: 36-44.
- RIEDERER, M., MÜLLER, C. (2006): Biology of the plant cuticle. Blackwell Publishing, Oxford.
- ROACH, P., SHIRTCLIFFE, N. J., NEWTON, M. I. (2008): Progress in superhydrophobic surface development. *Soft Matter* 4: 224-240.
- ROSEN, M. J. (2004): Surfactants and interfacial phenomena. Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey.

- SACHS, L., HEDDERICH, J. (2006): *Angewandte Statistik: Methodensammlung* mit R. Springer, Berlin.
- SCHONDELMAIER, D., CRAMM, S., KLINGELER, R., MORENZIN, J., ZILKENS, C., EBERHARDT, W. (2002): Orientation and self-assembly of hydrophobic fluoroalkylsilanes. *Langmuir* 18: 6242-6245.
- SHIBUICHI, S., ONDA, T., SATOH, N., TSUJII, K. (1996): Super water-repellent surfaces resulting from fractal structure. *The Journal of Physical Chemistry* 100: 19512-19517.
- SHIBUICHI, S., YAMAMOTO, T., ONDA, T., TSUJII, K. (1998): Super water- and oil-repellent surfaces resulting from fractal structure. *Journal of Colloid and Interface Science* 208: 287-294.
- SOKAL, R. R., ROHLF, F. J. (1995): *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research*. Freeman, New York.
- SOLGA, A., CERMAN, Z., STRIFFLER, B. F., SPAETH, M., BARTHLOTT, W. (2007): The dream of staying clean: Lotus and biomimetic surfaces. *Bioinspiration & Biomimetics* 2: 1-9.
- TORN, B. (2000): *Polymers and surfactants in solution and at interfaces*. Dissertation, Universität Wageningen.
- VAN DER ZWAAG, S., SCHMETS, A. J. M., VAN DER ZAKEN, G. (2007): *Self healing materials: An alternative approach to 20 centuries of materials science*. Springer, Dordrecht.
- VOLK, R. (2005): *Rauheitsmessung: Theorie und Praxis*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- WAGNER, P., FÜRSTNER, R., BARTHLOTT, W., NEINHUIS, C. (2003): Quantitative assessment to the structural basis of water repellency in natural and technical surfaces. *Journal of Experimental Botany* 54: 1295-1303.

- WANG, J. D., CHEN, H. S., SUI, T., LI, A., CHEN, D. R. (2009): Investigation on hydrophobicity of lotus leaf: Experiment and theory. *Plant Science* 176: 687-695.
- WENZEL, R. N. (1936): Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial and Engineering Chemistry* 28: 988-994.
- WERNER, O. (2003): Computer modelling of the influence of surface topography on water repellency and a study on hydrophobic paper surfaces with partly controlled roughness. Dissertation, Department of Physics and Measurement Technology, Universität Linköping.
- WHITE, S. R., SOTTOS, N. R., GEUBELLE, P. H., MOORE, J. S., KESSLER, M. R., SRIRAM, S. R., BROWN, E. N., VISWANATHAN, S. (2001): Autonomic healing of polymer composites. *Nature* 409: 794-797.
- WIER, K. A., MCCARTHY, T. J. (2006): Condensation on ultrahydrophobic surfaces and its effect on droplet mobility: Ultrahydrophobic surfaces are not always water repellent. *Langmuir* 22: 2433-2436.
- WOOL, R. P. (2008): Self-healing materials: A review. *Soft Matter* 4: 400-418.
- YOUNG, T. (1805): An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 95: 65-87.
- YOUNGBLOOD, J. P., SOTTOS, N. R. (2008): Bioinspired materials for self-cleaning and self-healing. *Mrs Bulletin* 33: 732-741.
- ZHANG, J., WANG, J., ZHAO, Y., XU, L., GAO, X., ZHENG, Y., JIANG, L. (2008): How does the leaf margin make the lotus surface dry as the lotus leaf floats on water? *Soft Matter* 4: 2232-2237.
- ZHANG, X. Z., ANDERSON, P., DOWKER, S. E. P., ELLIOTT, J. C. (2000): Optical profilometric study of changes in surface roughness of enamel during in vitro demineralization. *Caries Research* 34: 164-174.

- ZHU, L., FENG, Y. Y., YE, X. Y., ZHOU, Z. Y. (2005a): Tuning wettability and getting superhydrophobic surface by controlling surface roughness with well-designed microstructures. *Transducers`05*, Seoul, Korea: 1481-1484.
- ZHU, L., XIU, J., TAMIRISA, P. A., HESS, D. W., WONG, C.-P. (2005b): Superhydrophobicity on two-tier rough surfaces fabricated by controlled growth of aligned carbon nanotube arrays coated with fluorocarbon. *Langmuir* 21: 11208-11212.
- ZIEGENSPECK, H. (1942): Zur physikalischen Chemie unbenetzbarer besonders bewachster Blätter. *Kolloid-Zeitschrift* 100: 401-403.
- ZIMMERMANN, J., REIFLER, F. A., FORTUNATO, G., GERHARDT, L.-C., SEEGER, S. (2008): A simple, one-step approach to durable and robust superhydrophobic textiles. *Advanced Functional Materials* 18: 3662-3669.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abbildung 1:** Benetzungszustände einer Flüssigkeit auf einer glatten Festkörperoberfläche. A: Komplette Spreitung; B: partielle Benetzung.4
- Abbildung 2:** Flüssigkeitstropfen auf einer Festkörperoberfläche. Dargestellt sind die Grenzflächenspannungen γ_{LA} (Flüssigkeit/Gas), γ_{SL} (Festkörper/Flüssigkeit) und γ_{SA} (Festkörper/Gas), die an ihrer Dreiphasenkontaklinie den Kontaktwinkel bestimmen (Young-Gleichung). 4
- Abbildung 3:** Seitenansicht der möglichen Benetzungsstadien von Wasser auf einer superhydrophoben strukturierten Oberfläche. A: Das Wasser ist zwischen die Strukturen der Oberfläche gedrungen (Wenzel-Stadium); B: Das Wasser kann nicht zwischen die Strukturen der Oberfläche eindringen (Cassie-Baxter-Stadium); verändert nach DUPUIS und YEOMANS, 2005.....6
- Abbildung 4:** Weitere mögliche Benetzungszustände auf strukturierten Oberflächen (neben dem Wenzel-Stadium und dem Cassie-Baxter-Stadium. A: Wasser dringt zwischen die Strukturen ein. Die Wasserfront ist mit einem Pfeil gekennzeichnet; B: Ein Wasserfilm dringt zwischen die Strukturen ein. Der Wassertropfen liegt auf der Wasser-Festkörper-Grenzfläche auf. θ^* ist der sichtbare Kontaktwinkel; verändert nach BICO et al., 2002.....9
- Abbildung 5:** Regeneration von zerstörten Strukturen (Fehlstelle) auf einer beschädigten superhydrophoben Oberfläche mit Hilfe einer Tensid-Dispersion mit Reparaturbausteinen..... 18
- Abbildung 6:** REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Alocasia macrorrhiza* (Gruppe 1).37
- Abbildung 7:** REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Euphorbia myrsinites* (Gruppe 1).38
- Abbildung 8:** REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Euphorbia myrsinites* (Gruppe 1).38
- Abbildung 9:** REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Oryza sativa* (Gruppe 1).....39
- Abbildung 10:** REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Oryza sativa* (Gruppe 1).....39
- Abbildung 11:** REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von *Xanthosoma robustum* (Gruppe 1).....40
- Abbildung 12:** REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von *Colocasia esculenta* (Gruppe 2).....41

Abbildung 13: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von <i>Colocasia esculenta</i> (Gruppe 2).....	41
Abbildung 14: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Euphorbia atropurpurea</i> (Gruppe 2).....	42
Abbildung 15: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von <i>Euphorbia atropurpurea</i> (Gruppe 2).....	42
Abbildung 16: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von <i>Xanthosoma nigrum</i> (Gruppe 2).....	43
Abbildung 17: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Eschscholzia californica</i> (Gruppe 3).....	44
Abbildung 18: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von <i>Eschscholzia californica</i> (Gruppe 3).....	44
Abbildung 19: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Alocasia robusta</i> (Gruppe 3).	45
Abbildung 20: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von <i>Alocasia robusta</i> (Gruppe 3).	45
Abbildung 21: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Alocasia macrorrhiza</i> (Gruppe 3).	46
Abbildung 22: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Berberis vulgaris</i> (Gruppe 3).	46
Abbildung 23: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Brassica oleracea</i> (Gruppe 3).	47
Abbildung 24: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Drimys winteri</i> (Gruppe 3).	47
Abbildung 25: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Eucalyptus macrocarpa</i> (Gruppe 3).	48
Abbildung 26: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Glycine max</i> (Gruppe 3).	48
Abbildung 27: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Iris unguicularis</i> (Gruppe 3).....	49
Abbildung 28: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Iris germanica</i> (Gruppe 3).....	49
Abbildung 29: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Liriodendron tulipifera</i> (Gruppe 3).	50

Abbildung 30: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattunterseite von <i>Liriodendron tulipifera</i> (Gruppe 3).	50
Abbildung 31: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Thalictrum flavum</i> (Gruppe 3).	51
Abbildung 32: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Tropaeolum majus</i> (Gruppe 3).	51
Abbildung 33: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Xanthosoma robustum</i> (Gruppe 3).	52
Abbildung 34: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Xanthosoma nigrum</i> (Gruppe 3).	52
Abbildung 35: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Triticum aestivum</i> (Gruppe 3).	53
Abbildung 36: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Clivia nobilis</i> (Gruppe 3).	53
Abbildung 37: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Cocos nucifera</i> (Gruppe 3).	54
Abbildung 38: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Coffea arabica</i> (Gruppe 3).	54
Abbildung 39: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Ficus elastica</i> (Gruppe 3).	55
Abbildung 40: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (B) der Blattoberseite von <i>Hedera helix</i> (Gruppe 3).	55
Abbildung 41: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der Blattoberseite von <i>Nelumbo nucifera</i> (Gruppe 4).	56
Abbildung 42: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der Muster-Kunststoffoberfläche mit Lotus-Effect [®] (Kunststoffinstitut Lüdenscheid, Gruppe 1).	57
Abbildung 43: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der Muster-Glasoberfläche „White Frost“ mit Lotus-Effect [®] (Ferro GmbH, Gruppe 1).	57
Abbildung 44: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der Lotusan [®] -Oberfläche (Sto AG, Gruppe 1).	58
Abbildung 45: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der TEGOTOP [®] 210-Oberfläche (Evonik Industries AG, Gruppe 1).	59
Abbildung 46: REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der unbehandelten Glasoberfläche (Kontrolle, Gruppe 1).	59

- Abbildung 47:** REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der hydrophobierten Kupferoberfläche (Bolta-Werke, Gruppe 2).....60
- Abbildung 48:** REM-Aufnahme (A) und WP-Diagramm (A) der Muster-Textiloberfläche mit Lotus-Effect® (ITV Denkendorf, Gruppe 3).....60
- Abbildung 50:** Höhe der Mikrostrukturen auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 1. OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 12 bis 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.62
- Abbildung 51:** Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 1. OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 9 bis 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.63
- Abbildung 52:** Höhe der Mikrostrukturen auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 2. OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 18 bis 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.64
- Abbildung 53:** Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 2. OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 9 bis 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.65
- Abbildung 54:** Höhe der Mikrostrukturen auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 3. OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 18 bis 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.66
- Abbildung 55:** Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf den pflanzlichen Oberflächen der Gruppe 3. OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 9 bis 10 Parallelen

pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.67

Abbildung 56: Höhe der Mikrostrukturen auf der Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* (Gruppe 4). Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.68

Abbildung 57: Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf der Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* (Gruppe 4). Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.69

Abbildung 58: Höhe der Mikrostrukturen auf technischen Oberflächen der Gruppe 1. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 12 bis 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.70

Abbildung 59: Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf technischen Oberflächen der Gruppe 1. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 6 bis 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.71

Abbildung 60: Höhe der Mikrostrukturen auf hydrophobierten Kupferoberflächen (Gruppe 2). Dargestellt ist der Boxplot von jeweils 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.....72

Abbildung 61: Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) auf hydrophobierten Kupferoberflächen (Gruppe 2). Dargestellt ist der Boxplot von jeweils 6 bis 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw.

unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.	73
Abbildung 62: Höhe der Mikrostrukturen auf der Muster-Textiloberflächen mit Lotus-Effect® (Gruppe 3). Dargestellt ist der Boxplot von jeweils 20 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.....	74
Abbildung 63: Anzahl der Mikrostrukturen pro Fläche (100 x 100 µm ²) auf der Muster-Textiloberflächen mit Lotus-Effect® (Gruppe 3). Dargestellt ist der Boxplot von jeweils 6 bis 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.	75
Abbildung 64: Die Strukturhöhe pflanzlicher Oberflächen (Mittelwerte der 2D-Profil-Vermessung) in Abhängigkeit von ausgesuchten Welligkeitsparametern (Mittelwerte der Berechnung der gefilterten WP-Daten). A: Wa (arithmetischer Mittelwert der Welligkeit), B: Wq (Quadratischer Mittenwert der Welligkeit), C: Wz (Summe aus der Höhe der größten Spitze und der Tiefe des größten Tales innerhalb einer Einzelmessstrecke), D: Wmax (maximale Tiefe der Welligkeit), E: Wp (Höhe der größten Spitze innerhalb der Einzelmessstrecke), F: Wt (Wellentiefe), G: Wpk (reduzierte Spitzenhöhe auf Ebene der Welligkeit); Schwarze Kurve: Lineare Regression der Mittelwerte ($y = mx + b$); R ² : Bestimmtheitsmaß (Maß für die Güte der Anpassung durch die Regressionsgerade); Dunkelblaue Raute: Werte der Pflanzen aus Gruppe 1; Rosa Quadrat: Werte der Pflanzen aus Gruppe 2; Gelbes Dreieck: Werte der Pflanzen aus Gruppe 3; Blaues Quadrat: Wert der Pflanze aus Gruppe 4.....	80
Abbildung 65: Die Strukturhöhe technischer Oberflächen (Mittelwerte der 2D-Profil-Vermessung) in Abhängigkeit von ausgesuchten Rauheits- und Welligkeitsparametern (Mittelwerte der Berechnung der gefilterten Primärdaten). A 1: Ra (Arithmetischer Mittenrauwert), B 1: Rq (Quadratischer Mittenrauwert), C 1: Rz (Gemittelte Rautiefe), D 1: Rmax (Maximale Rautiefe), E 1: Rt (Rautiefe), A 2-E 2: Der dem jeweiligen Rauheitsparameter (A 1-E 1) entsprechenden Welligkeitsparameter; schwarze Kurve: Lineare Regression der Mittelwerte ($y = mx + b$); R ² : Bestimmtheitsmaß (Maß für die Güte der Anpassung durch die Regressionsgerade).	85
Abbildung 66: Kontaktwinkel von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen mit sehr hohen Oberflächenstrukturen (Gruppe1). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil)	

begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.	86
Abbildung 67: Abrollwinkel von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen mit sehr hohen Oberflächenstrukturen (Gruppe 1). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.	87
Abbildung 68: Kontaktwinkel von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen mit hohen Oberflächenstrukturen (Gruppe 2). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.	88
Abbildung 69: Abrollwinkel von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen mit hohen Oberflächenstrukturen (Gruppe 2). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.	89
Abbildung 70: Kontaktwinkel von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen mit niedrigen bis glatten Oberflächenstrukturen (Gruppe 3). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.	90
Abbildung 71: Abrollwinkel von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen mit niedrigen bis glatten Oberflächenstrukturen (Gruppe 3). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer.	91
Abbildung 72: Kontaktwinkel von Wasser auf der Blattoberseite von <i>Nelumbo nucifera</i> (hohe Oberflächenstrukturen und hohe Strukturanzahl pro Fläche,	

Gruppe 4). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer. 92

Abbildung 73: Abrollwinkel von Wasser auf der Blattoberseite von *Nelumbo nucifera* (hohe Oberflächenstrukturen und hohe Strukturanzahl pro Fläche, Gruppe 4). OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer. 92

Abbildung 74: Kontaktwinkel von Wasser auf unterschiedlich strukturierten technischen Oberflächen. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 bis 12 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer..... 93

Abbildung 75: Abrollwinkel von Wasser auf unterschiedlich strukturierten technischen Oberflächen. Dargestellt sind die Boxplots von jeweils 10 bis 12 Parallelen pro Oberfläche. Die mittlere Linie markiert den Median der gemessenen Werte. Die Box wird vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt. Die Länge der oberen bzw. unteren Whisker beträgt das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Die einzelnen Punkte markieren die Ausreißer..... 94

Abbildung 76: REM-Aufnahmen einer hydrophobierten strukturierten Kupferoberfläche (Bolta-Werke GmbH); A: Kupferfolie ohne Fehlstelle, B: Kupferfolie mit Detail der gitterartigen Fehlstelle (mit Nadelspitze erzeugt) in der Bildmitte. 101

Abbildung 77: REM-Aufnahmen einer Glasoberfläche, beschichtet mit TEGOTOP[®] 210 (Evonik Industries AG); A: Oberfläche der TEGOTOP[®] 210-Beschichtung, B: Oberfläche der Fehlstelle (Beschichtung abgewischt)..... 102

Abbildung 78: REM-Aufnahmen einer strukturierten Muster-Glasoberfläche „White Frost“ mit Lotus-Effect[®] (Ferro GmbH). A: unbeschädigte Oberfläche, B: Oberfläche der Fehlstelle (mit Ätz-Lösung behandelt)..... 103

Abbildung 79: Kontaktwinkel von Wasser auf unbehandeltem Glas (Dunkelgrau), auf Glas beschichtet mit TEGOTOP[®] 210 (Evonik Industries AG, Grau) und auf einer Fehlstelle in der TEGOTOP[®] 210-Beschichtung (Hellgrau). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit

Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.	104
Abbildung 80: Abrollwinkel von Wasser auf unbehandeltem Glas (Dunkelgrau), auf Glas beschichtet mit TEGOTOP® 210 (Evonik Industries AG, Grau) und auf einer Fehlstelle in der TEGOTOP® 210-Beschichtung (Hellgrau). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.	105
Abbildung 81: Kontaktwinkel von Wasser auf Muster-Glasoberflächen „White Frost®“ mit Lotus-Effect® (Ferro GmbH, Grau) und auf Fehlstellen (Hellgrau). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.	106
Abbildung 82: Abrollwinkel von Wasser auf Muster-Glasoberflächen „White Frost®“ mit Lotus-Effect® (Ferro GmbH, Grau) und auf Fehlstellen (Hellgrau). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.	107
Abbildung 83: Zusammenhang zwischen der Kontamination von Glasoberflächen (Anteil der weißen Pixel an der Pixel-Gesamtzahl der REM-Aufnahme in %) mit Redwop™ und dem Fluoreszenzsignal (gemessen mit dem PAM in mV). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. schwarze Kurve: Lineare Regression der Mittelwerte ($y = mx + b$).	108
Abbildung 84: Restfluoreszenz (in %) von Redwop™ auf unbeschädigten hydrophobierten Kupferoberflächen (Bolta-Werke GmbH, Dunkelgrau) und hydrophobierten Kupferoberflächen mit Fehlstellen (Hellgrau) nach Kontamination und anschließender Benebelung (bei Lagerung der Proben von 45°). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 5 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.	109
Abbildung 85: Restfluoreszenz (in %) von Redwop™ auf Glas, beschichtet mit TEGOTOP® 210 (Evonik Industries AG), mit Fehlstellen (Dunkelgrau) und ohne Fehlstellen (Hellgrau) nach Kontamination und anschließender Benebelung (bei einer Lagerung der Proben von 30°). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 4 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.	110
Abbildung 86: Restfluoreszenz (in %) von Redwop™ in Fehlstellen (Hellgrau) und unbeschädigten Bereichen (Dunkelgrau) auf Muster-Glasoberflächen „White Frost®“ mit Lotus-Effect® (Ferro GmbH) nach Kontamination und anschließender Benebelung (bei einer Lagerung der Proben von 30°). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 7 Messungen mit	

Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.	111
Abbildung 87: Messung der Kontaktwinkel von Wasser auf Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect® (Kunststoff-Institut Lüdenscheid), die zuvor in verschiedene Tenside getaucht und anschließend getrocknet wurden. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 5 Parallelen bei den Tensid-behandelten Oberflächen und 12 Messungen bei den unbehandelten Oberflächen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.	113
Abbildung 88: Messung der Abrollwinkel von Wasser auf Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect® (Kunststoff-Institut Lüdenscheid), die zuvor in verschiedene Tenside getaucht und anschließend getrocknet wurden. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 5 Messungen bei den Tensid-behandelten Oberflächen und 12 Messungen bei den unbehandelten Oberflächen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.	114
Abbildung 89: Messung der Kontaktwinkel von Wasser auf Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect® (Kunststoff-Institut Lüdenscheid), die in verschiedene Tenside getaucht und anschließend getrocknet wurden; Dunkelgrau: Messung vor Kontamination und Benebelung, Hellgrau: Messung nach Kontamination und Benebelung; Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 12 Messungen bei der unbehandelten Kunststoffoberfläche und 5 Messungen bei den tensidgetauchten Oberflächen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.	116
Abbildung 90: Messung der Abrollwinkel von Wasser auf Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect® (Kunststoff-Institut Lüdenscheid), die in verschiedene Tenside getaucht und anschließend getrocknet wurden; Dunkelgrau: Messung vor Kontamination und Benebelung, Hellgrau: Messung nach Kontamination und Benebelung; Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 12 Messungen bei der unbehandelten Kunststoffoberfläche und 5 Messungen bei den tensidgetauchten Oberflächen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.	117
Abbildung 91: Restfluoreszenz (in %) von Redwop™ auf den mit Tensiden behandelten Muster-Kunststoffoberflächen mit Lotus-Effect® (Kunststoff-Institut Lüdenscheid) nach Kontamination und anschließender Benebelung (bei einer Lagerung der Proben von 45°). Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 5 Messungen bei den Tensid-behandelten Oberflächen und 12 Messungen bei den unbehandelten Oberflächen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.	118

- Abbildung 92:** REM-Aufnahmen von hydrophobierten strukturierten Kupferoberflächen, in die gitterartige Fehlstellen eingebracht und anschließend mit unterschiedlichen Tensid-Dispersionen besprüht wurden. A: mit tu0920a besprüht, B: mit tu0921a besprüht, C: mit tu0920b besprüht, D: mit tu0921b besprüht, E: mit 1%ger kationischer Dispersion besprüht, F: mit 5%ger kationischer Dispersion besprüht..... 120
- Abbildung 93:** Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf verschiedenen hydrophilen Oberflächen, unbehandelt (Dunkelgrau) und mit „Lotus-Effekt[®]-Aerosol TEGOTOP[®] 210 (Hellgrau) eingesprüht; A: Kontaktwinkel von Wasser auf den Oberflächen, B: Abrollwinkel von Wasser auf den Oberflächen. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant. 123
- Abbildung 94:** Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf unbehandeltem Glas, Glas mit TEGOTOP[®] 210 besprüht, Glas mit TEGOTOP[®] 210 und Gloss Dryer[®] besprüht und Glas mit TEGOTOP[®] 210 und Gloss Dryer[®] besprüht und anschließend beregnet (6,18ml/cm², Lagerung der Proben bei 45°). A: Kontaktwinkel von Wasser auf den Oberflächen, B: Abrollwinkel von Wasser auf den Oberflächen. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant. 125
- Abbildung 95:** Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf einer Fehlstelle in mit TEGOTOP[®] 210 beschichtetem Glas, einer Fehlstelle mit Gloss Dryer[®] besprüht und einer Fehlstelle mit Gloss Dryer[®] besprüht und anschließend beregnet (6,18ml/cm², Lagerung der Proben bei 45°). A: Kontaktwinkel von Wasser auf den Oberflächen, B: Abrollwinkel von Wasser auf den Oberflächen. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant. 126
- Abbildung 96:** REM-Aufnahme einer Fehlstelle in einer mit TEGOTOP[®] 210 beschichteten Glasoberfläche; A: Die Oberfläche wurde mit Gloss Dryer[®] eingesprüht, jedoch nicht beregnet; B: Die Oberfläche wurde mit Gloss Dryer[®] eingesprüht und anschließend beregnet (6,2ml/cm²). 127
- Abbildung 97:** hydrophobierte Kupferoberfläche (Bolta-Werke) mit Fehlstelle wurde mit unterschiedlichen Verdünnungen von TEGOTOP[®]105 besprüht; A: besprüht mit 100% TEGOTOP[®]105, B: besprüht mit 100% TEGOTOP[®]105 (Übersicht), C: besprüht mit TEGOTOP[®]105 (25% in Wasser), D: besprüht mit TEGOTOP[®]105 (25% in Wasser, Detail), E: besprüht mit TEGOTOP[®]105 (15% in Wasser), F: besprüht mit TEGOTOP[®]105 (15% in Wasser, Detail), G: besprüht mit TEGOTOP[®]105 (0,1% in Wasser und 7,5g/l TEGOTENS[®] B 810), H: besprüht mit TEGOTOP[®]105 (0,1% in Wasser und 7,5g/l TEGOTENS[®] B 810, Detail). 129
- Abbildung 98:** Kontaktwinkel von Wasser auf Glasoberflächen, die vorher in verschiedene Lösungen getaucht (Dauer: 10 sec) und anschließend

getrocknet wurden (Ausnahme: Glasoberfläche wurde mit TEGOTOP 105 eingesprüht und anschließend getrocknet). Auf den Oberflächen wurden 10 bis 20 Kontaktwinkel gemessen. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.131

Abbildung 99: Abrollwinkel von Wasser auf Glasoberflächen, die vorher in verschiedene Lösungen getaucht (Dauer: 10 sec) und anschließend getrocknet wurden (Ausnahme: Glasoberfläche wurde mit TEGOTOP 105 eingesprüht und anschließend getrocknet). Auf den Oberflächen wurden 10 bis 20 Kontaktwinkel gemessen. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.132

Abbildung 100: Restfluoreszenz (in %) von Redwop™ auf unterschiedlich behandelten Glasoberflächen nach Kontamination und anschließender Benebelung (bei einer Lagerung der Proben von 30°); „unbehandelt“: unbehandelte Glasoberfläche; „TEGOTOP 210“: Glasoberfläche, die vorher mit TEGOTOP® 210 besprüht worden ist; „mit Fehlstellen“: Glasoberfläche, die vorher mit TEGOTOP® 210 besprüht worden ist und anschließend 4 Fehlstellen in die Beschichtung eingebracht wurde; „GDT105F20 (mit Fehlstelle)“: Glasoberfläche, die vorher mit TEGOTOP® 210 besprüht worden ist, anschließend 4 Fehlstellen in die Beschichtung eingebracht wurde. Danach wurde diese Oberfläche mit GDT105F20 besprüht; „GDT105F20T105 (unbehandelt)“: Eine unbehandelte Glasoberfläche wurde mit GDT105F20 besprüht. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.134

Abbildung 101: Restfluoreszenz (in %) von Redwop™ auf unterschiedlich behandelten Glasoberflächen nach Kontamination und anschließender Benebelung (bei einer Lagerung der Proben von 30°); „unbehandelt“: unbehandelte Glasoberfläche; „TEGOTOP 210“: Glasoberfläche, die vorher mit TEGOTOP® 210 besprüht worden ist; „mit Fehlstellen“: Glasoberfläche, die vorher mit TEGOTOP® 210 besprüht worden ist und anschließend 4 Fehlstellen in die Beschichtung eingebracht wurde; „GDT105F20Silmikron+T105 (mit Fehlstelle)“: Glasoberfläche, die vorher mit TEGOTOP® 210 besprüht worden ist, anschließend 4 Fehlstellen in die Beschichtung eingebracht wurde. Danach wurde diese Oberfläche mit GDT105F20Silmikron+T105 besprüht; „GDT105F20Silmikron+T105 (unbehandelt)“: Eine unbehandelte Glasoberfläche wurde mit GDT105F20Silmikron+T105 besprüht. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils 10 Messungen mit Standardabweichung. Bei Übereinstimmung der Buchstaben sind die Unterschiede nicht signifikant.135

ANHANG

- A: Charakterisierung von pflanzlichen Oberflächen mit Hilfe des Weißlichtprofilometers
- B: Charakterisierung von technischen Oberflächen mit Hilfe des Weißlichtprofilometers
- C: Messung der Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf unbeschädigten und beschädigten Oberflächen (z. T. behandelt mit Testdispersionen)
- D: Messung der Restfluoreszenz von Redwop™ auf unbeschädigten und beschädigten Oberflächen (z. T. behandelt mit Testdispersionen)

Anhang A:

Tabelle A1: Anzahl pro Fläche (100 x 100 µm²) und Höhe der Strukturen auf den Oberflächen der Gruppe 1 (hierarchische Clusteranalyse), berechnet mit Hilfe der WP-Daten; OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite.

Oberfläche	Anzahl Strukturen pro Fläche		Höhe Strukturen (µm)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Alocasia macrorrhiza</i> US	10	0,99	16,61	2,28
<i>Euphorbia myrsinites</i> OS	11	1,20	21,91	3,87
<i>Euphorbia myrsinites</i> US	10	0,95	20,63	3,38
<i>Oryca sativa</i> OS	1	0,50	22,40	5,99
<i>Oryca sativa</i> US	6	2,46	14,54	4,63
<i>Xanthosoma robustum</i> US	8	1,65	29,16	6,11

Tabelle A2: Anzahl pro Fläche (100 x 100 µm²) und Höhe der Strukturen auf den Oberflächen der Gruppe 2 (hierarchische Clusteranalyse), berechnet mit Hilfe der WP-Daten; OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite.

Oberfläche	Anzahl Strukturen pro Fläche		Höhe Strukturen (µm)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Colocassia esculenta</i> OS	21	1,90	16	4,78
<i>Colocassia esculenta</i> US	20	2,01	17,73	5,29
<i>Xanthosoma nigrum</i> US	14	2,74	16,61	6,23
<i>Euphorbia atropurpurea</i> OS	17	4,25	14,24	1,99
<i>Euphorbia atropurpurea</i> US	22	2,67	14,18	3,90

Tabelle A3: Anzahl pro Fläche (100 x 100 µm²) und Höhe der Strukturen auf den Oberflächen der Gruppe 3 (hierarchische Clusteranalyse), berechnet mit Hilfe der WP-Daten; OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite.

Oberfläche	Anzahl Strukturen pro Fläche		Höhe Strukturen (µm)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Eschscholzia californica</i> OS	6	1,96	9,45	3,64
<i>Eschscholzia californica</i> US	5	1,23	11,51	4,26
<i>Alocasia robusta</i> OS	7	1,55	2,01	0,74
<i>Alocasia robusta</i> US	6	1,72	4,14	1,87
<i>Alocasia macrorrhiza</i> OS	13	1,78	2,19	0,80
<i>Berberis vulgaris</i> OS	11	1,35	4,22	1,95

<i>Brassica oleracea</i> OS	5	1,62	3,36	0,99
<i>Drimys winteri</i> OS	3	0,58	3,32	1,02
<i>Eucalyptus macrocarpa</i> OS	17	2,74	4,58	1,52
<i>Glycine max</i> OS	14	2	10,58	4,31
<i>Iris unguicularis</i> OS	5	0,71	5,94	3,61
<i>Iris germanica</i> OS	3	0,99	9,63	5,64
<i>Liriodendron tulipifera</i> OS	8	2,36	3,83	2,36
<i>Liriodendron tulipifera</i> US	11	2,37	9,41	4,13
<i>Thalictrum flavum</i> OS	8	1,70	3,41	1,21
<i>Tropaeolum majus</i> OS	7	2,05	7,30	2,60
<i>Xanthosoma robustum</i> OS	9	1,45	2,01	0,77
<i>Xanthosoma nigrum</i> OS	13	1,90	3,49	0,97
<i>Triticum aestivum</i> OS	6	1,17	7,17	4
<i>Clivia nobilis</i> OS	4	1,78	2,33	0,92
<i>Cocos nucifera</i> OS	0	-	2,50	1,06
<i>Coffea arabica</i> OS	0	-	0	-
<i>Ficus elastica</i> OS	3	0,74	3,69	0,77
<i>Hedera helix</i> OS	4	1,43	3,25	1,15

Tabelle A4: Anzahl pro Fläche (100 x 100 μm^2) und Höhe der Strukturen auf den Oberflächen der Gruppe 4 (hierarchische Clusteranalyse), berechnet mit Hilfe der WP-Daten; OS: Blattoberseite, US: Blattunterseite.

Oberfläche	Anzahl Strukturen pro Fläche		Höhe Strukturen (μm)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Nelumbo nucifera</i> OS	38	7,86	14,65	3,26

Tabelle A5: Mittelwerte der Rauheitsparameter von 7 bis 17 Einzelmessungen der mit dem WP untersuchten pflanzlichen Oberflächen.

Oberfläche	Rauheitsparameter														
	Ra	Rq	Rz(DIN)	Rmax	Rp	Rv	Rt	Rsk	Rku	Rk	Rpk	Rvk	Mr1	Mr2	RVO
<i>Alocasia macrorrhiza</i> US	1,37	2,09	22,46	27,66	8,95	19,33	28,28	-0,29	10,48	3,03	4,08	3,13	15,39	87,36	0,20
<i>Euphorbia myrsinites</i> OS	1,14	1,53	9,32	11,35	6,16	5,63	11,79	0,47	3,72	2,52	2,54	1,61	22,73	88,51	0,09
<i>Euphorbia myrsinites</i> US	1,15	1,53	9,53	12,66	6,12	6,87	12,99	0,19	4,28	2,75	2,13	1,81	22,21	89,45	0,10
<i>Oryza sativa</i> OS	1,07	1,48	10,74	18,33	11,34	7,49	18,83	0,60	9,62	3,17	2,02	1,79	10,71	89,65	0,09
<i>Oryza sativa</i> US	1,02	1,50	12,37	18,39	11,32	7,83	19,15	0,87	10,72	2,80	2,68	1,91	10,43	88,75	0,11
<i>Xanthosoma robustum</i> US	1,77	2,63	19,16	26,54	13,62	13,59	27,20	0,44	7,09	3,97	4,57	3,98	17,34	88,34	0,23
<i>Colocassia esculenta</i> OS	1,85	2,22	14,08	21,33	9,45	13,04	22,49	-0,07	5,66	6,34	1,64	1,75	9,03	94,32	0,05
<i>Colocassia esculenta</i> US	1,76	2,26	14,79	19,14	8,47	10,99	19,46	-0,78	4,33	4,52	1,68	3,61	10,58	80,64	0,35
<i>Xanthosoma nigrum</i> US	1,87	2,83	33,52	50,50	12,27	39,79	52,06	-1,70	32,94	4,45	3,91	4,42	16,79	87,56	0,27
<i>Euphorbia atropurpurea</i> OS	1,15	1,39	7,40	9,34	5,33	4,38	9,71	0,22	2,68	3,55	1,34	1,00	15,61	94,52	0,03
<i>Euphorbia atropurpurea</i> US	1,39	1,65	8,05	9,30	4,35	5,28	9,63	0,01	2,30	4,98	0,97	0,97	8,47	95,13	0,03
<i>Eschscholzia californica</i> OS	0,84	1,20	9,59	14,79	4,40	10,62	15,02	-1,61	14,14	2,29	1,11	1,97	10,93	86,63	0,13
<i>Eschscholzia californica</i> US	0,77	1,31	10,28	19,07	5,58	13,67	19,24	-2,97	32,63	1,68	1,44	2,40	12,17	83,75	0,19
<i>Alocasia robusta</i> OS	0,31	0,47	3,73	6,91	2,33	4,62	6,94	-1,57	18,52	0,82	0,56	0,88	11,06	89,43	0,05
<i>Alocasia robusta</i> US	0,38	0,54	3,63	6,27	2,45	3,96	6,41	-1,01	13,93	1,12	0,66	0,76	10,71	90,49	0,04
<i>Alocasia macrorrhiza</i> OS	0,39	0,50	3,15	3,67	2,04	1,76	3,80	0,20	3,30	1,20	0,61	0,50	11,63	90,60	0,02
<i>Berberis vulgaris</i> OS	0,51	0,81	7,63	17,86	4,42	13,76	18,18	-3,88	24,47	1,44	1,01	1,08	12,35	91,01	0,05
<i>Brassica oleracea</i> OS	0,30	0,38	2,45	2,90	1,60	1,40	3,01	0,06	3,40	0,95	0,42	0,38	10,43	90,65	0,02
<i>Drimys winteri</i> OS	0,39	0,49	3,19	3,56	1,95	1,74	3,69	0,08	3,22	1,26	0,52	0,47	10,33	91,06	0,02
<i>Eucalyptus macrocarpa</i> OS	0,51	0,71	4,82	8,11	4,19	4,95	9,15	-0,19	19,07	1,40	0,96	0,76	16,21	93,19	0,03
<i>Glycine max</i> OS	1,82	2,86	26,43	48,71	26,74	22,57	49,31	1,08	54,81	4,01	4,83	4,48	17,04	89,12	0,25
<i>Iris unguicularis</i> OS	0,59	0,85	6,14	10,47	6,56	4,46	11,02	0,91	9,31	1,63	1,49	0,96	11,13	88,80	0,05
<i>Iris germanica</i> OS	0,29	0,43	2,99	4,93	2,10	2,94	5,04	-0,75	10,41	0,80	0,53	0,67	10,70	87,65	0,04
<i>Liriodendron tulipifera</i> OS	0,25	0,32	2,18	2,59	1,09	1,61	2,71	-0,38	4,30	0,77	0,30	0,42	9,41	89,65	0,02
<i>Liriodendron tulipifera</i> US	0,81	1,22	9,66	14,14	7,00	7,54	14,54	0,33	9,48	2,01	2,16	1,71	14,21	89,48	0,09
<i>Thalictrum flavum glaucum</i> OS	0,30	0,42	3,45	4,71	1,42	3,42	4,84	-1,17	12,20	0,90	0,39	0,65	10,45	90,90	0,03
<i>Tropaeolum majus</i> OS	0,82	1,14	9,48	13,98	5,02	10,05	15,07	-0,70	10,64	2,30	1,37	1,60	13,56	89,05	0,09
<i>Xanthosoma robustum</i> OS	0,28	0,36	2,31	2,79	1,48	1,40	2,88	-0,04	3,27	0,90	0,34	0,38	9,51	90,22	0,02
<i>Xanthosoma nigrum</i> OS	0,51	0,70	5,59	8,54	2,92	5,88	8,79	-0,79	10,14	1,54	0,77	0,99	10,30	90,72	0,05
<i>Triticum aestivum</i> OS	1,44	2,27	17,04	33,97	11,73	22,58	34,32	-1,09	21,50	3,34	2,48	4,60	12,07	87,42	0,32

Fortsetzung Tabelle A5: Mittelwerte der Rauheitsparameter von 7 bis 17 Einzelmessungen der mit dem WP untersuchten pflanzlichen Oberflächen.

Oberfläche	Rauheitsparameter														
	<i>Ra</i>	<i>Rq</i>	<i>Rz(DIN)</i>	<i>Rmax</i>	<i>Rp</i>	<i>Rv</i>	<i>Rt</i>	<i>Rsk</i>	<i>Rku</i>	<i>Rk</i>	<i>Rpk</i>	<i>Rvk</i>	<i>Mr1</i>	<i>Mr2</i>	<i>RV0</i>
<i>Clivia nobilis</i> OS	0,40	0,53	3,74	5,73	3,11	2,77	5,88	0,18	5,61	1,24	0,63	0,59	10,63	90,63	0,03
<i>Cocos nucifera</i> OS	0,45	0,60	4,27	5,21	3,22	2,45	5,67	0,43	4,77	1,33	0,85	0,62	12,62	91,17	0,03
<i>Coffea arabica</i> OS	0,35	0,50	4,10	6,76	3,55	3,36	6,90	0,26	10,92	1,05	0,68	0,64	11,00	91,47	0,03
<i>Ficus elastica</i> OS	0,29	0,38	2,59	3,16	1,72	1,52	3,24	0,11	4,10	0,90	0,45	0,41	10,67	90,45	0,02
<i>Hedera helix</i> OS	0,33	0,42	2,85	3,50	1,86	1,78	3,64	0,03	3,79	1,05	0,47	0,46	9,97	90,64	0,02
<i>Nelumbo nucifera</i> OS	1,82	2,25	11,94	14,84	7,35	8,04	15,38	0,41	3,04	4,53	3,24	1,84	23,71	93,51	0,06

Tabelle A6: Mittelwerte der Welligkeitsparameter von 7 bis 17 Einzelmessungen der mit dem WP untersuchten pflanzlichen Oberflächen.

Oberfläche	Welligkeitsparameter														
	Wa	Wq	Wz(DIN)	Wmax	Wp	Wv	Wt	Wsk	Wku	Wk	Wpk	Wvk	WMr1	WMr2	WV0
<i>Alocasia macrorrhiza</i> US	1,82	2,55	12,32	15,04	10,91	5,75	16,66	1,33	5,64	3,81	5,40	2,11	21,10	92,81	0,09
<i>Euphorbia myrsinites</i> OS	4,33	5,36	19,94	23,09	16,58	7,90	24,49	1,17	3,42	6,29	12,14	1,34	0,33	0,98	0,02
<i>Euphorbia myrsinites</i> US	4,30	5,28	19,10	22,69	16,09	7,54	23,63	1,12	3,38	6,44	11,57	1,27	34,02	97,66	0,01
<i>Oryza sativa</i> OS	3,12	3,77	9,88	15,84	11,92	6,85	18,78	0,23	3,07	7,70	4,49	2,44	12,55	82,65	0,30
<i>Oryza sativa</i> US	1,89	2,52	7,59	13,21	10,70	4,32	15,02	0,95	5,23	4,67	4,47	1,29	14,67	89,76	0,11
<i>Xanthosoma robustum</i> US	5,65	7,19	26,09	32,33	23,17	10,19	33,36	1,11	3,76	12,66	14,01	1,26	23,43	97,72	0,02
<i>Colocassia esculenta</i> OS	3,63	4,40	17,40	19,54	11,82	8,83	20,65	0,43	2,53	11,17	4,93	1,82	16,44	96,10	0,05
<i>Colocassia esculenta</i> US	4,44	5,28	19,18	-	9,99	12,62	22,61	-0,33	2,23	13,91	2,14	4,64	5,19	85,67	0,36
<i>Xanthosoma nigrum</i> US	3,17	4,05	16,21	20,28	13,71	8,01	21,72	1,06	7,73	7,65	7,39	1,89	22,27	95,03	0,05
<i>Euphorbia atropurpurea</i> OS	2,92	3,48	13,43	14,78	9,23	5,94	15,17	0,58	2,43	8,31	4,52	0,59	20,76	98,72	0,00
<i>Euphorbia atropurpurea</i> US	3,09	3,67	13,88	15,46	9,74	6,64	16,38	0,41	2,28	9,83	3,84	0,76	16,24	98,48	0,01
<i>Eschscholzia californica</i> OS	1,98	2,46	8,97	11,44	5,90	5,93	11,83	0,07	236,31	6,15	2,70	1,54	12,44	84,14	0,06
<i>Eschscholzia californica</i> US	3,21	3,75	12,13	13,82	6,80	8,07	14,86	-0,15	2,02	9,96	1,27	2,83	6,21	86,92	0,27
<i>Alocasia robusta</i> OS	0,57	0,73	2,83	4,23	1,85	2,86	4,71	-0,37	4,57	1,61	0,69	0,94	9,83	87,79	0,06
<i>Alocasia robusta</i> US	0,77	0,97	3,45	4,58	2,45	2,68	5,13	0,01	3,26	2,36	1,02	0,79	12,65	90,91	0,04
<i>Alocasia macrorrhiza</i> OS	0,53	0,64	2,13	2,65	1,48	1,57	3,05	0,00	2,64	1,49	0,69	0,49	14,47	90,43	0,03
<i>Berberis vulgaris</i> OS	0,88	1,08	4,12	5,48	2,82	3,05	5,87	0,12	2,73	2,80	1,00	0,91	11,32	92,90	0,04
<i>Brassica oleracea</i> OS	0,56	0,69	2,53	3,11	1,69	1,67	3,36	0,00	2,59	1,81	0,60	0,48	10,13	90,53	0,03
<i>Drimys winteri</i> OS	0,36	0,44	1,65	2,24	1,31	1,15	2,46	0,10	2,93	1,08	0,46	0,37	12,59	92,11	0,02
<i>Eucalyptus macrocarpa</i> OS	1,35	1,65	6,43	8,16	5,31	3,32	8,63	0,50	2,88	4,26	2,03	0,63	14,00	95,63	0,01
<i>Glycine max</i> OS	1,87	2,34	9,51	14,07	6,55	8,17	14,71	-0,10	3,87	5,51	2,02	2,60	10,45	90,00	0,17
<i>Iris unguicularis</i> OS	1,76	2,21	6,39	9,49	6,00	5,29	11,29	0,02	2,91	5,04	2,43	2,24	10,20	87,15	0,18
<i>Iris germanica</i> OS	2,07	2,73	8,04	12,28	6,33	9,33	15,66	-0,45	4,49	5,66	2,43	4,53	11,44	89,17	0,28
<i>Liriodendron tulipifera</i> OS	0,62	0,77	2,84	3,82	2,45	1,59	4,04	0,40	2,84	2,00	0,91	0,33	13,31	94,06	0,01
<i>Liriodendron tulipifera</i> US	2,38	2,96	11,40	14,16	8,34	7,07	15,40	0,12	2,71	7,57	2,80	2,33	12,59	91,66	0,11
<i>Thalictrum flavum glaucum</i> OS	0,74	0,92	3,42	4,20	2,48	2,24	4,72	0,24	2,78	2,32	1,01	0,58	14,12	92,89	0,03
<i>Tropaeolum majus</i> OS	1,79	2,22	8,11	10,13	4,82	6,29	11,10	-0,16	2,90	5,43	1,65	2,30	12,61	91,44	0,13
<i>Xanthosoma robustum</i> OS	0,66	0,80	2,72	3,31	1,99	1,82	3,81	0,12	2,36	2,20	0,75	0,52	10,40	93,14	0,02
<i>Xanthosoma nigrum</i> OS	1,32	1,63	5,59	7,63	3,81	4,63	8,43	-0,09	2,79	4,34	1,17	1,56	8,71	90,78	0,08
<i>Triticum aestivum</i> OS	2,06	2,60	8,66	13,14	6,65	7,71	14,36	-0,01	3,07	5,77	2,74	2,97	14,41	88,20	0,20

Fortsetzung Tabelle A6: Mittelwerte der Welligkeitsparameter von 7 bis 17 Einzelmessungen der mit dem WP untersuchten pflanzlichen Oberflächen.

Oberfläche	Welligkeitsparameter														
	Wa	Wq	Wz(DIN)	Wmax	Wp	Wv	Wt	Wsk	Wku	Wk	Wpk	Wvk	WMr1	WMr2	WV0
<i>Clivia nobilis</i> OS	0,64	0,78	2,42	3,27	1,83	1,96	3,79	-0,05	2,69	2,15	0,54	0,55	7,80	91,05	0,03
<i>Cocos nucifera</i> OS	0,58	0,73	2,83	3,79	2,44	1,87	4,31	0,14	3,55	1,76	0,80	0,69	11,01	89,65	0,04
<i>Coffea arabica</i> OS	0,48	0,61	2,48	3,35	1,93	1,83	3,76	-0,08	4,26	1,40	0,58	0,66	10,51	87,55	0,04
<i>Ficus elastica</i> OS	0,58	0,71	2,37	3,17	1,82	1,52	3,35	0,17	2,67	1,84	0,71	0,43	12,41	92,29	0,02
<i>Hedera helix</i> OS	0,48	0,60	2,11	2,83	1,68	1,40	3,09	0,15	3,20	1,49	0,61	0,41	10,23	90,94	0,02
<i>Nelumbo nucifera</i> OS	2,37	2,99	13,31	15,75	9,84	6,65	16,49	0,35	3,06	7,47	3,63	1,90	12,55	91,59	0,09

Tabelle A7: Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf unterschiedlich strukturierte pflanzliche Oberflächen.

Oberfläche	Kontaktwinkel (°)		Abrollwinkel (°)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Alocasia macrorrhiza</i> US	155,43	4,18	15,81	2,74
<i>Euphorbia myrsinites</i> OS	119,45	12,54	0	0
<i>Euphorbia myrsinites</i> US	135,6	6,75	90	0
<i>Oryza sativa</i> OS	-	-	-	-
<i>Oryza sativa</i> US	-	-	-	-
<i>Xanthosoma robustum</i> US	150,42	6,03	46,85	4,97
<i>Colocassia esculenta</i> OS	150,27	3,31	48,8	21,06
<i>Colocassia esculenta</i> US	150,77	2,98	25,72	8,26
<i>Xanthosoma nigrum</i> US	143,17	5,61	41,15	22,32
<i>Euphorbia atropurpurea</i> OS	146,4	11,85	42,6	25,80
<i>Euphorbia atropurpurea</i> US	99,28	8,01	6,82	14,39
<i>Eschscholzia californica</i> OS	85,19	6,85	90	0
<i>Eschscholzia californica</i> US	84,46	9,67	90	0
<i>Alocasia robusta</i> OS	71,65	18,17	90	0
<i>Alocasia robusta</i> US	136,43	20,49	71,07	26,44
<i>Alocasia macrorrhiza</i> OS	147,76	5,01	34,41	13,11
<i>Berberis vulgaris</i> OS	88,3	15,12	90	0,00
<i>Brassica oleracea</i> OS	159,24	2,29	25,05	2,77
<i>Drimys winteri</i> OS	115,52	11,98	42,6	25,80
<i>Eucalyptus macrocarpa</i> OS	135,76	8,86	90	0
<i>Glycine max</i> OS	114,92	21,36	90	0
<i>Iris unguicularis</i> OS	92,74	4,95	90	0
<i>Iris germanica</i> OS	124,9	14,19	10,91	2,95
<i>Liriodendron tulipifera</i> OS	153,59	7,41	52,63	12,08
<i>Liriodendron tulipifera</i> US	158,34	2,36	16,49	3,23
<i>Thalictrum flavum</i> OS	141,02	14,58	57,57	24,24
<i>Tropaeolum majus</i> OS	161,67	1,65	6,38	0,70
<i>Xanthosoma robustum</i> OS	147,1	10,51	21,4	11,25
<i>Xanthosoma nigrum</i> OS	169,05	5,14	33,41	8,25
<i>Triticum aestivum</i> OS	103,71	21,86	90	0
<i>Clivia nobilis</i> OS	132,44	17,04	90	0
<i>Cocos nucifera</i> OS	68,16	4,40	90	0
<i>Coffea arabica</i> OS	97,38	11,44	90	0
<i>Ficus elastica</i> OS	67,53	10,02	90	0
<i>Hedera helix</i> OS	96,43	5,68	90	0
<i>Nelumbo nucifera</i> OS	156,07	4,56	0	0

Anhang B

Tabelle B1: Anzahl pro Fläche (100 x 100 µm²) und Höhe der Strukturen auf unterschiedlich strukturierte technische Oberflächen, berechnet mit Hilfe der WP-Daten.

Oberfläche	Anzahl Strukturen pro Fläche		Höhe Strukturen (µm)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Lotus-Effect®-Kunststoff	3	1,12	10,00	3,89
Hydrophobierte Kupferfolie	28	6,24	12,46	3,67
Lotus-Effect®-Glas "White Frost"	4	1,32	14,26	3,44
TEGOTOP® 210	7	3,37	5,21	2,35
Lotusan®	8	2,24	7,39	2,09
Lotus-Effect®-Textil	4	1,26	34,74	19,23
Glas (Kontrolle)	0	0	0	0

Tabelle B2: Mittelwerte der Rauheitsparameter von 6 bis 10 Einzelmessungen der mit dem WP untersuchten pflanzlichen Oberflächen.

Oberfläche	Rauheitsparameter														
	<i>Ra</i>	<i>Rq</i>	<i>Rz(DIN)</i>	<i>Rmax</i>	<i>Rp</i>	<i>Rv</i>	<i>Rt</i>	<i>Rsk</i>	<i>Rku</i>	<i>Rk</i>	<i>Rpk</i>	<i>Rvk</i>	<i>Mr1</i>	<i>Mr2</i>	<i>RVO</i>
Lotus-Effect®-Kunststoff	0,46	0,70	6,12	9,68	6,90	4,06	10,96	1,32	16,41	1,22	1,19	0,86	12,84	90,56	0,04
Hydrophobierte Kupferfolie	1,21	1,97	17,93	30,83	22,97	7,90	30,87	2,79	58,49	2,35	3,85	2,32	18,90	88,62	0,14
Lotus-Effect®-Glas "White Frost"	0,83	1,27	10,89	16,25	8,42	8,21	16,63	-0,30	9,99	2,09	1,82	2,27	10,89	88,56	0,13
TEGOTOP® 210	0,35	0,56	4,12	5,94	3,60	2,53	6,13	1,07	10,37	0,72	1,08	0,84	14,03	86,06	0,06
Lotusan®	0,37	0,51	3,52	4,98	2,43	2,74	5,17	0,06	6,21	1,06	0,67	0,72	13,23	90,72	0,03
Lotus-Effect®-Textil	3,45	5,35	41,67	66,25	25,97	42,73	68,70	-0,58	10,48	7,03	7,94	9,45	15,05	85,15	0,75
Glas (Kontrolle)	0,01	0,01	0,07	0,11	0,06	0,05	0,11	0,38	8,80	-	-	-	-	-	-

Tabelle B3: Mittelwerte der Welligkeitsparameter von 6 bis 10 Einzelmessungen der mit dem WP untersuchten pflanzlichen Oberflächen.

Oberfläche	Welligkeitsparameter															
	<i>Wa</i>	<i>Wq</i>	<i>Wz(DIN)</i>	<i>Wmax</i>	<i>Wp</i>	<i>Wv</i>	<i>Wt</i>	<i>Wsk</i>	<i>Wku</i>	<i>Wk</i>	<i>Wpk</i>	<i>Wvk</i>	<i>WMr1</i>	<i>WMr2</i>	<i>WVO</i>	
Lotus-Effect®-Kunststoff	3,09	3,68	11,68	14,26	6,80	8,37	15,18	-0,28	2,27	9,32	1,70	3,06	8,85	85,15	0,29	
Hydrophobierte Kupferfolie	1,67	2,48	10,01	15,67	13,10	2,78	15,88	2,43	10,32	2,81	5,84	0,40	23,12	96,07	0,01	
Lotus-Effect®-Glas "White Frost"	2,65	3,25	10,89	14,58	8,79	7,27	16,05	0,31	2,84	7,69	3,78	1,75	14,85	92,69	0,09	
TEGOTOP® 210	0,87	1,09	3,46	4,82	3,33	1,58	4,91	1,31	2601,01	1,74	1,96	0,21	24,73	93,42	0,01	
Lotusan®	1,80	2,21	8,27	10,40	5,33	5,40	10,73	0,13	2,56	5,39	2,20	1,61	15,26	91,35	0,07	
Lotus-Effect®-Textil	9,40	11,78	36,67	51,48	29,22	26,56	55,78	0,30	2,82	23,89	16,47	10,09	18,39	82,86	0,61	
Glas (Kontrolle)	0,03	0,03	0,05	0,09	0,04	0,08	0,12	-0,54	2,46	0,35	0,00	0,39	0,31	66,80	0,06	

Tabelle B4: Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf unterschiedlich strukturierte pflanzliche Oberflächen.

Oberfläche	Kontaktwinkel (°)		Abrollwinkel (°)	
	<i>Mittelwert</i>	<i>Standardabweichung</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Standardabweichung</i>
Lotus-Effect®-Kunststoff	140,01	1,99	7,8	5,47
Hydrophobierte Kupferfolie	167,11	4,76	5,07	2,00
Lotus-Effect®-Glas "White Frost"	155,83	6,16	62,89	22,32
TEGOTOP® 210	148,42	5,62	7,38	2,73
Lotusan®	141,96	7,93	90	0
Lotus-Effect®-Textil	156,57	6,05	39,26	17,49
Glas (Kontrolle)	24,87	9,21	80,51	20,01

Anhang C

Tabelle C1: Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf verschiedenen hydrophilen Oberflächen und TEGOTOP® 210-Beschichtungen auf diesen Oberflächen.

Oberfläche	Kontaktwinkel (°)		Abrollwinkel (°)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Glas unbehandelt	24,87	9,21	80,51	20,01
TEGOTOP® 210 auf Glas	148,42	5,62	7,38	2,73
Plexiglas® unbehandelt	73,85	6,71	90	0
TEGOTOP® 210 auf Plexiglas®	164,06	6,76	90	0
Schiefer unbehandelt	22,14	8,76	85,7	13,6
TEGOTOP® 210 auf Schiefer	147,43	8,24	28,57	24,03

Tabelle C2: Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf unbeschädigten und beschädigten Bereichen einer mit Gloss Dryer® besprühten TEGOTOP® 210-Beschichtung (auf Glas) vor und nach Beregnung.

Behandlung der TEGOTOP® 210-Beschichtung	Kontaktwinkel (°)		Abrollwinkel (°)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Gloss Dryer® auf unbeschädigte Oberfläche vor Beregnung	154,96	7,47	7,2	4,73
Gloss Dryer® auf unbeschädigte Oberfläche nach Beregnung	163,81	5,20	8,17	3,77
Gloss Dryer® auf Fehlstelle vor Beregnung	81,28	3,85	90	0
Gloss Dryer® auf Fehlstelle nach Beregnung	75,67	9,73	90	0

Tabelle C3: Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf vorher in verschiedenen Lösungen eingetauchten Glasoberflächen (Ausnahme TEGOTOP® 105: Glasoberfläche wurde mit diesem Aerosol eingesprüht).

Oberfläche	Kontaktwinkel (°)		Abrollwinkel (°)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Gloss Dryer®	66,44	2,89	90	0
TEGOTOP® 105	151,34	10,61	38,25	27,31
GDT105F20	154,79	5,53	77,16	21,4
GDT105F20Silmikron	147,21	29,07	29,22	32,52
GDT105F20Silmikron+T105	147,67	23,06	8,83	5,6

Tabelle C4: Kontakt- und Abrollwinkel von Wasser auf vorher in verschiedenen Lösungen eingetauchten Glasoberflächen (Ausnahme TEGOTOP® 105: Glasoberfläche wurde mit diesem Aerosol eingesprüht).

Behandlung der Lotus-Effect® - Kunststoffoberflächen	Kontaktwinkel (°)		Abrollwinkel (°)	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
unbehandelt	66,44	2,89	90	0
REWOPOL® SB DO 75	151,34	10,61	38,25	27,31
TEGOTENS® DO	154,79	5,53	77,16	21,4
TEGOTENS® EC 11	147,21	29,07	29,22	32,52
TEGOTENS® B 810	147,67	23,06	8,83	5,6

Anhang D

Tabelle D1: Die Stärke der Fluoreszenz (in mV) und die Belegung an Redwop™-Partikeln (Prozent an weißen Pixeln in einem Binärbild) in Abhängigkeit zur Häufigkeit der Kontamination.

Anzahl der Kontaminations-schritte	Fluoreszenz (mV)		Redwop™-Belegung (%)	
	<i>Mittelwert</i>	<i>Standardabweichung</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Standardabweichung</i>
1	0,05	0	2,83	0,81
2	0,1	0	4,8	0,77
3	0,18	0	6,55	1,98
4	0,26	0	9,84	1,01
5	0,31	0	9,59	1,96
6	0,36	0	13,7	1,7
7	0,41	0	12,27	3,05
8	0,53	0	16,2	4,12

Tabelle D2: Fluoreszenz von Redwop™ auf unterschiedlich behandelten Lotus®-Effect-Kunststoffoberflächen, die zuvor in unterschiedliche Tenside getaucht wurden.

Tenside		Fluoreszenz (mV)	
		Mittelwert	Standardabweichung
unbehandelt	<i>vor Behandlung</i>	0,002	0
	<i>nach Kontamination</i>	0,0336	0,0079
	<i>nach Benebelung</i>	0,01	0,0018
REWOPOL® SB DO 75	<i>vor Behandlung</i>	0,002	0
	<i>nach Kontamination</i>	0,016	0,0031
	<i>nach Benebelung</i>	0,0096	0,0043
TEGOTENS® DO	<i>vor Behandlung</i>	0,002	0
	<i>nach Kontamination</i>	0,0222	0,009
	<i>nach Benebelung</i>	0,014	0,0037
TEGOTENS® EC 11	<i>vor Behandlung</i>	0,002	0
	<i>nach Kontamination</i>	0,0178	0,0028
	<i>nach Benebelung</i>	0,0052	0,0018
TEGOTENS® B 810	<i>vor Behandlung</i>	0,002	0
	<i>nach Kontamination</i>	0,0254	0,0068
	<i>nach Benebelung</i>	0,0104	0,0021

Tabelle D3: Fluoreszenz von Redwop™ auf mit TEGOTOP® 210 beschichteten Glasoberflächen (unbeschädigt und beschädigt), einige Oberflächen wurden zusätzlich mit der Testdispersion „GDT105F20“ besprüht.

Tenside		Fluoreszenz (mV)	
		Mittelwert	Standardabweichung
unbehandelt	<i>vor Behandlung</i>	0,007	0
	<i>nach Kontamination</i>	0,106	0,0255
	<i>nach Beprobung</i>	0,015	0,0026
TEGOTOP® 210	<i>vor Behandlung</i>	0,008	0
	<i>nach Kontamination</i>	0,045	0,001
	<i>nach Beprobung</i>	0,0087	0,0006
Mit Fehlstellen	<i>vor Behandlung</i>	0,0063	0,0012
	<i>nach Kontamination</i>	0,087	0,0282
	<i>nach Beprobung</i>	0,0377	0,0067
GDT105F20 (unbehandelt)	<i>vor Behandlung</i>	0,007	0
	<i>nach Kontamination</i>	0,1343	0,0252
	<i>nach Beprobung</i>	0,051	0,0074
GDT105F20 (mit Fehlstellen)	<i>vor Behandlung</i>	0,006	0,0017
	<i>nach Kontamination</i>	0,1167	0,0132
	<i>nach Beprobung</i>	0,06	0,0188

Tabelle D4: Fluoreszenz von Redwop™ auf mit TEGOTOP® 210 beschichteten Glasoberflächen (unbeschädigt und beschädigt), einige Oberflächen wurden zusätzlich mit der Testdispersion „GDT105F20Silmikron+T105“ besprüht.

Tenside		Fluoreszenz (mV)	
		Mittelwert	Standardabweichung
unbehandelt	<i>vor Behandlung</i>	0,0063	0,0005
	<i>nach Kontamination</i>	0,0648	0,0102
	<i>nach Beprobung</i>	0,0208	0,0045
TEGOTOP® 210	<i>vor Behandlung</i>	0,00675	0,0005
	<i>nach Kontamination</i>	0,0493	0,0059
	<i>nach Beprobung</i>	0,0073	0,0005
Mit Fehlstellen	<i>vor Behandlung</i>	0,0065	0,0006
	<i>nach Kontamination</i>	0,062	0,0026
	<i>nach Beprobung</i>	0,0388	0,0066
GDT105F20Silmikron+T105 (unbehandelt)	<i>vor Behandlung</i>	0,007	0
	<i>nach Kontamination</i>	0,0688	0,0056
	<i>nach Beprobung</i>	0,043	0,0054
GDT105F20Silmikron+T105 (mit Fehlstellen)	<i>vor Behandlung</i>	0,0065	0,0006
	<i>nach Kontamination</i>	0,0568	0,0083
	<i>nach Beprobung</i>	0,0415	0,0082